

תאורה במקומות העבודה היבטי בטיחות וגיהות

מאת ד"ר אינה ניסנבאום



המוסד לבטיחות ולגיהות

מחלקת הוצאה לאור

אוגוסט 2006

קוד: ח-100

תודתנו לחברות:

'געש תאורה';

'ח.ג.י' שיווק מוצרי חשמל בע"מ;

'ניסקו' יבוא חשמל ואלקטרוניקה בע"מ;

'שטייניץ הנדסת תאורה' בע"מ,

שאיפשרו לנו להשתמש בנתונים ובתמונות לצורך הפקת החוברת

© כל הזכויות שמורות

למוסד לבטיחות ולגיהות - מחלקת הוצאה לאור

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אלקטרוני, אופטי או מכני אחר - כל חלק שהוא מהחומר שבספר זה אלא ברשות מפורשת בכתב מהמוציא לאור ועם ציון המקור. המידע בספר זה עדכני ליום הדפסתו.

הספר נועד למסור מידע לקורא בתחומים שבהם עוסק הפרסום, ואיננו תחליף לחוות דעת מקצועית לגבי מקרים פרטיים. כל בעיה או שאלה מקצועית, הקשורות במקרה פרטי - יש לבחון, לגופו של עניין, עם מומחה בתחום.

ISBN - 965-490-037-8

תוכן העניינים

7..... הקדמה

8..... מבוא

9..... פרק ראשון: מהי תאורה.....

11..... הראייה

11..... תאורה נכונה.....

12..... תאורה לקויה.....

15..... תאורה כגורם בטיחותי.....

16..... תאונות ותקלות (דוגמאות).....

17..... דרישות לתכנון תאורה.....

21..... פרק שני: יסודות תורת המאור.....

21..... אנרגיית האור ומקורותיה.....

21..... ספקטרום הקרינה ורגישות העין.....

23..... מבנה העין - כיצד אנו רואים.....

24..... שטף האור ונצילות מקור האור.....

25..... זווית מרחבית ועוצמת האור.....

26..... עוצמת ההארה.....

28..... בהיקות.....

28..... ניגודיות.....

28..... טמפרטורת צבע ומסירת צבע.....

30..... פרק שלישי: נורות.....

30..... נצילות אורית.....

30..... אורך חיים של נורות והחלפתן.....

31..... ציוד הדלקה.....

32..... סוגי נורות.....

32..... נורות ליבון.....

32..... נורות ליבון רגילות.....

33..... נורת הלוגן.....

34..... נורות פריקה.....

35..... נורות פריקה באדי נתרן.....

36..... נורות פריקה באדי כספית.....

36..... נורות מטל-הלייד (Metal halids).....

37..... נורות פלואורסצנטיות (פלואורניות).....

38..... נורות פלואורסצנטיות קומפקטיות.....



- 38..... מקורות אור חדישים
- 39..... תופעת ההבהוב והאפקט הסטרובוסקופי
- 40..... השוואה בין מקורות האור השונים

41 פרק רביעי: גופי תאורה

- 41..... בקרה על האור
- 42..... נצילות גופי תאורה ועקום פוטומטרי
- 44..... גופים לתאורה ישירה
- 44..... גופים לתאורה בלתי ישירה (up-light)
- 44..... תאורה משולבת
- 44..... רמת IP - דרגות הגנה בפני לחות ואבק
- 45..... גופים לתאורת פנים
- 45..... גופים לתאורת חוץ
- 45..... בחירה של גוף תאורה
- 46..... תחזוקה של גופי תאורה

47 פרק חמישי: תכנון תאורה

- 47..... חוק ותקנות
- 48..... תקנים
- 50..... תכנון תאורה
- 50..... תכנון בהתייחסות לחוק ולתקנות

52 פרק ששי: יישומים והתאמה למקומות עבודה שונים

- 52..... דרישות כלליות
- 54..... תאורה במשרדים
- 54..... עמדת המחשב
- 54..... צג המחשב
- 55..... חלונות
- 55..... שולחן העבודה
- 55..... משרדים בשיטת החלל הפתוח (open space)
- 56..... חדרי ישיבות
- 56..... ספריות
- 57..... מסדרונות ומעברים
- 57..... מפעלים ומבני תעשייה
- 57..... בעיות אופייניות בתחומי עבודה שונים
- 57..... קורוזיה לחות, ואבק
- 57..... אווירה נפצה
- 58..... האפקט הסטרובוסקופי
- 58..... התעשייה הכימית
- 58..... תעשיות הדפוס הצבע, והאלקטרוניקה



58	תעשיית העץ
58	תעשיות המזון
58	מחסנים
59	חקלאות
60	חניונים דרכים וכבישים פנימיים במפעלים, מישטחי פריקה וטעינה
60	בניין ועבודות חפירה
60	בריכות מים ובריכות שחייה
60	תאורת חירום ומילוט

פרק שביעי: בדיקת התאמה של מיתקני תאורה לייעודם 62

62	הסקר הבסיסי
63	הסקר המפורט

פרק שמיני: שאלות נפוצות (FAQs) 67

67	מהי עוצמת ההארה הנדרשת?
67	איך מבצעים מדידות של תאורה?
68	איך מזהים תאורה לא מספיקה?
69	מהו פיזור אור לקוי?
69	איך מזהים בוהק? מה אפשר לעשות?
71	מהי ניגודיות לקויה?
72	מהו הבהוב?
72	מהו רעש מטריד מגופי תאורה?
72	האם צבע האור ישפיע על הצבע שאנו רואים?
72	נורות כספית ותאורה פלואורסצנטית

נספחים 73

73	נספח א': דוגמה לחישוב תאורת פנים
77	נספח ב': מילון מושגים בנושא התאורה
81	נספח ג': נתונים בסיסיים של נורות

רשימת מקורות 87



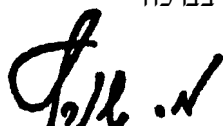
הקדמה

החוברת המקצועית המונחת לפניכם - העוסקת בהיבטי הבטיחות והגיהות של התאורה - באה למלא חלל במידע הכתוב בתחום התאורה בכלל ובנושאי בטיחות וגיהות של תאורה בפרט.

לתאורה נאותה אנו נוטים להתייחס כאל דבר מובן מאליו ולתאורה לקויה אנו מתייחסים כאל מיפגע. לעתים מזומנות בכלל לא מתייחסים לכל המצבים שבין השניים - וכאן טמונים שורש הרע וזרעי הפורענות.

בחומר המקצועי והמקיף שכללה **ד"ר אינה ניסנבאום** בחוברת היא מאירה את תחומי התאורה, הבטיחות והגיהות מכיוונים שונים, באופן שיענה על צורכיהם של אלה אשר מעוניינים להרחיב את הידע הכללי שלהם בתאורה, וכמובן - לכל מי שעוסקים בתאורה - להרחיב את הידע בהיבטי בטיחות וגיהות.

בברכה



מנחם שורץ

מנהל המוסד לבטיחות ולגיהות



מבוא

החוברת שלפניכם עוסקת בתאורה ובהשפעתה על בטיחות העובד ובריאותו. מטרתה - להביא בפני הקוראים מידע בסיסי מרוכז בנושא התאורה ולהגביר את המודעות לנושא.

החוברת מיועדת בעיקר לאנשי בטיחות ולגיהותנים, אך תוכל לשמש גם את אלה העסוקים בתחום המאור ורוצים להתעמק בנושא.

הדיון בחוברת מובא בצורה כללית ואיננו מכוון ללמד תכנון של מיתקני תאורה: אין כאן הנחיות תכנון או המלצות למקרים מיוחדים, אלא רק ריכוז של דרישות כלליות ממיתקני תאורה אופייניים.

לצורך הכתיבה סקרנו מחקרים וספרים רבים. רשימת המקורות מרוכזת בסוף החוברת.

ד"ר אינה ניסנבאום



פרק ראשון

מהי תאורה

אחד החושים היותר חשובים של האדם הוא חוש הראייה. רוב המידע מגיע אלינו באמצעותו. בלעדיו - יש לנו קושי גדול בביצוע פעולות פשוטות. לצורך הראייה, ואפילו חלקית, נדרשת תאורה. עוצמת התאורה הרצויה נקבעת בהתאם לסוג הפעולה שאותה אנחנו מעוניינים לבצע. לדוגמה: כאשר נדרש להבחין בפרטים קטנים, יש צורך בעוצמת אור גבוהה; כאשר רק רוצים לחלוף במהירות באזור מסוים - תספיק תאורת התמצאות בלבד. כאשר עוצמת ההארה לא מספיקה - אנו מאמצים מאוד את העיניים ומתעייפים במהירות. תאורה חזקה מדי או מסנוורת פוגעת במערכת הראייה ובאיכות הראייה.

בעבר הרחוק היתה השמש מקור האור היחיד. האש כמקור אור נוספה לפני 80,000 שנה, כאשר האדם הניאנדרטלי למד להצית אותה ולשלוט עליה. השימוש במנורות שמן או גז, החל במאה ה-19 והיווה בזמנו מהפיכה של ממש. השימוש במנורות של אז היה לא נוח וגם מסוכן. רק בעקבות פיתוח הנורה החשמלית ע"י תומס אדיסון (1879, ארה"ב), הפכה התאורה לדבר מובן מאליו, יעיל, נפוץ, הכרחי ונוח (ה"קרדיט" על ההמצאה שמור אמנם לאדיסון, אך הממציא הראשון הידוע הוא שגן גרמני בשם גיובל, ובמקביל לאדיסון ידוע גם על ממציא נוסף - סוואן (Swan) הבריטי, שהתעכב ברישום הפטנט ולכן לא התפרסם.

התאורה החשמלית מבטלת את התלות של האדם באור הטבעי ומאפשרת ראייה טובה בכל עונות השנה, ביום ובלילה. התאורה החשמלית תורמת רבות לפירוי העבודה ולבטיחות.

קיימים מקורות אור חשמליים הפועלים בשיטות שונות, גופי תאורה המכוונים את האור בהתאם לצורך, תקנים המגדירים את כמות האור הנדרשת ושיטות לתכנון ולהתקנה. תכנון התאורה הפך כיום - עם ההתפתחות הטכנולוגית ופיתוח סוגים רבים של מקורות אור - למקצוע הנדסי בפני עצמו, הרבה מעבר לשאלה בסיסית כגון: "כמה מנורות צריך פה?".



תאורה (או: "תורת המאור") היא מקצוע הנדסי המשלב בתוכו תחומים רבים: הנדסת חשמל, מתמטיקה, אופטיקה ועיצוב פנים. תכנון תאורה הוא שילוב של מדע ואמנות. בהיבט המדעי הוא עוסק בכמות האור הנדרשת, באיכותו ובהיבט האמנותי - העיצוב - הוא יוצר אווירה נוחה ונעימה לאדם. האור מניע את יכולות העבודה שלנו ומשכלל אותן, משפר את יכולת הריכוז ומשפיע על הבטיחות.

לא ניתן לבצע תכנון תאורה טוב ללא התייחסות לחיסכון באנרגיה ולבטיחות. מיתקן תאורה שתוכנן נכון משלב בתוכו תאורת חירום ויהיה נוח להפעלה ולתחזוקה. התאורה משלבת את הארגונומיה - תחום העוסק בארגון עמדות העבודה. יש חשיבות גדולה מאוד לנוחות הראייה של האנשים, ליעילות שבה הם מבצעים את הפעילויות הנדרשות מהם ולבטיחותם. תאורה מהווה בסיס חשוב לכל תחומי העשייה.

לתאורה שאיננה מתוכננת נכון יש השפעה רבה על טעויות אנוש. היא עלולה להוביל לעייפות כללית, פיזית ונפשית. בתנאי תאורה שאינם מתאימים לצורכי המקום עלולים להיגרם נזקים ולהיווצר סיכונים עקיפים. לפעמים היא גם עלולה להוות סיכון ישיר לבטיחות, כפי שיפורט בהמשך.

תאורה נחשבת לאחד הסיכונים ה"בלתי נראים". לפעמים אין תלונות ישירות על תאורה גרועה אלא רק טענות כלליות על עייפות, כאבי ראש וקשיים בריכוז. ישנם אנשים שיתגברו על הקושי ללא שום תופעות לוואי, ולעומתם אחרים שיחוו עייפות, כאב או תופעות נוספות אחרות הדומות לאלה המאפיינות את תסמונת הבניין החולה (SBS).

פרט למקרים קיצוניים, כמו כניסה למקום חשוך או למגרש חנייה המוצף באורו של זרקור מסנוור, אנחנו לא חושבים בכלל על ההשלכות שיש לתאורה. בדרך כלל, ללא היכרות מוקדמת עם תחום המאור אין אנו נותנים את הדעת ל"אי-הנוחות הראייתית" או לבעיות של תאורה. חוסר המודעות להיבטי התאורה מקשה על זיהוי בעיות ועל הגדרת המקור לקשיים בראייה.

