

# תאורת לד - מורה נבוכים

**בשנים האחרונות הופכות נורות לד לפופולריות במיגוון יישומי תאורה. יחד עם זאת, וחרף ההתקדמות הטכנולוגית העצומה של נורות אלה, הן טומנות בחובן אתגרים ויעדים רבים שעדיין לא מומשו, ואף לוקות בחסר בחלק מהיישומים. במאמר זה נציג בקצרה כמה נושאי מפתח אשר חשובים להבנת אפקטיביות השימוש בנורות לד, וכן להבנת ההבדלים בין מקורות האור הקונבנציונליים לבין נורות אלה.**

האלקטרומגנטית. למעשה, כל הדיודות פולטות פוטונים, אך לא כל הדיודות הן דיודות פולטות אור. החומר המשמש את הדיודה פולטת האור הוא חומר ייעודי שיגרום פליטת פוטונים באורכי גל בתחום הנראה לעין האנושית. חומרים מסוגים שונים מחוללים פליטת פוטונים באורכי גל שונים, דבר המתבטא כאור בגוונים שונים. יצרני לד מציעים מיגוון של נורות לד בגוונים רבים, ובהם כחול, ירוק, אדום, חום-צהבהב (ענבר), אדום-כתום, ועוד. נורת לד יכולה להפיק גוון אור מסוים בהתאם להרכב החומרים של הנורה. אולם, כאשר משלבים כמה נורות לד בגוני אור שונים נוצרים גוונים נוספים.



נורת לד (קרויה גם Solid State Lighting) היא מקור אור אלקטרוני בצורת התקן מוליך למחצה (Semiconductor) אשר פולט אור במעבר של זרם חשמלי דרכו. אין בה גז וגם לא חוט להט, והיא אינה בנויה משפופרות זכוכית שבירה. משום כך היא שונה באופן מהותי ממקורות האור הקונבנציונליים - נורות ליבון, נורות פלאורסצנטיות, ונורות פריקה בגז.

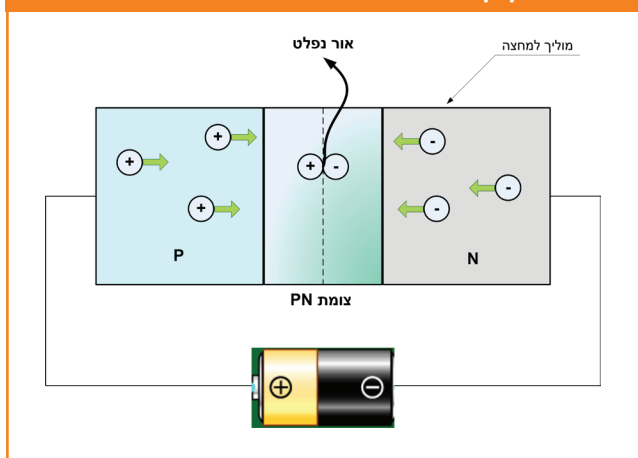
לראשונה פותחה נורת לד אדומה בחברת "ג'נרל אלקטריק" בראשית שנות ה-60 של המאה ה-20, ושימושה העיקרי היה כנורת סימון קטנה בתוך התקנים אלקטרוניים. נורת לד ירוקה ונורת לד צהובה פותחו במהלך

שנות ה-70 של אותה מאה, והותקנו בשעונים, במחשבוני, בשלטי יציאה והכוונה, ובציוד אלקטרוני נוסף. בשנת 1990 הוצגו לראשונה נורות לד בצבעים אדום, צהוב וירוק שתפוקתן האורית הניבה 1 לומן. היות שהצבעים אדום, ירוק וכחול (Red, Green, Blue) הם שלושת הצבעים הבסיסיים של האור, יכולות נורות לד להפיק אור בכל צבע, לרבות לבן. לקראת סוף שנות ה-90 החלו נורות לד להחליף נורות ליבון והלוגן ביישומי תאורה שביקשו לשלב אור בצבעים שונים. בשנים 2000-2005 גדלה התפוקה האורית של נורות לד עד כ-100 לומן, והחלו להופיע נורות לד בעלות אור לבן במיגוון גוונים - קר, חם, או גוון אור יום - של מקורות האור הקונבנציונליים. כיום מהוות נורות לד מקור אור אשר עשוי לשמש כתחליף למקורות האור הקונבנציונליים ביישומים רבים. עם זאת, הן מצויות עדיין בשלבי פיתוח, ויעדים רבים בתחום זה טרם מומשו.