נושא התאורה ניתן לסיווג בחלוקות שונות, כגון: תאורה דקורטיבית, תאורה פונקציונלית, תאורת פנים, תאורת חוץ וכו'. בחוברת זו אנו מכוונים ל"תאורת פנים חשמלית, פונקציונלית, בטיחותית וטובה מהיבטי הגיהות".

תאורת פנים פונקציונלית מספקת את צורכי האנשים השוהים או עובדים בתוך מבנים. היא משלבת תאורה חשמלית ותאורה טבעית שיתאימו לצורכי האנשים ולעבודה שהם מבצעים במקום. להבדיל מתאורה דקורטיבית המיועדת בעיקר לעיצוב החלל ולהשלמת האווירה - תאורה פונקציונלית מגדירה מראש את התפקיד של המערכת וקובעת את עוצמות ההארה בהתאם לסוג הפעילות שאותה מבצעים במקום. התאורה הפונקציונלית אמורה גם להשתלב היטב בחלל שבו היא מותקנת.



הראייה

מערכת הראייה שלנו היא מערכת משוכללת הכוללת רכיבים רבים (הסבר מפורט בפרק שני: מבנה העין): העין קולטת מידע חזותי, מתרגמת ומעבירה אותו באמצעות מערכת חיישנים ועצבים למוח.

היכולת "לראות" תלויה בגורמים רבים. ביניהם:

- זמן התמקדות המבט על חפץ - קשה להבחין בחפצים הנעים במהירות;
- גודל החפץ - קשה לראות חפצים קטנים מאוד;
- השתקפויות והחזרי אור רבים מדי מקשים על ראיית פריטים ופרטים;
- הניגודיות (קונטרסט) בין הפריט לסביבתו המיידית (הרקע). ניגודיות חלשה מדי מקשה על הבחנה בפריט בתוך הרקע שלו.

בעין ישנה מערכת סינון לקרינה הנכנסת, והיא שונה מאדם לאדם. כושר הסינון נחלש עם הגיל וגם בהשפעת תנאי סביבה לא נאותים לראייה.

תאורה נכונה

לתאורה טובה - טבעית או חשמלית - תפקיד חשוב בשמירה על בריאותו של האדם ושלמו. תאורה טובה עוזרת לנו להבחין בסכנות ובמכשולים, מפחיתה את התעייפות העיניים ואת אי-הנוחות הקשורה בהתעייפות הגוף. אנחנו שואפים ליצור סביבת עבודה שבה ניתן לראות בבירור את המכשולים והסיכונים, ולהבחין בקלות ובנוחות בכל הפרטים הרלוונטיים לעבודה. כמובן, רצוי שכל ה"מיטרדים", כגון סינוור או בוהק, יהיו קטנים ככל האפשר.

**התנהגות בטיחותית ובטוחה תלויה במידה רבה בזיהוי מהיר של הסיכונים:
ככל שרואים טוב יותר - ניתן לזהות אותם מהר יותר**

סוג התאורה והעוצמה תלויים בעיקר ב-2 גורמים:

- סוג העבודה המתבצעת;
- הסכנות והמיכשולים הנלווים.

תאורה נכונה מקלה על ביצוע המטלות בעבודה, במפעל ובמשרד. תאורה מתאימה, ללא בוהק, סינוור או צללים יכולה לצמצם את מספר המקרים של התעייפות העיניים ושל כאבי ראש. התאורה מבליטה את פעולתן של המכונות ואת סיכוני הבטיחות השונים במקום העבודה. היא גם מצמצמת את הסיכון לתאונות ולפציעות כתוצאה מ"עיוורון רגעי" הנוצר כאשר העיניים צריכות להסתגל במהירות לסביבה חדשה: מוארת יותר או אפלה יותר.

תאורה נכונה היא הארה מתאימה של מישטח העבודה: שולחן, מדפי מחסן, מדרגות, מעברים וכו'. היא יוצרת סביבת עבודה נוחה ונעימה ומשפרת את יחסם של העובדים לתחנת העבודה.

תאורה נכונה משפיעה ועוזרת בכל התחומים:

- הגברת פיריון העבודה ויכולת הריכוז של העובדים;
- הקטנת כמות הטעויות והפסילות בתהליך העבודה;



- שיפור התקשורת בין אנשים;
 - הפחתת מספר ההיעדרות מהעבודה (הפחתת מספר תאונות עבודה ושמירה על בריאות העובדים);
 - צמצום עלויות: נדרשת פחות אנרגיה לתאורה יעילה ולכן - גם שימוש מופחת במערכות מיזוג האוויר;
 - שיפור הבטיחות והביטחון במקום.
- וזוהי רשימה חלקית בלבד!

מה הופך תאורה ל"נכונה":

- בנוסף לעוצמת הארה מתאימה המספקת את כמות האור הנדרשת, ניתן להבחין במספר גורמים נוספים הקשורים לאיכויות של האור ושל מיתקן התאורה:
- **אחידות ההארה:** פיזור אור מתאים בחלל המואר. ממוצע ערכים נכון, העומד בדרישות התקן, לא מבטיח פיזור אחיד (או מתאים)¹. בחלל המואר יכולים להישאר אזורים ("חורים") לא מוארים מספיק או מוארים יותר מדי;
 - **כיוון ההארה:** ללא הצללות. צללים פוגעים ביכולת לראות בבירור;
 - **סינוור ובהיקות:** מניעת התופעות, אשר עלולות להקשות על הראייה;
 - **העברת צבעים נכונה:** יש חשיבות רבה ל"איך" אנחנו מזהים את הצבעים ואת הגוונים;
 - **חסכון באנרגיה;**
 - **מניעת "זיהום אור"** (Light pollution): זיהום אורי הנגרם בעקבות שימוש לא זהיר באור, המכוון לא נכון או בעוצמה גבוהה מדי (ראו בהמשך: תאורה לקויה).
 - **איכות הרכיבים:** תכנון נכון של רכיבים המשפיעים על הבטיחות ועל תחזוקה נוחה;
 - **נגישות:** אפשרות להגיע בקלות למיתקן התאורה לצורך החלפת נורות וגופי תאורה, ניקוי או תיקונים.

תאורה לקויה

תאורה לקויה יכולה ליצור סיכוני בטיחות: הערכה שגויה של מיקום, צורה או מהירות תנועה של עצם עלולה לגרום לתאונות ולפגיעות. תאורה לקויה יכולה להשפיע על איכות העבודה, במיוחד במצבים שבהם נדרש דיוק, וגם על התפוקה הכללית. תאורה לקויה עלולה להוות סיכון לבריאות: אור רב מדי או מועט מדי גורמים למאמץ מיותר של העיניים, אשר עלול לגרום לאי-נוחות בעיניים (צריבה וכד') ולכאבי ראש.

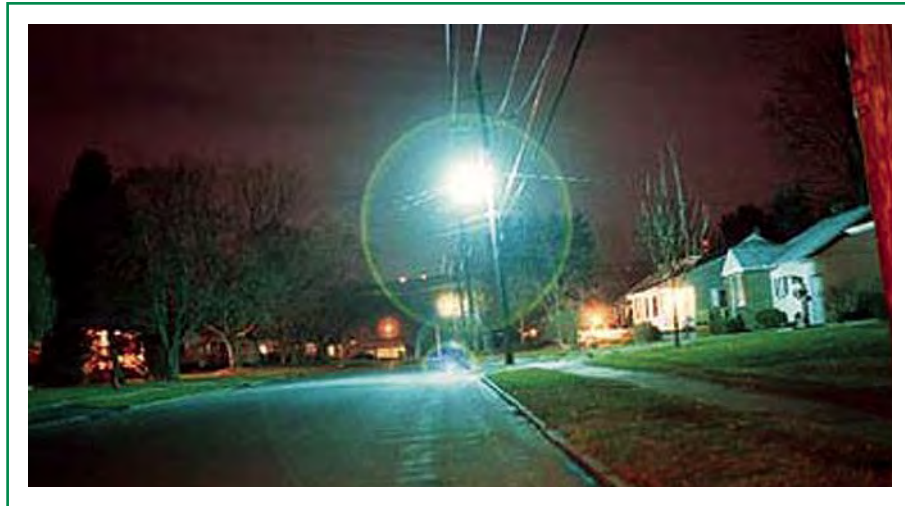
תאורה לקויה תתקיים במספר מקרים, לדוגמה:

- **תאורה לא מספיקה:** כאשר אין מספיק אור קשה להבחין בפרטים שאותם נדרש לראות. חוסר באור עלול לגרום למאמץ יתר של השרירים האחראים להסתגלות העין לתנאי הראות;
- **עוצמת הארה גבוהה מדי:** גם כאן עלול להיווצר מאמץ יתר של שרירי העין ועומס על כל מערכת הראייה;

1. הסבר מפורט על מושגי היסוד מובא בפרק השני: יסודות תורת המאור. ניתן להיעזר גם במילון המושגים (נספח ב' של הספר).

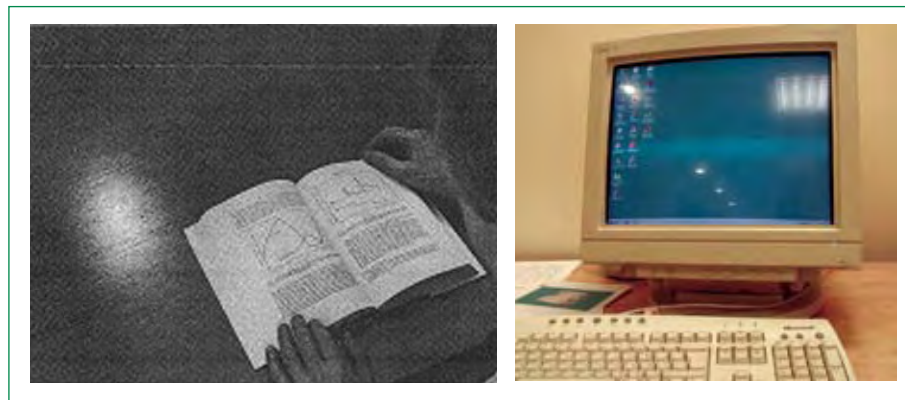


- **סינוור או בוהק:** תופעות המתרחשות כאשר חלק אחד של שדה הראייה מואר בהרבה יותר מהחלק האחר. ישנם סוגים שונים של סינוור. חלקם מפריע יותר, חלקם פחות. "הבוזקי אור" עלולים להסתיר את מה שמעוניינים לראות. גם כאן נוצר קושי להבחין בפרטים. קיימות מיספר רמות של סינוור:
 - א. סינוור מוחזר (Reflected glare):** נוצר בהחזרת אור ממישטחים מבריקים הנמצאים בקירבה או בסביבת האובייקט שעליו צופים;
 - ב. סינוור מכשיל (Disability glare):** סינוור המפחית באופן ניכר את כושר הראייה התקין, הרלוונטי לבטיחות. לדוגמה: נהיגה בלילה מול רכב עם אורות גבוהים, עבודה במקום שבו גופי התאורה מסנוורים (**איור 1**).



איור 1: סינוור מכשיל הנובע מתכונותיו של גוף התאורה

- סינוור מכשיל עלול להיות מסוכן מאוד כאשר הוא מגיע ישירות מגוף תאורה וגם כשהוא נגרם ע"י השתקפות ומגיע לעין בצורה עקיפה;
- ג. סינוור מטריד (Discomfort glare):** מצב שבו העין מוטרדת מעוצמת ההארה ונגרמת התעייפות מצטברת (**איור 2**);



איור 2: השתקפויות וסינוור מטריד

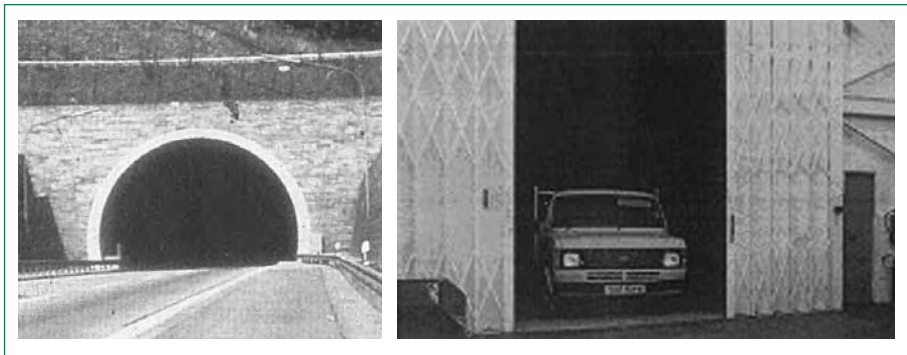


- **ניגודיות (contrast)** לא מתאימה: יהיה קושי להבחין בפרטים בתוך הרקע;
- **פיזור לקוי של האור:** הארה לא אחידה של מישטחי העבודה והסביבה הקרובה והבדלים בעוצמות ההארה בין האזורים השונים בשדה הראייה עלולים לגרום להתעייפות מערכת הראייה. באזורים היותר חשוכים יהיה קשה ואפילו בלתי אפשרי להבחין בפרטים שונים (**איור 3**);



איור 3 : אזור מוצל מקשה על ההתמצאות ועל הקריאה

- **חוסר איזון בעוצמות הארה:** מעבר מאזורים מוארים לאזורים חשוכים ולהיפך גורמים ל"עיוורון רגעי" - מצב הנוצר כאשר העיניים צריכות להסתגל במהירות לסביבה חדשה, מוארת יותר או אפלה יותר. במצב של "עיוורון רגעי", העין איננה מסוגלת להבחין בפרטים בפרק הזמן הקצר של ההסתגלות. לדוגמה: נהג היוצא עם רכבו ממחסן חשוך יחסית החוצה, לאור יום מלא, יסתנוור - והוא עלול שלא להבחין באדם החוצה את הדרך. או נהג הנכנס בשעות היום, מאור מלא למנהרה חשוכה או מוארת באופן לא נכון (**איור 4**).



איור 4: מעברים בין אזורים מוארים לחשוכים

- **הבהוב ואפקט סטרובוסקופי בנורות פריקה** (פירוט בפרק השלישי: נורות).
- **תאורה הגורמת לזיהום אורי (light pollution):** תאורת-חוץ היא כיום חלק הכרחי ובלתי נפרד מחיינו. הערים מוארות כדי להעניק ביטחון ובטיחות לתושבים, כדי להבליט יכולת כלכלית וכמובן - למשיכת תשומת הלב ולסימון מקומם של אתרים. תוצר לוואי של תאורת החוץ הוא זיהום אור הנגרם ע"י תאורת חוץ לא מתאימה ומיותרת, כולל תופעות כמו שמים בוהקים, סינוור מיותר והארת מישטחים שלא לצורך. על פי נתוני ארגון "שמים חשוכים" (Dark Sky Association, ארה"ב) - כ-30% מהאנרגיה המושקעת בהארת הערים הגדולות מתבזבזת על "זיהום אורי".



בנוסף לבזבוז אנרגיה נפגעת גם האקולוגיה. לדוגמה: שינויים במסלולי נדידת ציפורים, הפרעה לתצפיותיהם של אסטרונומים בכוכבים ועוד. ואכן, בשנת 1992, הכריז ארגון 'UNESCO' על "שמיים עם כוכבים" כעל נכס עולמי שיש לשמר;

בנוסף לקושי גובר בביצוע העבודה - תאורה לקויה עלולה להוביל לעייפות של הראייה ובתנאים מסוימים גם עלול להיגרם נזק לבריאות. השפעתה של תאורה לקויה יכולה להתבטא באופנים שונים. אחד הסימנים לכך שהתאורה היא לקויה הוא הצורך להתקרב לאובייקט שאותו מעוניינים לראות, או נסיון לשנות את זווית הראייה לכיוון אותו אובייקט.

הסימנים השכיחים לעייפות הראייה הם, לדוגמה:

- גירוי בעיניים, אדמומיות, עייפות לא סבירה של מערכת הראייה;
- ירידה בכושר הראייה, ראייה "כפולה", טשטוש הראייה;
- סחרחורות, כאבי ראש וכאבי עיניים, תחושת אי-נוחות ועלייה במתח הנפשי;
- התפתחות בעיות של מערכות שריר-שלד עקב תנוחות מאולצות, בניסיון לקרוא או לעבוד בתנאים של תאורה לא מתאימה;
- תאונות עבודה עקב תנאי ראות לקויים או אי-אבחנה בפרטים ע"י העובד;
- ירידה ביעילות, פגיעה בריכוז ובפריון העבודה, ריבוי פגמים בייצור.

והרשימה עוד ארוכה מאוד.

יש לזכור כי קיימים גורמים רבים נוספים, אשר עלולים להוביל לבעיות דומות במערכת הראייה: מאמץ גדול מדי של העין בגלל מרחק קבוע, קרוב מדי ולאורך זמן בין העין לפריט; יובש בעיניים בסביבה של לחות נמוכה וקצב מצמוצים איטי מדי; בעיות ראייה לא מטופלות; סביבת עבודה חד-גונית - היעדר גיוון בצבעים בסביבת העבודה. כל אלה ועוד עלולים ליצור פגיעות דומות בבריאות.

תאורה כגורם בטיחותי

עם כל יתרונותיה - התאורה עלולה להוות גם סיכון בטיחותי. ישנם סיכונים בטיחות הנובעים ישירות מתאורה לקויה וכאלה הנגרמים בעקיפין.

לקבוצה הראשונה של הסיכונים המיידיים ניתן ליחס את המקרים הבאים:

• **בעיית האפקט הסטרובוסקופי**, המתרחש בעת שימוש בנורות פריקה - התופעה שבה עצם מסתובב נראה ניח. התוצאה עלולה להיות מסוכנת מאוד. לדוגמה: בתעשייה שבה משתמשים במחרטות.

• **חוסר יכולת לזהות פריטים**. תופעה המתרחשת כאשר עוצמות ההארה נמוכות מדי או כשהניגודיות נמוכה מדי. לדוגמה: אנחנו עלולים לא לראות אדם החוצה את הכביש; מצב דומה יקרה כאשר מסתנוורים מפנס המאיר היישר לתוך העין או כאשר עוברים ממקום מואר למקום חשוך ולהיפך.

הקבוצה השנייה - סיכונים בטיחותיים הנובעים בעקיפין מהתאורה - כוללת סיכונים רבים יותר. חלקם קשור למבנה גופי התאורה ולשימוש בחלקים ובציוד לא תקינים, אשר עלולים להביא להתחממות החלקים ולהתלקחות. עבודה לא זהירה ושלא בהתאם לנוהלי הטיפול במערכת החשמל של גופי התאורה עלולה להביא להתחשמלות. בעיה נוספת הנגרמת בעקיפין היא הנורות הפלואורסצנטיות הנפוצות המכילות אדי כספית - הרעילים במגע ישיר ובשאיפה.

ישנם מקרים נוספים שאליהם נתייחס בהמשך.



תאונות ותקלות (דוגמאות)

בעיות רבות עלולות להיגרם עקב תאורה לקויה ולא מתאימה ועקב שימוש בציוד לא תקין. חלק מהתקלות עלו בכסף רב וחלקן אף גרמו לאובדן חיי אדם. נתאר כאן באופן כללי תקלות שונות, שכבר קרו במקומות שונים (בארץ ובח"ל), שמקורן בתאורה לקויה מסיבות שונות: איכות ירודה של ציוד התאורה; התקנה או תחזוקה לא מתאימים; תאורה לא טובה וכו'.

- סינוור או הבדלים בעוצמות הארה בין מישטח פריקה ליד מחסן ציוד לבין המחסן עצמו גרמו לאדם שיצא מהמחסן החוצה להסתנוור ולחות "עיוורון רגעי". התופעה גם עלולה לגרום לתאונה קשה, לדוגמה, בנהיגה - כאשר לא מבחינים בהולך רגל העובר במקום או בקצות מישטח ההעמסה (רמפה).
- התלקחות. מהווה בעיה בטיחותית חמורה. חיווט לא מתאים, איכות ציוד ירודה, מבנה לא נכון וכו' יגרמו להתחממות ואף להתלקחות. גופי התאורה ומקורות האור חייבים להתאים לדרישות תקנים מתאימים, במיוחד לתקן ישראלי: ת"י 20.
- חישמול. בעיית בטיחות מהמדרגה הראשונה אשר עלולה להיגרם משימוש בציוד תאורה לא תקין או לא תיקני. גם עבודה שלא בהתאם לנהלים בטיפול במיתקני תאורה חשמלית (לדוגמה: ביצוע עבודה תחת מתח) עלולה לגרום לפגיעה מחישמול.
- החלפה או תיקון של ציוד תאורה מתבצעים במקרים רבים בגובה. העבודה חייבת להיעשות בהתאם לנהלים מתאימים (עבודה בגובה). יש להיערך לביצוע בטיחותי ונוח של התחזוקה כבר בשלבי תכנון המיתקן. לעבודה בגובה נדרשים סולם או מיתקן הרמה מתאימים. אין למקם גופי תאורה במקומות שהגישה אליהם בלתי אפשרית או מסכנת חיי אדם. לדוגמה: קשה מאוד להגיע לגופי תאורה הממוקמים מעל לדרגנועים או מעל לבריכות שחיה.
- שימוש בנורות לא תקניות גרם להתנפצות נורות ונפילה של שברי זכוכית.
- עוצמת הארה לא מספיקה גרמה לזיהוי מוטעה של השטח ולתאונות. יש חשיבות רבה לעוצמת הארה מתאימה בכבישים עירוניים ובין עירוניים, במיוחד בצמתים ובחניונים. גם במשרד, במחסנים או בחדרי מדרגות נדרשת תאורה שתאפשר להבחין במכשולים.
- לעוצמת הארה לא מספיקה יש השלכות רבות גם בתחום הפסיכולוגי: מחקרים רבים קושרים את עוצמות ההארה לפעילות הורמונלית של המערכות השונות בגוף. עוצמת ההארה משפיעה על מצב הרוח של האנשים ועלולה גם לגרום למצבי דיכאון בדרגות שונות. ישנן מחלות מסוימות, כדוגמת SAD² המטופלות כיום בעזרת חשיפה מוגברת לאור בעוצמות שונות.
- הבחנה לא מתאימה בצבע (הסבר מפורט בפרק השני: יסודות תורת המאור).
- טעות בזיהוי צבעו של מזון מקולקל במפעל למזון עלולה לגרום להרעלה.
- גרימת תקלה חמורה במיתקני חשמל, כאשר מבוצע חיווט על פי זיהוי מוטעה של הצבעים.

2. SAD (Seasonal Affective Disorder) היא מחלה נפוצה המתבטאת בהופעת סימני דיכאון בחודשי החורף. זוהי הפרעה במצבי רוח שאחת מסיבותיה קשורה לעוצמות ההארה הנמוכות והימים הקצרים יחסית בתקופות החורף, המובילות לייצור מוגבר של הורמון המלטונין (אשר נוצר בתנאי חושך). בטיפול במחלה נעזרים בחשיפה מוגברת של המטופל לעוצמות הארה גבוהות



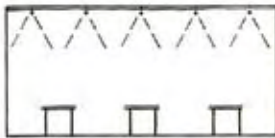
- טעות בשימוש בצבעים בעבודות דפוס - גורם לנזקים כלכליים וגם לסיכון נוסף: זיהוי שגוי של צבעי אריזה גרם לקונים לבחור בצבע דפוס לא מתאים ומסוכן בשימוש.
- תאורה נכונה ברחובות ובכבישים יכולה להפחית מקרי תאונות ואלמיות (ונדליזם) ובכך לחסוך עוגמת נפש, נזקים לבריאות וסכומי כסף גדולים ובמקרים קיצוניים - להציל חיים. מחקרים שונים קושרים את מספר מקרי הפשיעה ברחובות לעוצמת ההארה: ברחובות מוארים היטב - מספר מקרי הפשיעה והאלמיות נמוך יותר.
- תאורת חירום תקינה היא גורם בטיחותי חשוב מאוד: מיקום נכון של גופי תאורה בעוצמה המתאימה הן תנאי הכרחי. לדוגמה: עשן שהתפתח בעת שריפה כיסה את גופי תאורת החירום, והנמלטים לא הצליחו לראות את נתיב המילוט.

דרישות לתכנון תאורה

הנדסת המאור של היום היא מקצוע רב-תחומי, ומתבססת על תחומים שונים ומגוונים: מתמטיקה, פיזיקה, אופטיקה, ארגונומיה, פיזיולוגיה ועיצוב. בתכנון מיתקן תאורה נלקחים בחשבון היבטי בטיחות, חיבור למערכת החשמל ותאורת חירום. לא ניתן לפסוח על בדיקה כלכלית ותכנון תחזוקת המיתקן בעתיד. לא ניתן להגדיר מהו מיתקן תאורה "נכון". ככל פתרון הנדסי - מיתקן התאורה יכול להיות מתוכנן ומבוצע בשיטות רבות: תאורה מקומית, תאורה כללית או שילוב ביניהן, תאורה ישירה או תאורה עקיפה, גופי תאורה שקועים בתקרה או תלויים במרחק ממנה. מיגוון אפשרויות לעניין זה ניתן לראות ב**איור 5**. כל אפשרות מהווה דוגמה לפיתרון אפשרי עבור חלל נתון. אלה הם רק חלק קטן מהפתרונות האפשריים. גם האילוצים המנחים את המתכננים בבחירת פתרון כזה או אחר יכולים להיות שונים: סיבות כלכליות, שיקולי עיצוב, היבטים קונסטרוקטיביים ועוד. קיימים פרמטרים שונים לקביעת איכותו של מיתקן התאורה. חלקם מתייחסים לכמות האור ואחרים מגדירים את איכותו. המושג "כמות האור" מתייחס לשאלה "כמה אור אנחנו

צריכים למטרה מסוימת? לכאורה זהו נתון פשוט ומוגדר היטב. ישנם תקנים והמלצות המגדירים את העוצמות הנדרשות (ראו פרק חמישי - תכנון תאורה). לאיכות האור יש חשיבות רבה כי בלעדיה גם כמות אור מתאימה ככל שתהיה לא תיצור תנאי ראייה טובים ותחושת נוחות.