## מבנה ואופן פעולה בסיסיים

לד היא דיודה פולטת אור (LED - Light Emitting Diode). זהו התקן אלקטרוני מוליך למחצה אשר מטיר לזרם חשמלי לזרום בו בכיוון אחד בלבד. הדיודה בנויה מחיבור של שני חומרים שונים במקצת, בצורה המכונה צומת PN. כמתואר באיור 1, החומר האחד הוא חומר מסוג P, אשר מכיל מטען חיובי עודף (קריו בשפה המקצועית holes), דבר המעיד על העדר אלקטרונים בו. החומר השני הוא מסוג N, אשר מכיל מטען שלילי עודף (אלקטרונים). כאשר מופעל מתח חשמלי קדמי על התקן מוליך למחצה בעל צומת PN, אלקטרונים נעים מאיזור N לכיוון איזור P, ואילו המטען החיובי (holes) נע לכיוון איזור N. כתוצאה מכך מתאחדים המטען השלילי והמטען החיובי בצומת, ונפלטת אנרגיה בצורת פוטונים. אלו הם החלקיקים היסודיים של הקרינה

איור 1: עקרון הפעולה של נורת לד



מקור: ASSIST - Lighting Research Center

לדוגמא, שילוב של נורות לד בגוונים אדום, ירוק וכחול בתוך התקן אחד, למשל גוף תאורה יחיד, בלוויית בקרה על העוצמות של כל אחד מהם, יכול להפיק מיליוני גוונים נוספים. אשר לגוון אור לבן, קיימות שתי שיטות עיקריות להפקתו באמצעות נורות לד:

- תערובת נכונה של אור בגוונים אדום, ירוק וכחול (RGB) יוצרת אור לבן.
  - שימוש בלד יחיד המפיק אור באורכי גל קצרים, כגון כחול או אולטרה סגול (UV), בשילוב של ציפוי זרחני צהוב, יוצר אור לבן.
- אמנם, השימוש בשילוב של צבעים בשיטת RGB לשם יצירת אור לבן טוב לקביעת גוון מדויק של אור ולהשגת יעילות אורית גבוהה

היעילות גם את ספק המתח (דרייבר) של הLED, שנצילותו היא כ-85%, דהיינו כ-15% מהאנרגיה החשמלית במבוא אובדת (בצורת חום) רק במעבר דרך הדרייבר.

בשנים האחרונות חל שיפור ניכר ביעילות האורית של נורות LED, לרבות במכלולים שלמים של גופי תאורת LED. איכותם הולכת ומשתפרת כמידה רבה, בעיקר כיוון שיצרני גופי התאורה המסורתיים החלו לשלב טכנולוגיה זו בגופי התאורה, אולם עדיין ניתן למצוא בשווקים עדות להופעת יצרני גופי תאורת LED חדשים רבים וחסיני ניסיון רב בענף התאורה, דבר המתבטא בגופי תאורה לוקים בחסר.

איור 2 מציג את התפתחות היעילות האורית של גופי תאורת LED בהשוואה לזו של גופי תאורה בעלי מקורות אור מסורתיים (על-פי נתונים שמפרסם משרד האנרגיה האמריקאי). כמותואר באיור, היעילות האורית של גופי תאורת LED עולה כבר כיום על זו של גופי תאורה עם נורות ליבון, והיא מצויה במגמת שיפור. עד שנת 2015 היא צפויה להיות גבוהה משמעותית, כ-150 לומן פר וואט, כמעט פי 2 מזו של גוף תאורה פלואורסצנטי. בדגימות שנערכו בשנת 2011 נמצא, כי טווח היעילות האורית של מיגוון גופי תאורת LED הקיימים בשווקים נעה בתחום של 60-110 לומן פר וואט (כמעט זהה לזו של גופי התאורה הפלואורסצנטיים). יתרה מזאת, העוסקים בענף צופים שעד שנת 2020 יתרחש גידול

**מקדם מסירת צבע של מקור אור מתאר את יכולתו של מקור האור לשחזר באופן מדויק את צבעם הממשי של אובייקטים שונים שהוא מאיר. ככל שמקדם זה גבוה (שוואף ל-100), איכות מסירת הצבע של מקור האור גבוהה יותר**

יחסית, אך פעולה זו אינה טבעית, והיא מתבטאת במקדם מסירת צבע (CRI - Color Rendering Index) נמוך של הנורה.