א: גופים שקועים בתקרה



ב: גופים תלויים להארת התקרה ולהארה ישירה



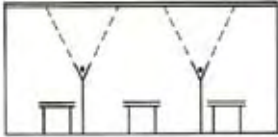
איור 5: פתרונות תאורה אפשריים



ג: גופים תלויים
להארה ישירה



ד: גופים על עמודים
להארת התקרה,
תאורה בלתי ישירה



ה: תאורה משולבת,
כללית ומקומית



גורמים רבים משפיעים על איכות האור, וביניהם:

• **אחידות ההארה:**

ממוצע המתאים לדרישות התקן לא מבטיח פיזור אחיד (או טוב) בחלל המואר. יכולים להיווצר "חורים" לא מוארים או מוארים מדי. כך, לדוגמה, שולחן עבודה מואר חזק, הממוקם בחדר חשוך יהיה לא נוח לעבודה ואף לא בריא לעיניים (איור 6)

איור 5: פתרונות תאורה אפשריים



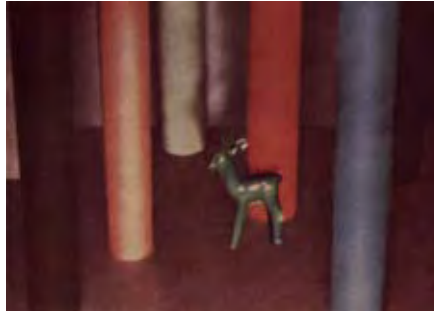
איור 6: תאורה לא אחידה: עוצמת אור גדולה וחזקה על מישטח עבודה וחלשה מסביבו

• **כיוון ההארה:** לפעמים נדרש להאיר בצורה אחידה ומפוזרת את החלל כולו ולהימנע מהצללות, לפעמים נדרש ליצור צל, כדי ליצור תחושת עומק (איור 7)





ב: תאורה מפוזרת אחידה



א: תאורה מכוונת

איור 7: דוגמה להצללה

- הגבלת סינוור והשתקפויות: יש להימנע מסינוור ישיר ומסינוור עקיף (איור 8). מאוד לא נוח לעבוד מול צג שבו משתקפות מנורות או לקרוא במצב שבו הדף בוהק ומסנוור (איור 9).



ב: סינוור עקיף

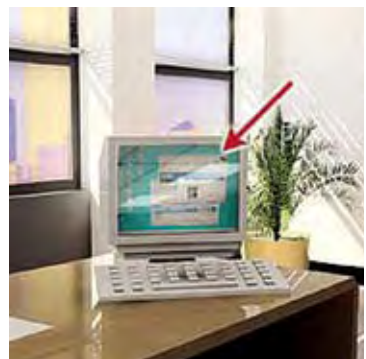


א: סינוור ישיר

איור 8: דוגמה לסינוור



ב: דף בוהק



א: צג עם השתקפות

איור 9: דוגמאות להשתקפות ובוהק

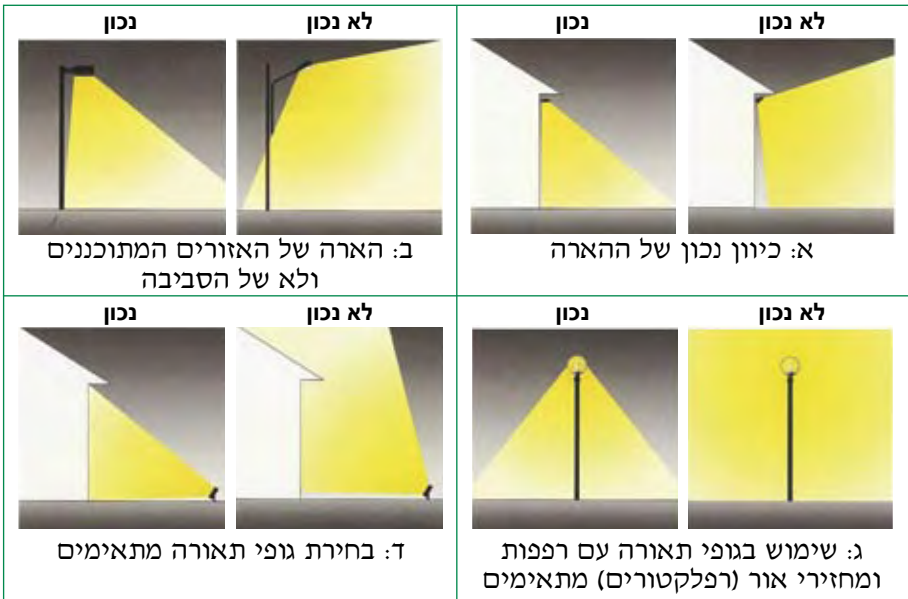


- **העברת צבעים נכונה:** חפצים ואנשים יכולים להיראות שונים לחלוטין בסוגים שונים של תאורה. דוגמה שכיחה היא רכישת בגד שנראה בבית שונה לחלוטין מזה שמדדנו בחנות (**איור 10**).



איור 10: דוגמה לשונות בתוצאה עקב הארה באמצעות מקורות אור שונים

- **חסכון באנרגיה:** יש חשיבות רבה לשימוש במקורות אור יעילים וחסכוניים.
- **מניעת זיהום אורי (Light pollution):** קל לצמצם את תופעת "הזיהום האורי" ע"י שמירה על מספר כללים בסיסיים למניעה ולצמצום של התופעה (**איור 11**):
 - להאיר רק את מה שצריך, מתי שצריך וכמה שצריך;
 - להאיר בעוצמת ההארה המתאימה לתקנים הרלוונטיים;
 - להשתמש בנורות יעילות ובגופי תאורה יעילים המיועדים למניעת סינוור;
 - להשתמש בגופי תאורה שיאירו רק את האזור שבו נדרשת ההארה;
 - לכוון נכון את גופי התאורה.



איור 11: בחירה נכונה של גופי תאורה למניעת זיהום אורי

- **תחזוקה נכונה של ציוד התאורה:** חשוב שתהיה גישה נוחה לטיפול בנורות וגופי תאורה: החלפה, ניקוי ותיקונים שונים. את המחשבה לכך יש להקדיש כבר בשלבי התכנון ולהקפיד על יישום התכנון במהלך ההתקנה. (פירוט בפרק השלישי).
- **איכות הרכיבים ולתכנון נכון של הרכיבים.** לנושאים אלה יש חשיבות רבה מאוד. שימוש בחומרים ובנורות באיכות ירודה יוביל לבזבז של אנרגיה, להחלפה בתדירות גבוהה של נורות ואף עלול לגרום לבעיות בטיחות.

פרק שני

יסודות תורת המאור

בפרק זה נעסוק ביסודות תורת המאור, בצורה בסיסית אך הכרחית להבנת הדרכים ליישום מיתקן תאורה "נכון".

אנרגיית האור ומקורותיה

ניתן לתאר את האור בגישה של פיזיקה קלאסית, שעל פיה האור הוא קרינה אלקטרומגנטית ("אנרגיית קרינה") בתחום אורכי הגל שעין האדם רגישה להם. ישנן מספר שיטות להפקת "האור הנראה" (שהוא אך חלק קטן ממיגוון קשת הקרינה האלקטרומגנטית = ספקטרום הקרינה). השיטות העיקריות הן:

- **ליבון מתכות:** חימום חומר לטמפרטורה שבה הוא פולט אנרגיה בתחום הנראה (לדוגמה: נורות ליבון ונורות הלוגן).
- **יוניזציה ע"י העברת זרם חשמלי:** פריקה של גז (לדוגמה: נורות פריקה - כספית, נתרן או פלואורסצנט).

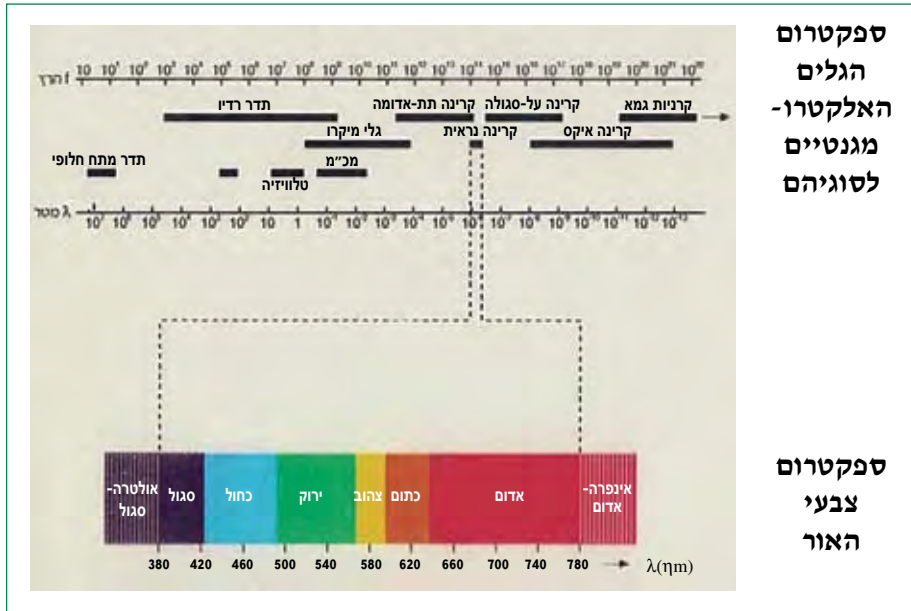
ספקטרום הקרינה ורגישות העין

ספקטרום הקרינה המעניין אותנו הוא של האור הנראה. כלומר: של הקרינה היוצרת בעין את תחושת הראייה. גבולות הספקטרום של האור הנראה אינם מוגדרים היטב, מכיוון שהם תלויים ברגישות העין, השונה מאדם לאדם. מוסכם לקבוע את הגבולות האלה מ-380nm עד 780nm.

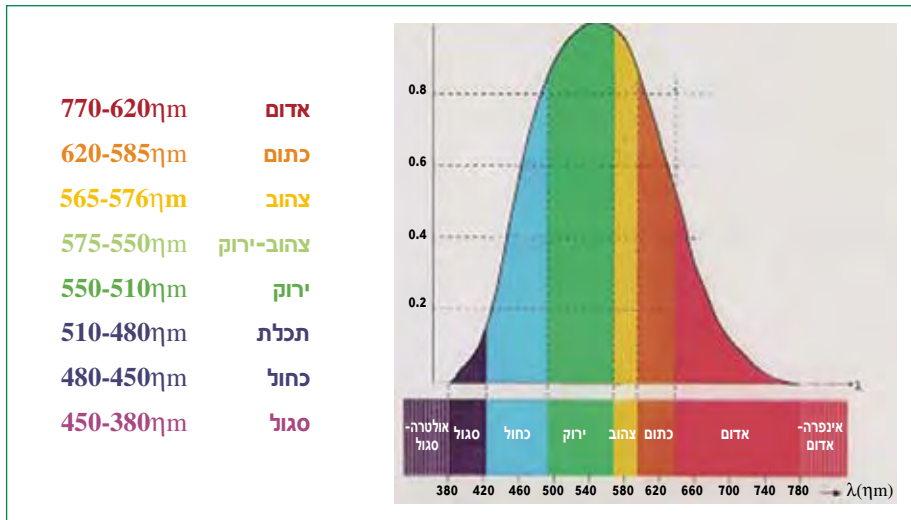
לכל אורך גל יש צבע נראה אופייני לו. לדוגמה: קרינה בעלת אורך גל של 700nm יוצרת תחושה של צבע אדום. **באיור 12**, מופיע ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית והרחבתו בתחום הנראה.

כאשר דנים בתאורה ובתחושות שלנו בעקבותיה, חייבים להתחשב ברגישות היחסית של העין. **באיור 13** מוצגת עקומת רגישות העין.





איור 12: ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית וספקטרום צבעי האור

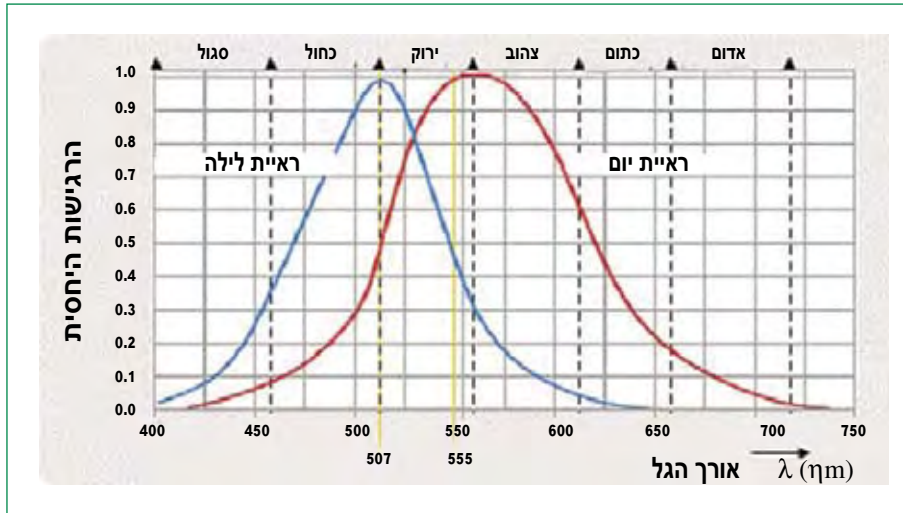


איור 13: עקומת הרגישות היחסית של העין

רגישות העין מוגדרת כיחס בין עוצמת התחושה בעין לאורך גל מסוים, לבין עוצמת תחושת העין לגל ירוק. הרגישות יורדת ל-0 בשני קצות הספקטרום - האולטרה-סגול והאינפרה-אדום. כך לדוגמה, העין רגישה פי 7 (!) לאור ירוק מאשר לאור אדום. אולם, אם משתמשים רק באור ירוק - ייראו כל העצמים המוארים "ירקרקים" ולא כפי שאנו רגילים לראות אותם.

רגישות העין בראיית לילה (הנקראת "ראייה סקוטופית") שונה מזו של ראיית יום (הנקראת "פוטופית") ולכן עקומת הרגישות (**איור 14**) מוסטת מעט לעבר אורכי הגל הקצרים עבור ראיית לילה.

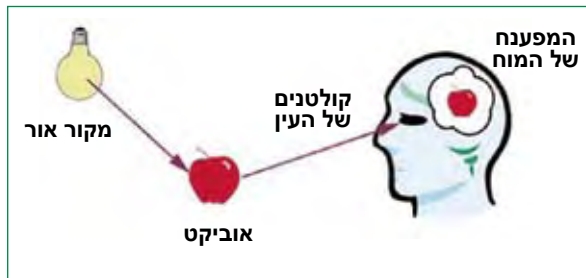




איור 14: עקומת הרגישות היחסית של העין לראיית יום ולראיית לילה

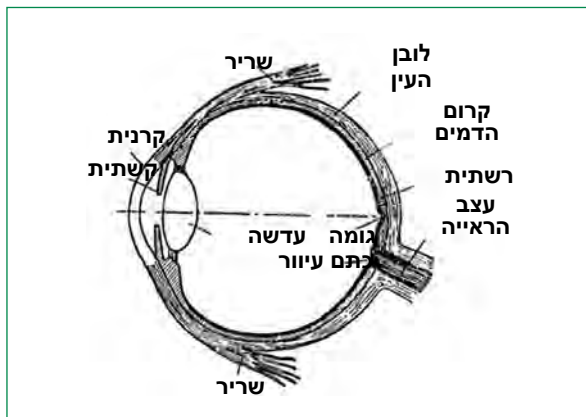
מבנה העין - כיצד אנו רואים

מערכת הראייה שלנו היא מערכת מורכבת, המחברת בין העין הקולטת למוח, שבו מתפרשת התמונה הנקלטת. כדי לראות אנו זקוקים לאובייקט שאותו אנו רוצים



איור 15: תהליך הראייה

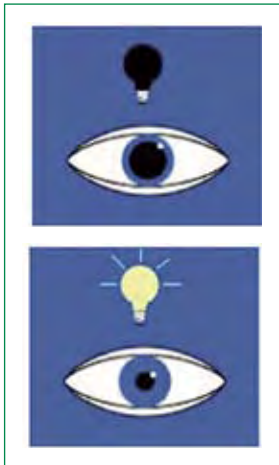
לראות, לאמצעי קליטה (העין), לאור ולמפענח (המוח). קרני האור המוחזרות מהאובייקט (אנו רואים רק אור מוחזר) חודרות לעין ומדרבנות יצירת תגובה כימית בקולטנים. על רשתית העין ליצור תגובה כימית ולהעביר אותה באמצעות אותות חשמליים למוח - שם מתקבלת תחושת הראייה (איור 15).



איור 16: מבנה עקרוני של העין

האור חודר לתוך העין דרך הקרנית והעדשה ומגיע לרשתית. איור 16 מתאר את המבנה הסכמטי של העין.

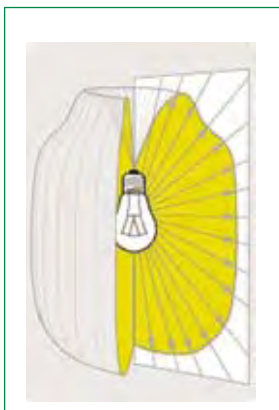




איור 18: שינוי קוטר האישון בהתאם לעוצמת האור הנופלת עליו



איור 19: רשתית העין (מבנה עקרוני)



איור 20: שטף האור



איור 17: שינוי קוטר העדשה בהתאם למרחק מהאובייקט

בתהליך הראייה העין מאתרת ומתמקדת על האובייקט, מופעלים שרירים ומותאמים קוטר העדשה וגודל האישון. באיורים 17 ו-18 מתואר עקרון הפעולה. ככל שהעצם שאותו רואים מרוחק יותר - קוטר העדשה קטן (**איור 17**) וככל שיש יותר אור - האישון קטן (**איור 18**), על רשתית העין (**איור 19**) ממוקמים מקלונים וחרוטים, המהווים "סנסורים" המתבלים עם הגיל. הם אחראים, בין היתר, לראיית צבע ולהבדל בין ראיית אור לראיית לילה (איור 14). בראיית לילה התפקיד העיקרי הוא של המקלונים (ישנם כ-130 מליון), הממוקמים בשטח גדול יחסית ובזווית רחבה ולהם סף רגישות נמוך יחסית וממוקמים בפריפריה של העין. לעומתם, בראיית יום (הפוטופית) יהיה תפקיד עיקרי לחרוטים (מהם יש רק כ-7 מיליון) הממוקמים בזווית צרה (ממורכזים יותר) ולהם סף רגישות גבוהה יחסית.

שטף האור ונצילות מקור האור

כל מקור אור מאופיין, בנוסף להספק החשמלי בואטים שבו הוא מוזן, גם על ידי שטף האור שלו. שטף האור מוגדר ככמות האור הנפלטת ממקור אור נתון במשך שנייה אחת. היחידה המשמשת למדידת שטף האור היא לומן (lm) - לדוגמה: נורת פלואורסצנט 36W - 3200 lm. שטף האור הוא גודל סקאלרי, הנפלט לכל הכיוונים ולא דווקא לכיוון מסוים (**איור 20**).

אם נאיר מישטח לבן באמצעות שני מקורות אור הקורנים 1 וואט כל אחד: מקור אחד יהיה אור לבן והשני אור כחול - השטח שיואר באור הלבן ייראה בהיר יותר מהשטח שיואר באור הכחול. לכן, ברור שלמדידת הספק האור יש להשתמש גם במקדם הרגישות של העין.



היחס בין שטף האור של מקור אור (Φ) לבין ההספק החשמלי (P) מוגדר כ"נצילות אורית" - (η_E):

$$\eta_E = \frac{\Phi}{P}$$

יחס זה משמש להשוואה בין מקורות האור השונים. לדוגמה:

סוג הנורה וההספק P	Φ שטף [lm]	η_E נצילות [lm/w]
ליבון, 100 וואט	1400	14
הלוגן, 300 וואט	6000	20
נתרן לחץ גבוה, 150 וואט	19500	130

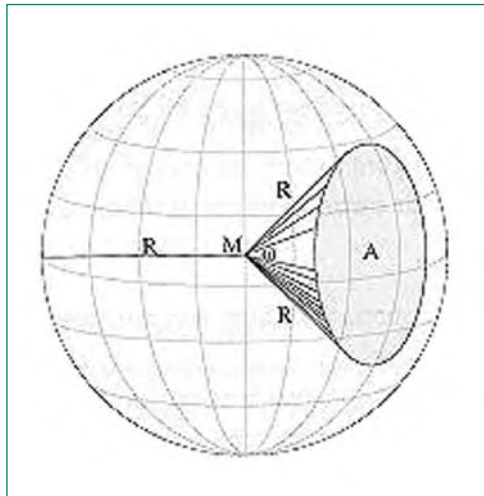
(הערכים שונים מחברה לחברה ותלויים בדגם של כל נורה).

ייתכן מצב שבו הנצילות האורית של נורה אחת, בהספק גבוה, תהיה גבוהה יותר מהנצילות של נורה מסוג זהה, בהספק נמוך יותר:

סוג הנורה וההספק P	Φ שטף [lm]	η_E נצילות [lm/w]
ליבון, 25 וואט	220	8.8
הלוגן, 100 וואט	1360	13.6

זווית מרחבית ועוצמת האור

כדי לבדוק פרמטרים נוספים, נגדיר זווית מרחבית (**איור 21**):
ניח מקור אור אידיאלי, הקורן במידה שווה לכל הכיוונים. במצב כזה כל המרחב הוא זווית מרחבית של 4π .



איור 21: זווית מרחבית

על פני כדור שמרכזו M, תסומן גיזרה כדורית, ששיטחה A. הזווית המרחבית של גיזרה A מוגדרת כיחס בין השטח A לבין ריבוע הרדיוס R והיא נמדדת ברדיאנים (steradians):

$$\omega = \frac{A}{R^2}$$

רוב מקורות האור אינם אידיאליים ולכן יש להגדיר את עוצמת האור בכיוון נתון α (I_α), או את שטף האור בכיוון מסוים כאשר: עוצמת האור (I) היא שטף אור (Φ) לסטרדיאן אחד:

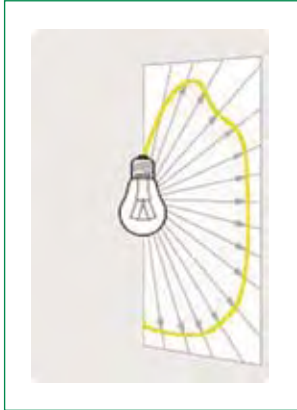
$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$



עוצמת האור I נמדדת בקנדל (candle = [cd]). היחידה נקראת בעברית "נר". ואז:

$$I_a = \frac{\partial \Phi}{\partial \omega}$$

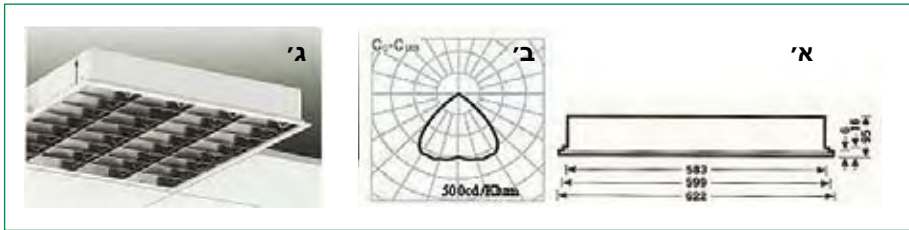
זהו היחס בין שטף האור $\partial \Phi$ העובר דרך זווית מרחבית ω , שקודקודה הוא מקור האור הנתון.



את התפלגות עוצמת האור מתארים בד"כ בעזרת עקומה פוטומטרית בקואורדינטות פולריות. עוצמת אור איננה תלויה באמצעי הקליטה אלא רק במקור האור. אם נסמן את עוצמת האור כווקטור ונחבר את קצות הווקטורים במישור מסוים, נקבל עקומה "פולרית", המייצגת פיזור אור ממקור המצוי במרכז מערכת הקואורדינאטות. זוהי עקומה פוטומטרית של מקור או גוף תאורה (איור 22).

העקום מוצג, בד"כ, ביחידות יחסיות לעוצמת הנורה שאותה ניתן להרכיב בגוף התאורה הזה [cd/Klum]. באיור 23 מוצגת דוגמת עקום פוטומטרי (ב) של גוף תאורה (ג) עם חתך רוחבי שלו (א).