מנגד, הפקת אור לכן באמצעות חומר זרחני מתבטאת במקדם מסירת צבע גבוהה יותר, ולא פחותה מזו של מקורות האור הקונבנציונליים. יתרה מזאת, טכנולוגיה זו - הפקת אור לכן באמצעות חומר זרחני - מניבה יעילות אורית גבוהה יותר מזו של שילוב צבעים (RGB). לכן, זו גם השיטה השכיחה יותר להפקת אור לכן באמצעות נורת LED.

מבחינים בין שני סוגים בסיסיים של נורות LED -

**אינדיקציה (Indicator type LED)**, וה**ארה (Illuminator type LED)**. עלותן של נורת LED מסוג אינדיקציה היא נמוכה, והן משמשות בעיקר למטרות אינדיקציה בפנלים של תצוגה והתקנים אלקטרוניים. נורות LED מסוג הארה (קרויות גם בשמות SMD - Surface-mount LED, HP LED - High-Brightness LED, או HP LED - High Power LED) הן התקנים בעלי הספק חשמלי גבוה יותר, אשר מסוגלים להפיק אור בעוצמות זהות לאלו של מקורות האור הקונבנציונליים או אף גבוהות מהן.

**שטף אור, יעילות אורית ו"משך חיים שימושי"**

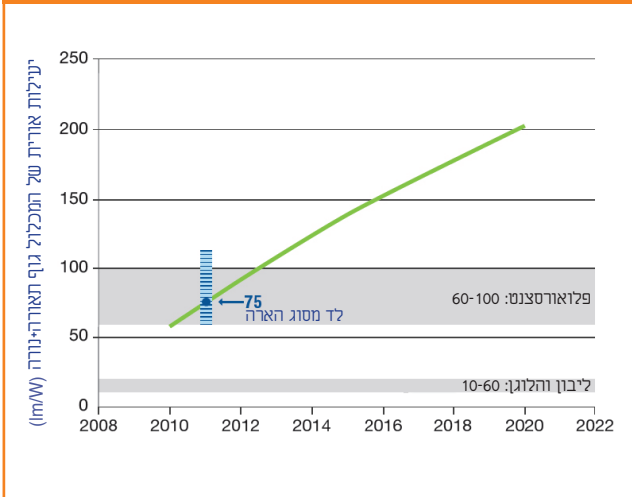
שטף האור של הנורה, היעילות האורית, ומשך חייה הם מאפיינים בסיסיים של כל מקור אור, והם שזורים זה בזה ומשפיעים זה על זה בכמה אופנים. לדוגמא, שטף האור של מקור אור משתנה עם הזמן לאורך החיים של מקור האור, ואילו היעילות האורית נקבעת כתלות בשטף האור הנפלט מהנורה.

כאשר בוחנים נורות LED בהשוואה למקורות האור הקונבנציונליים, חשוב לעמוד על טיבם של המאפיינים הללו, תוך הבחנה מהותית וחשובה בין מקורות אור קונבנציונליים לבין נורות LED - נורה לעומת התקן תאורה (גוף תאורה). למעשה, כאשר אנו בוחנים את המאפיינים של מקורות האור הקונבנציונליים, אנו מתייחסים לנתונים של מקור האור (נורה) באופן נפרד מנתוני גוף התאורה (התקן התאורה) שבו מותקנת הנורה. לעומת זאת, כאשר בוחנים את המאפיינים של מיתקן תאורת LED, אנו חייבים להתייחס לנתונים של כל המכלול - נורת LED בתוך גוף תאורה, כולל עדשות, אלקטרוניקה (דרייברים), ומבנה גוף התאורה עצמו.

**שטף אור ויעילות אורית**

לגוף התאורה שבו מותקנת נורת LED יש השפעה רבה על תפקודה של הנורה, בהיבטים של טמפרטורה אופפת, מסנני צבע, עדשות למיניהן ועוד, ולכן הוא נבנה כחלק אחד עם נורת הLED שבתוכו. לפיכך, יש להתייחס לנתוני תפוקת אור של המכלול השלם של שניהם, ולמעשה להתעלם מנתונים בודדים של הנורה לבדה (למעשה הרכיב האלקטרוני), אשר נכונים אך ורק לבדיקות המעבדה לגבי הרכיב. בניגוד למקורות אור קונבנציונליים, שלגביהם מפרסמים יצרני מקור האור (הנורה) נתונים ביחס למקור האור, יצרני גופי התאורה מפרסמים נתונים פוטו-מטריים ונתוני נצילות של גוף התאורה, כך שעל המשתמש הסופי לחשב את תפוקת האור הכוללת של גוף התאורה כתלות בנצילותו. לעניין זה חשוב להבחין בין שני מושגים נפוצים, אשר אנשי מקצוע בענף נוטים לא להבחין בהבדלים ביניהם - יעילות אורית, ונצילות. יעילות אורית (לומן פר וואט) מבטאת את היחס בין כמות האור (לומן) שנקבל ממקור אור או מגוף תאורה לבין האנרגיה חשמלית נדרשת במבוא (ואט) כדי להפיקו. לעומת זאת, נצילות מבטאת כמה אור מופק מגוף התאורה ביחס לאור שמפיק מקור האור המותקן בו, והיא מתוארת באחוזים. אשר ליעילות האורית של תאורת LED, חשוב לא לשכוח במאזן