איור 22: עקום פוטומטרי



איור 23: דוגמה לעקום פוטומטרי

ניתן לראות שכאשר נרכיב בגוף התאורה הזה 3 נורות פלואורסצנטיות בהספק של 18w (בעלות שטף אור של 1450 lum) נקבל:

- בזווית של 60° - עוצמת אור של 0 cd (אין בכלל קרינת אור);
- בזווית של 45° - עוצמת אור של 870 cd;
- בזווית של 0° (מתחת לגוף) - עוצמת אור של 1300 cd.

מכיוון שרוב גופי התאורה אינם סימטריים, מקובל להציג את העקומים המתאימים בחתכים שונים ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) - בהתאם לסוג גוף התאורה.

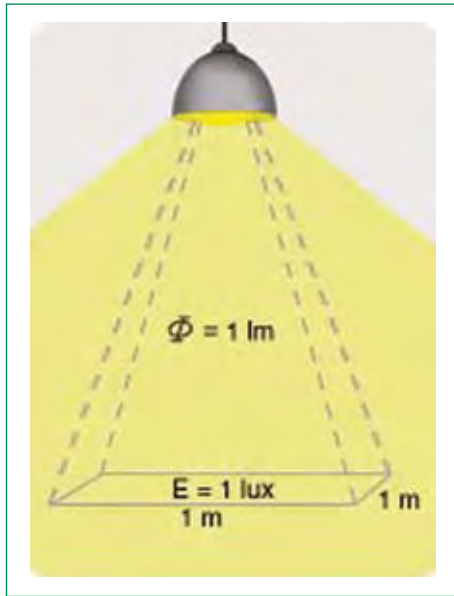
עוצמת ההארה



נתון נוסף לאפיון תאורה חשמלית הוא עוצמת ההארה (איור 24) המוגדרת כשטף אור ליחידת שטח. יחידות המדידה הן לוקס [lux].

איור 24: עוצמת ההארה ושטף האור





איור 25: עוצמת ההארה ושטף האור

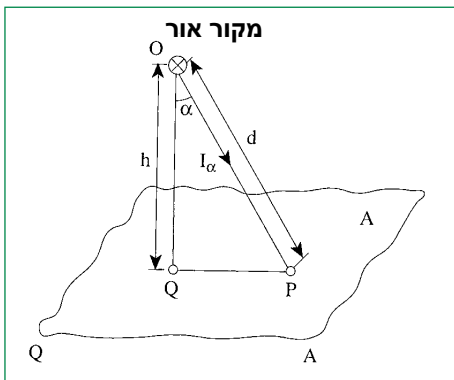
האור המוקרן מתפזר בחלל. שטף האור איננו מתפזר באופן שווה על פני המישטחים. לכן מוגדרת עוצמת הארה ממוצעת (איור 25):

$$E_{av} = \frac{\Phi}{A}$$

קיים קשר בין עוצמת ההארה (E_p) בנקודה P, ממקור אור נקודתי (O) לבין עוצמת האור (I_α) מאותו מקור, בכיוון α (איור 26).

הקשר מתואר באמצעות הנוסחה הבאה:

$$E_p = \frac{I_\alpha}{d^2} \cos\alpha = \frac{I_\alpha}{h^2} \cos^3\alpha$$



איור 26: עוצמת ההארה ועוצמת האור

כאשר מתכננים תאורה - מחשבים את עוצמות ההארה בנקודות שונות בחלל. ניתן למדוד את עוצמת ההארה בנקודה כלשהי בעזרת מכשיר מדידה הנקרא "לוקסמטר" (איור 27). הוא בנוי מתא פוטואלקטרי המייצר מתח יחסי לעוצמת ההארה הנופלת עליו.



איור 27: דגמי לוקסמטרים



בהיקות

בעזרת שטף אור, עוצמת אור ועוצמת הארה, ניתן לחשב ולדעת את צפיפות שטף האור המתקבלת על מישטח מסוים. הנתון הזה עדיין איננו מאפשר לדעת, כיצד תגיב העין לאור הזה. תגובת עיני הצופה לאור המגיע אל מישטח מסוים, תלויה בחלק המוחזר של שטף האור המגיע אליהן (איור 28).



איור 28: בהיקות האור

"בהיקות" היא צפיפות שטף האור המוקרן (ממקור אור או אור מוחזר) מהמישטח/הגוף המואר לכיוון עיני הצופה. יחידות הבהיקות הן נר למ"ר (cd/m^2).

הבהיקות תלויה גם במקדם ההחזרה של המישטח שעליו היא נמדדת. כך

לדוגמה: לנייר לבן עם מקדם החזרה של 80%, תהיה בהארה של 400 lux, בהיקות של $100 cd/m^2$; לנייר שחור מסוג זהה ובאותם התנאים תהיה בהיקות של $5 cd/m^2$ בלבד. בהיקות פוטומטרית (luminance, לומיננס) איננה תלויה בהסתגלות העין לרמת ההארה הכללית בשדה הראייה. הבהיקות הפוטומטרית היא היחס בין עוצמת האור ("נרות", candles) של מקור אור או של מישטח מחזיר אור בכיוון מסוים, לבין שטחו של המישטח שממנו מוחזר/מוקרן האור.

להקטנת הבהיקות משתמשים במפזרים (diffusers) וברפפות (louvers) ונמנעים משימוש במישטחים מבריקים. ישנם תקנים המגדירים את רמת הבהיקות המירבית המותרת במקרים שונים (כבישים, משרדים וכו'): ת"י 8995 - מאור למקומות עבודה; ת"י 1862 - מאור דרכים.

ניגודיות

ניגודיות היא היחס בין בהירות העצם לבין הרקע שלו. הנוסחה הבאה משמשת לחישוב ניגודיות (C) והתוצאה שלה היא מספר בין 0 ל-1:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{L_1}$$

כאשר:

L1 - לומיננס הרקע;

L2 - לומיננס המישטח שעליו מסתכלים.

טמפרטורת צבע ומסירת צבע

צבעם של עצמים שאנחנו רואים נקבע על ידי צבע האור המוחזר מהם. באור שמש אנו רואים אחרת מאשר לאורה של נורת פלואורסצנט. ההשלכות קיימות בכל תחום ובמיוחד בתעשיות הדפוס והאלקטרוניקה, שם יש חשיבות רבה להבחנה מדויקת בין הגוונים. אחת השיטות המקובלות בתחום המאור להגדרת צבע האור נקראת: correlated colour temperature. בשיטה זו הטמפרטורה נתונה במעלות קלווין ($^{\circ}K$). היא מהווה אמצעי להשוואה של השפעת מקורות אור שונים על התחושה שגורם גוון צבע מסוים לעין.



טמפרטורת צבע "גבוהה" מתאימה לגוונים של הלבן והכחול (התחום הקר). טמפרטורת צבע "נמוכה" יותר מתאימה לגווני האדום והכתום (התחום החם). לדוגמה:

	1,100°K	- אור נר
	5,000°K	- אור שמש בצהריים
	15,000°K	- רקיע כחול
	2,500°K	- נורת ליבון
warm white	< 3,300°K	- נורות פלואורסצנטיות:
white	5,000-3,500°K	
daylight	> 5,500°K	

ניתן להגיע לאותה טמפרטורת צבע ע"י הרכבים ספקטראליים שונים.

קיימת שיטה נוספת המקובלת יותר בתחום המאור להגדרת צבע. השיטה קובעת מקדם העברת צבע (Color Rendering Index) המסומן CRI או Ra. מקדם זה משקף את הרכב צבע מקור האור הנמדד יחסית להרכב שהוגדר מראש כסטנדרטי (נמדד בין 1 ל-100. ככל שה-CRI מתקרב ל-100 צבע המקור קרוב יותר לצבע נורת ליבון שנקבעה כמקור אידאלי. החלוקה מתקבלת בדרך הבאה:

נורות אופייניות	CRI	סימון הקבוצה	התאמת צבע
נורות פלואורסצנטיות, נורות הלוגן, נורות מטל-הלייד	100-90	1A	מעולה Very Good
פלואורסצנטיות משופרות, נורות מטל-הלייד	89-80	1B	מעולה Very Good
נורות פלואורסצנטיות T8	79-70	2A	טובה Good
נורות פלואורסצנטיות T8	69-60	2B	טובה Good
נורות כספית	59-40	3	בינונית Satisfactory
נורות נתרן	39-20	4	ירודה Poor



פרק שלישי

נורות

קיימים סוגים רבים של נורות (מקורות אור) בצורות ובעוצמות שונות. בפרק זה נסקור את מאפייני הקבוצות העיקריות של נורות המשמשות בגופי תאורה ונשווה בין מיגוון הנורות השונות.

ניתן למיין את סוגי הנורות על פי מנגנון ההפעלה שלהן. קיימים 2 סוגי הפעלה בסיסיים: ליבון ופריקה.

- **נורות ליבון:** עקרון הפעולה מבוסס על חימום תייל המוליך זרם חשמלי;
- **נורות פריקה:** עקרון הפעולה מבוסס על התפרקות חשמלית בגז הכלוא בתוך שפופרת הנורה.

ההבדלים העיקריים בין שתי הקבוצות הם אורך חיי הנורות והנצילות האורית. לצורך בחינת היתרונות והחסרונות של סוגי הנורות השונים, יש להגדיר מספר פרמטרים שעל פיהם נעשית ההשוואה:

- נצילות אורית של הנורה;
- אורך חיי הנורה;
- מקדם העברת הצבע (CRI) של הנורה (ראו בפרק הקודם);
- ציוד הכרחי להפעלה.

נצילות אורית

כל המרה של אנרגיה מלווה בהפסדים. כך, לדוגמה, נורת ליבון רגילה - רק כ-10% מהאנרגיה החשמלית המושקעת בה הופכת לאור נראה. היחס בין עוצמת האור הנפלט מהנורה לבין האנרגיה החשמלית המושקעת בהפעלתה נמדד בלומן לוואט:

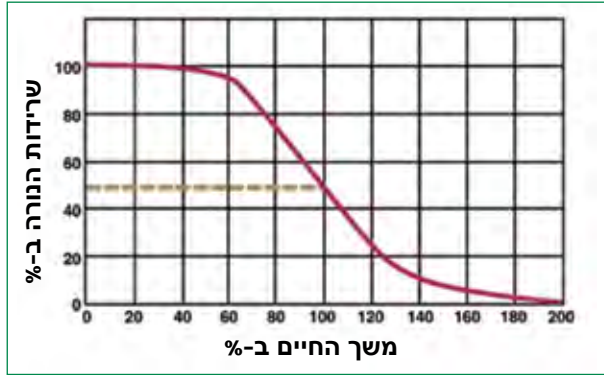
$$\left[\frac{lm}{w} \right] \text{ והוא מוגדר כנצילות האורית של הנורה.}$$

אורך חיים של נורות והחלפתן

אורך חיייה של נורה (משך חיים) הוא מושג סטטיסטי, השונה מנורה לנורה ומושפע מגורמים רבים: מתח הרשת ויציבותו; טמפרטורת הסביבה; מספר ההדלקות של הנורה ועוד. אורך החיים איננו מוגדר באופן חד-משמעי ע"י היצרנים השונים.



בארצות-הברית מקובל להגדיר את משך החיים של נורות כממוצע סטטיסטי של משך פעולתן. לפי הגדרה זו, 50% מהנורות תישארנה דולקות לאחר פרק הזמן הזה (איור 29). באירופה מקובל לקבוע את משך החיים על פי הירידה בתפוקת האור - עד לרגע שהתפוקה של הנורה יורדת, עפ"י ממוצע סטטיסטי, לאחוז מוגדר מתחת לערך ההתחלתי (הנומינלי). החישובים בשתי השיטות מניבים תוצאות דומות.



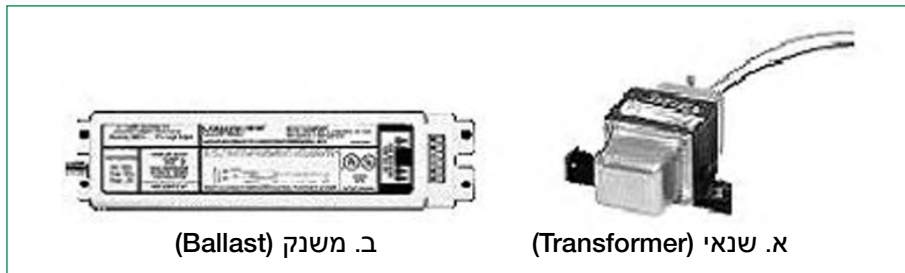
איור 29: שרידות הנורה

משך חיי הנורה תלוי בסוג הנורה. הנתון הזה איננו קובע שנורה מסוימת "תישרף" (תפסיק להאיר) לאחר פרק הזמן המוגדר עברה, אלא ממליץ להחליף אותה גם אם היא עדיין מאירה.

ציוד הדלקה

חלק מהנורות נדלקות בחיבור ישיר לרשת החשמל. לדוגמה: נורות ליבון ונורות הלוגן. חלק מהנורות יש לחבר דרך שנאי (לדוגמה: נורות הלוגן למתח נמוך). רוב נורות הפריקה נדלקות רק כשהחיבור לרשת החשמל נעשה דרך משנק ולפעמים נדרש גם מצת.

סוגי המשנקים הם ייעודיים, ומתאימים אך ורק לסוג הנורה שעבורה תוכננו. לא ניתן להחליף משנק במוצר ללא התאמה מדויקת לנתונים שהגדיר יצרן הנורות (דוגמה באיור 30).



ב. משנק (Ballast)

א. שנאי (Transformer)

איור 30: שנאי ומשנק



קיימים משנקים אלקטרוניים ואלקטרומגנטיים. למשנקים האלקטרוניים יש יתרונות רבים: חיסכון באנרגיה, משך חיי נורה ארוך יותר, משקל נמוך ועוד. המשנק האלקטרוני יקר, בדרך כלל, ממשנק אלקטרומגנטי, אך ההשקעה מחזירה את עצמה תוך פרק זמן סביר.

את רוב סוגי הנורות של היום ניתן לעמעם (dimming). עמעום נורות ליבון והלוגן הוא פשוט וזול. לעמעום נורות אחרות נדרש ציוד עזר אלקטרוני מתאים. עמעום הנורות מאריך, בדרך כלל, את משך חייהן, ומביא לחיסכון בחשמל. העמעום עלול לשנות את צבע האור הנפלט.

סוגי נורות

בחלק זה נציג איפיונים של קבוצות נורות שונות.

נורות ליבון

נורות ליבון רגילות

מקור אור נפוץ וזול. אמצעי המאור העיקרי המקובל כיום בבתי מגורים. קיימים סוגים רבים של נורות ליבון (איור 31). את נורות הליבון ניתן לעמעם בקלות.



איור 31: סוגים של נורות ליבון שונות

ספקטרום האור הנפלט מנורות הליבון הוא רציף, ודומה מאוד לספקטרום האור הטבעי. צבע האור נעים. מקדם העברת הצבע גבוה, באופן יחסי, בהשוואה ליתר סוגי הנורות (95-100).

החסרונות העיקריים של נורות הליבון הם משך חיים הקצר יחסית (כ-1000 שעות) ונצילות אורית נמוכה יחסית (כ-10 לומן לואט). באיור 32 ניתן לראות סכימה של המאזן האנרגטי של נורות הליבון.





איור 35: נורת הלוגן לעומת נורת ליבון רגילה

לנורות ההלוגן יתרונות רבים על פני נורות הליבון הרגילות: אורך חיים גדול יותר (כ-2000 שעות), נצילות אורית גבוהה יותר (כ-20-30 לומן לוואט), גוון אור לבן יותר ומימדים קטנים יותר של הנורה. קיימות גם נורות בעלות תכונות טובות עוד יותר.

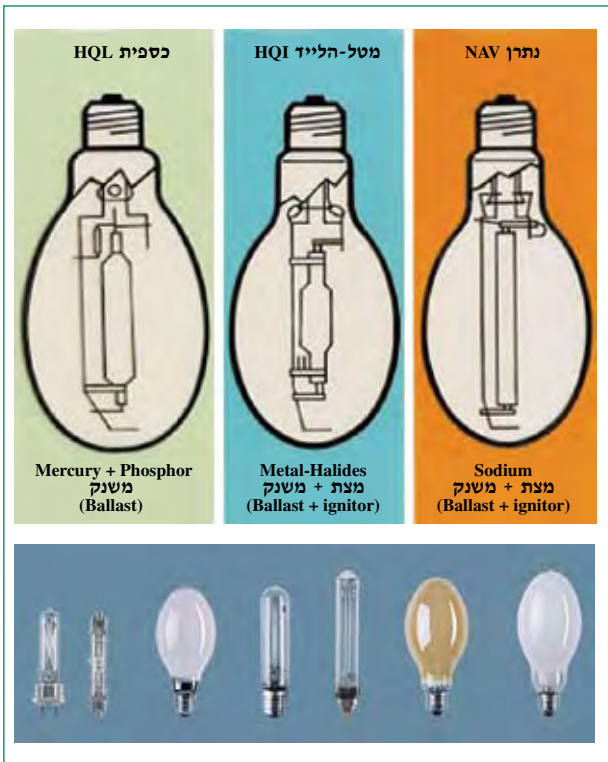
קיימים גם חסרונות לא מעטים: מעטה הזכוכית רגיש; הנורה מגיעה לטמפרטורה גבוהה באופן יחסי, בזמן העבודה; הפעולה נעשית בהספקים גבוהים אך בנצילות אורית נמוכה, בהשוואה לנורות פריקה. השימוש בנורות ההלוגן הוא, בדרך כלל, בתאורה דקורטיבית, תאורה במוזיאונים ולהדגשת מרכיבים ארכיטקטוניים.

נורות פריקה

זוהי קבוצת נורות הפועלות על פי עקרונות שונים. כל נורות הפריקה מצטיינות בנצילות אורית גבוהה ובאורך חיים ממושך. השימוש בנורות פריקה נפוץ מאוד

במיתקני תאורה שונים: תאורת רחובות, כבישים, חניונים; תאורת מגרשי תעשייה; תאורת ספורט ותאורת ביטחון. בחלק מנורות הפריקה ניתן להשתמש גם בתאורת פנים.

עקרון הפעולה של כל סוגי נורות הפריקה דומה: האור מופק ע"י מעבר זרם חשמלי דרך גז מסוים הנתון בשפופרת קטנה, אשר ממוקמת בתוך מעטה זכוכית גדול יותר. האור המתקבל הוא "חד-גווני" (בעל אורך גל אחיד), וגוונו תלוי בסוג הגז המצוי בשפופרת הפנימית (איור 36).



איור 36: סוגים שונים של נורות פריקה



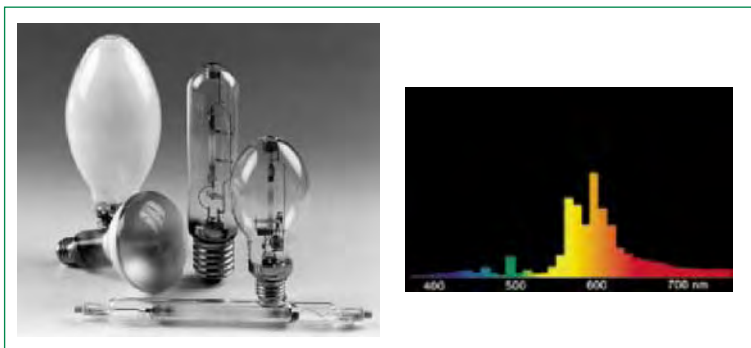
נורות פלואורסצנטיות הן תת-קבוצה של נורות כספית אשר ההתפרקות בהן היא בתחום האולטרה-סגול. החומר הפלואורסצנטי המצפה את השפופרת מבפנים מאפשר לנו להבחין באור הנפלט.

את נורות הפריקה מחברים לרשת החשמל בעזרת ציוד הדלקה: משנק ("ציוק") ולפעמים גם מצת ("סטרטר"). שילוב לא נכון וחוסר התאמה של ציוד ההדלקה עלולים להוביל לתופעות לא רצויות כמו: שינוי גוון האור של הנורה, קיצור אורך חייה, התנפצות הנורה, התחממות יתר, תקלות של המשנקים ועוד. תופעות אלה עלולות לפגוע באיכות התאורה, באיכות מערכת החשמל ובבטיחותם של המשתמשים בציוד התאורה.

החסרונות הבולטים של נורות הפריקה הם צבע האור (CRI נמוך יחסית לזה של נורות הליבון) והזמן הנדרש להדלקה מחדש: את רוב נורות הפריקה ניתן להדליק מחדש לאחר הפסקה/ירידה של המתח רק לאחר 3-20 דקות, בהתאם לסוג הנורה ולסוג ציוד ההדלקה.

נורות פריקה באדי נתון

נורת נתון (High Pressure Sodium Lamps) מבוססת על פריקה חשמלית של אדי נתון המצויים בשפופרת הפנימית, שבתוך המעטה החיצוני (**איור 37**). קיימים 2 סוגים של נורות נתון: נורות הפועלות בלחץ גבוה של אדי נתון ונורות הפועלות בלחץ נמוך.



איור 37: נורות נתון בלחץ גבוה. מימין: ספקטרום נורה טיפוסית; משמאל: מבחר דוגמאות של נורות שבשימוש

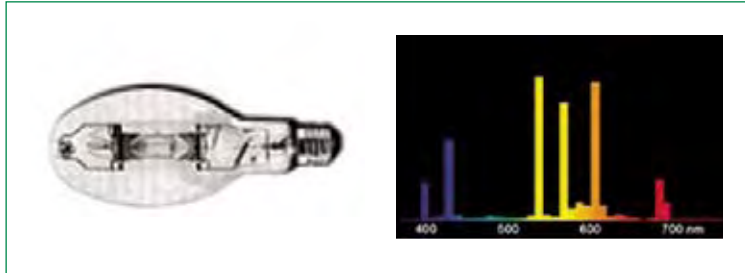
בארץ משתמשים בעיקר בנורות נתון בלחץ גבוה (נל"ג). קיימות 2 צורות עיקריות של נורות נל"ג: נורות בצורת שפופרת (טובולריות) ונורות בצורת אגס.

יתרון העיקרי: "נצילות אורית" גבוהה יחסית. שטף האור איננו תלוי בטמפרטורת הסביבה. ניתן להדליק אותן בטמפרטורת סביבה של 20°C ומעלה. חסרון של נורות הנתון הוא הגוון הצהוב-כתום של האור (כ- 2100°K) המעוות את ראיית הצבעים. לכן, משתמשים בנורות אלה רק במקומות שבהם אין חשיבות לראיית צבעים נכונה. השימוש העיקרי של נורות הנל"ג הוא בתאורת חוץ ובהארת כבישים.



נורות פריקה באדי כספית

פעולת נורת כספית (Mercury Lamps) מבוססת על פריקת אדי הכספית שבשפופרת הפנימית (**איור 38**). הנצילות האורית ומקדם מסירת הצבע של נורות הכספית נמוכים בהשוואה לנורות פריקה אחרות. חסרון נוסף: גוון כחלחל ירקרק של האור.



איור 38: נורת כספית. מימין: ספקטרום נורה טיפוסית. משמאל: נורה טיפוסית

קיימים 2 סוגים עיקריים של נורות: הפועלות בלחץ נמוך (מאיות מ"מ כספית) וכאלה הפועלות בלחץ גבוה (עד מספר מאות אטמוספרות). נורות כספית בלחץ נמוך הן הנורות הפלואורסצנטיות הנפוצות במיגוון שימושים. בנורות אלה יש עוצמה גדולה יחסית של קרינה אולטרה-סגולה, ההופכת לאור נראה בעזרת ציפוי הדופן הפנימית של מעטה הזכוכית בחומר לומנפורי-פלואורסצנטי מתאים (ראו נורות פלואורניות בהמשך).

נורות מטל-הלייד (Metal-halides)

הנורות שייכות לקבוצת נורות הכספית (**איור 39**). כדי להגביר את הנצילות ולשפר את צבע האור ויציבותו, מוסיפים לנורת הכספית תרכובת של מתכות והלוגנים. יתרונותיהן רבים מאוד. חסרונן העיקרי הוא מחירן הגבוה יחסית. חלק מנורות מטל הלייד מושפעות בעיקר ממצב העבודה (אופקי או אנכי), פחות מטמפרטורת הסביבה או מהמתח.



איור 39: נורת מטל-הלייד. מימין: ספקטרום נורה טיפוסית. משמאל: נורה טיפוסית



נורות פלואורסצנטיות (פלואורניות)

נורות פלואורסצנטיות הן נורות כספית (נורות פריקה) בלחץ נמוך. ההתפרקות בהן היא בתחום האולטרה-סגול. מעטה הזכוכית מצופה בחומר פלואורסצנטי הממיר את הקרינה האולטרה-סגולה לקרינה אורית (**איור 40**). גוון האור תלוי בסוג החומר הפלואורסצנטי. לפעמים משתמשים בטעות בשם "ניאונים". אין שום קשר בין נורות פלואורניות לשפופרות "ניאון" המשמשות בעיקר לשילוט ולפרסום.



ניתן לחלק את קבוצת הנורות הפלואורסצנטיות לפי צבע האור:

- צהבהב (warm white),

- לבן (cool white)

- אפרפר (daylight).

קיימות נורות בקטרים שונים:

38 מ"מ, 26 מ"מ, 16 מ"מ ועוד.

הנורות הנפוצות ביותר כיום (2006)

בשימוש בארץ הן בקוטר 26 מ"מ,

שהנצילות האורית שלהן גבוהה

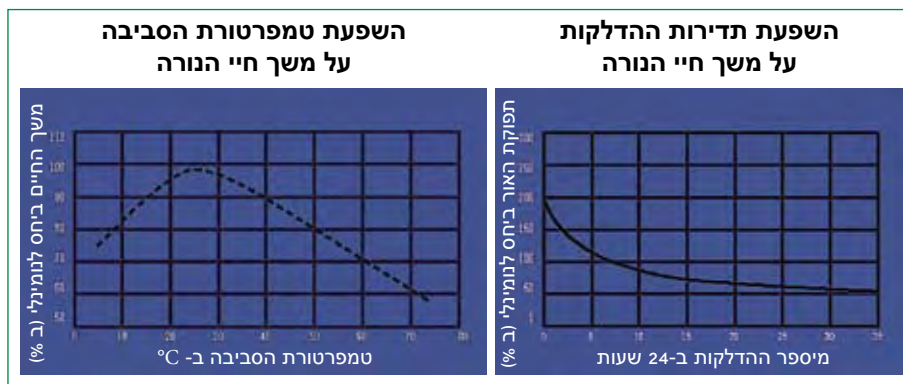
יחסית ומקדם העברת צבע - CRI -

גבוה (במיוחד בקבוצה "המשופרת"

של הנורות - סדרה 800 או

LUMILUX). גם השימוש בנורות החדשות: T5, בקוטר של 16 מ"מ, תופס לאט-לאט תאוצה גם בארץ. הנורות האלה יעילות יותר ובעלות משך חיים ארוך יותר (גם הודות לצידוד האלקטרוני הנלווה אליהן).

אורך חייה של הנורה הפלואורסצנטית מושפע מתדירות ההדלקות ומטמפרטורת הסביבה (**איור 41**).

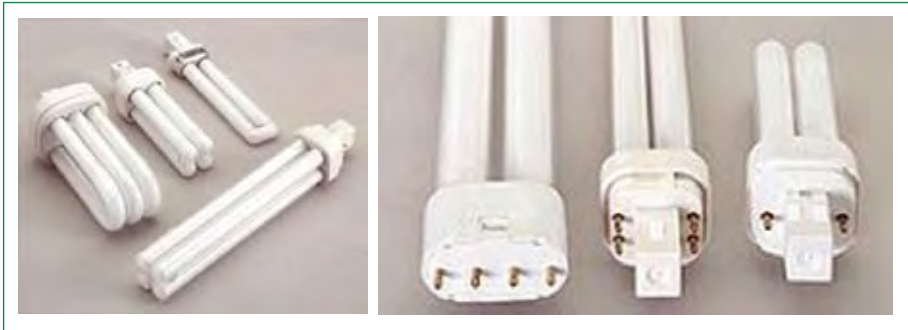


איור 41: דוגמה להשפעת טמפרטורת הסביבה ותדירות ההדלקות על אורך חייה של נורה פלואורסצנטית רגילה



נורות פלואורסצנטיות קומפקטיות

אלה הן נורות פלואורוניות "מכופפות". השם הנפוץ שלהן הוא נורות PL. קיימים סוגים רבים של נורות PL: קצרות, ארוכות, עם קיפול כפול ועם 3 קיפולים (**איור 42**).



איור 42: נורות פלואורסצנטיות קומפקטיות שונות

הנצילות האורית של נורות PL גבוהה מזו של נורות הליבון, ונמוכה מעט מזו של נורות פלואורסצנט רגילות. תפוקת האור שלהן מושפעת מאוד מטמפרטורת הסביבה. לרוב נורות ה-PL תהיה ירידה של כ-20% בתפוקה כבר בטמפרטורה של 50°C (טמפי אופיינית לגוף תאורה קטן המותקן בתקרה אקוסטית). את רוב נורות הפלואורסצנט מסוג PL ניתן לעמעם בעזרת משנק מתאים.

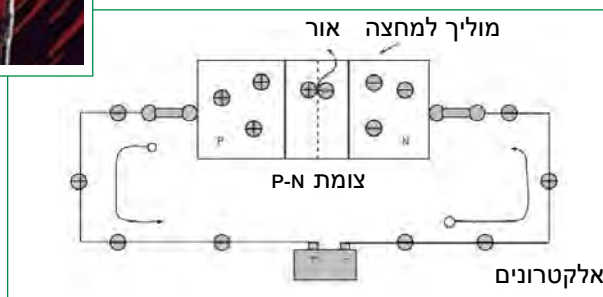
מקורות אור חדישים

ישנם מקורות אור נוספים, כדוגמת דיודות פולטות אור ("לְדִים" - LEDs) וסיבים אופטיים. השימוש ב"לדים" גדל והולך בשנים האחרונות הודות להתקדמות העצומה המתרחשת בתחום. נפרט מעט על אופן פעולתם של ה"לדים" שניתן לראות אותם יותר ויותר בשימוש היומיומי.



נורת
LED
טיפוסית

LED (Light Emitting Diodes) = דיודה פולטת אור. הדיודה מיוצרת על גבי שבב מחומר מוליך למחצה. השבב מורכב מ-2 חלקים קוטביים המופרדים במעין צומת. הקוטב P מרכז חלקיקים אלקטרוניים חיוביים, וקוטב N את החלקיקים השליליים. כאשר עובר דרך הצומת זרם חשמלי הוא פולט פוטונים והאנרגיה החשמלית הופכת לאור.



איור 43: מבנה עקרוני של צומת P-N בדיודה



נוריות ה-LED (שגודלן כ-0.5 ס"מ) משמשות כיום בחלק ממכשירי החשמל, כנוריות בקרה במכשירי טלוויזיה, בטלפונים סלולריים, בחלקים נרחבים של מכשירי הבקרה בכלי הרכב השונים, בפנסי מכוניות וברמזורים.

מכיוון שרוב האנרגיה המופקת היא בספקטרום הנראה - השיטה ליצירת האור יעילה יותר. צבע האור הנפלט נקבע ע"י סוג החומר שממנו עשוי ה"לד".

לשימוש ב"לדים" יש יתרונות רבים בהשוואה לתאורה הקונבנציונלית:

- אורך חיים ארוך במיוחד (כ-100,000 שעות, תלוי ברכיב המסוים שבו בוחרים);
- הפקת חום וצריכת חשמל נמוכים (ואטים בודדים);
- אין מעטה זכוכית, אין שימוש בגז, אין קרינת UV;
- הדיודה איננה רגישה לטלטולים ולרעידות ומספר ההדלקות איננו משפיע על משך החיים שלה;
- הדיודות ידידותיות לסביבה (השימוש בדיודות מפחית את צריכת החשמל, מקטין את הצורך בחשמל שייצורו יוצר זיהום סביבתי);
- התחזוקה מיזערית.

בשלב זה, עקב מחירם הגבוה, לא משתמשים עדיין ב"לדים" לתאורה כללית. לאיכות החומר שממנו מיוצר ה"לד" יש השפעה משמעותית על כל הפרמטרים הנ"ל. הלדים מושפעים מאוד מטמפרטורת הסביבה ונדרשת מערכת אלקטרונית מדויקת להפעלתם.

מכיוון שהטכנולוגיה עדיין "צעירה" מאוד - עדיין יש בה גם מספר חסרונות. העיקריים הם המחיר הגבוה יחסית ועוצמת ההארה הנמוכה המתקבלת. אבל ההתפתחות בתחום זה מהירה מאוד.

תופעת הבהוב והאפקט הסטרובוסקופי

תופעת הבהוב מתרחשת בנורות פריקה עם ציוד הדלקה אלקטרומגנטי. יש להבדיל בין הבהוב של נורות פריקה הנראה לעין לבין הבהוב שאיננו נראה לעין.

הבהוב נראה לעין משפיע באופן מיידי ומהווה מיטרד לראייה, מפריע לריכוז, גורם לאי-נוחות ואף מעלה את רמת העצבנות והלחץ. ממחקרים שונים עולה שאנשים החולים במחלת הנפילה (אפילפסיה) עלולים ללקות במקרים מסוימים, בהתקף של המחלה בתנאי תאורה מהבהבת בתדר מסוים.

גם הבהוב מהסוג שאיננו נראה לעין נקלט באופן לא מודע במוח וגורם לכל התופעות השליליות שהוזכרו למעלה. ההשפעה של הבהוב מסוג זה איננה מיידי ו היא מצטברת. את בעיית הבהוב ניתן לפתור, בין היתר, באמצעות שימוש במשנקים אלקטרוניים. חשוב להזכיר את תופעת האפקט הסטרובוסקופי בשימוש בנורות פריקה. התופעה נובעת מעיקרון הפעולה של נורות הפריקה והפעלתן בזרם חילופין בתדר של 50 הרץ. בנורות ליבון - תייל הלהט של הנורות מתחמם ופולט אור. קצב השינוי במתח מהיר בהרבה מקצב השינוי בטמפרטורה ובעוצמת האור הנפלטת מהנורה. העין איננה מרגישה בשינויים האלה.

בנורות פריקה - שטף האור משתנה עם שינוי המתח. כתוצאה מכך, עוצמת האור משתנה באופן משמעותי והאור "מהבהב" (100 פעמים בשנייה). בתנאים רגילים לא מבחינים בהבהוב בתדר הזה, שהוא גבוה בהרבה מהתדר העליון שבו העין מסוגלת להבחין (40 הרץ). אולם, כאשר אור מהבהב כזה מאיר גוף אשר מסתובב באותו קצב - נוצרת אשליה שכתוצאה ממנה נראה הגוף המסתובב כאילו הוא עומד, ולפעמים כאילו הוא מסתובב בכיוון ההפוך מהכיוון האמיתי.



התופעה הזאת, הנקראת "האפקט הסטרובוסקופי" עלולה להוות סיכון חמור כשמדובר, לדוגמה, בסכין מסתובבת של מחרטה. אדם שאיננו מודע לקיום התופעה עלול לגעת במחרטה, הנראית כאילו עומדת, ולהיפגע. ניתן למנוע את היווצרות האפקט ע"י חיבור מיתקן התאורה לרשת תלת-פאזית, כך שחלוקת הגופים המחוברים לפאזות השונות תותאם למיקום המכונות. דרך נוספת, נוחה פחות, היא שילוב של נורות "ליבון" באזורים המועדים לסכנה. גם שימוש בציוד הדלקה אלקטרוני פותר את הבעיה.

השוואה בין מקורות האור השונים

ההשוואה בין הנורות השונות מתמקדת כאן ב-5 פרמטרים עיקריים:

- תחום ההספקים;
- נצילות אורית;
- אורך חיים;
- טמפרטורת צבע;
- מקדם העברת הצבע (CRI).

בטבלה הבאה מפורטות קבוצות מייצגות, עיקריות, של מקורות אור. הנתונים המובאים כאן הם ממוצעים בלבד, והם עשויים להשתנות בהתאם לדגם המסוים של הנורות, יצרן הנורות וסוג הציוד. כדי לדעת באופן מדויק את הערכים הנדרשים - יש לבדוק את הנתונים הקטלוגיים של היצרן עבור הנורה שבה בוחרים (חלק מהנתונים מופיעים בנספחים).

שימושים עיקריים	נצילות אורית [lm/w]	אורך החיים [h]	טמפרטורת הצבע [°K]	מקדם העברת הצבע (CRI)	מקור האור
מגורים	20-10	1000	2750	100	ליבון
דקורציה	35-20	3000-2000	2850	100	הלוגן
כללי	90-80	12000	6000-2700	85	פלואורסצנט קומפקטי
כללי	110-90	12000	6000-2700	95-80	פלואורסצנט משופר
גינות	50-40	15000	4000	60-50	כספית
כללי	100-70	15000	6000-3000	95-65	מטל הלייד
חוץ	140-70	25000	2000	50-25	נתרן בלחץ גבוה

- לבחירה של נורה מתאימה יש לבחון את הפרטים הבאים:
- ייעוד הנורה (לאיזו מטרה היא תשמש) והתאמתה לגוף תאורה ורכיבי האופטיקה הנדרשים;
 - החשיבות של מסירת צבע טובה;
 - ההשקעה הראשונית והוצאות התחזוקה (האם יהיה תקציב להחלפת הנורות בעתיד?);
 - שטף האור המופק, ההספק והנצילות האורית;
 - מימדי הנורה;
 - חסרונות (הבהוב, חום, גוון וכ"ו);
- בהתאם לשיקולים אלה ניתן להעדיף סוגי נורות על פני אחרות ובחור את סוג הנורה המתאים.