**איור 2: התפתחות היעילות האורית של גופי תאורת LED**



מקור: DOE

ביעילות האורית של גופי תאורת LED לערך של כ-200 לומן פר וואט ואף יותר מכך - יעילות גבוהה פי 10 מזו של גופי תאורה עם נורות ליבון.

**"משך חיים שימושי" (Useful Life) של נורת LED**

משך החיים הנקוב של מקורות האור הקונבנציונליים מבטא נקודת זמן ממוצעת שבה כשלו 50% מכמות הנורות הנבדקות במדגם הבדיקה. בניגוד להגדרת משך החיים הנקוב של מקורות האור הקונבנציונליים, משך החיים של נורת LED מוגדר כ"משך חיים שימושי", וזאת בעזרת המושגים המופיעים בספרות המקצועית כ-Lumen Maintenance או Lumen Depreciation, אשר הופכים זה לזה אך משמעותם זהה, כדלהלן:

Lumen Maintenance - מבטא את אחוז שטף האור הנותר של הנורה (ביחס לשטף האור ההתחלתי שלה) לאחר משך שעות מסויים. לדוגמא, משך חיים נקוב של 10,000 שעות עבור L90 מבטא, כי לאחר 10,000 שעות יהיה שטף האור של הנורה 90% מהשטף ההתחלתי.

מתרחשים באופן הדרגתי. לפיכך, הם ממליצים לקבוע את משך החיים הנקוב של נורת לד כמשך הזמן עד לירידת שטף האור לערך של 70% מהערך ההתחלתי (L70 על-פי הגדרת Lumen Maintenance). נוסף על כך, עבור יישומים דקורטיביים של נורות לד הם ממליצים לקבוע את משך החיים הנקוב של הנורה כמשך הזמן עד לירידת שטף האור לערך של 50% מהערך ההתחלתי (L50 על-פי הגדרת Lumen Maintenance).

השלב הבא בקביעת משך החיים השימושי של הנורה על-פי ערך שטף האור שהוגדר (70% או 50%) הוא מדידת זמן העבודה עד הגיעה לערכי שטף האור המוגדרים הללו. התקנים הרלבנטיים לנורות לד (שיסקרו בהמשך המאמר) מציגים שיטות מדידה של שטף האור עבור זמן קצוב של 6,000 או 10,000 שעות. אולם, נדרש לדעת מה מעבר לכך. למעשה, נדרש להגדיר איך לשער ולהעריך (לבצע

אקסטרפולציה) מהו משך הזמן שיתקבל עבור אותם ערכי שטף אור של 70% או 50% משטף האור ההתחלתי.

נציין, שתקן TM-21-11 של התאגדות מהנדסי המאור בארצות הברית (IES) מגדיר איך לגבש השערה זו, המתבססת על המדידות הבסיסיות של 6,000 שעות עבודה (המדידות הבסיסיות מוגדרות בתקן LM80 - IES). מנגד, התקנים הבינלאומיים הרלבנטיים עדיין אינם מגדירים כיצד לגבש השערה זו.

Lumen Depreciation - מבטא את הירידה בשטף האור של הנורה ביחס לשטף האור ההתחלתי, לאורך משך חייה. למשל, בדוגמה לעיל, לאחר 10,000 שעות יירד שטף האור ההתחלתי ב-10%. נורות ליבון מאבדות כ-10%-15% משטף האור ההתחלתי לאורך משך החיים הנקוב שלהן (כ-1,000 שעות) כתוצאה מבלאי של חוט הלהט שבהן, וכתוצאה מהצטברות של חלקיקי טונגסטן שהתאדו על גבי החלק הפנימי של הזכוכית אשר עוטפת את הנורה. הירידה בשטף האור של הנורות הפלואורסצנטיות נובעת בעיקר מבלאי של החומר הזרחני העוטף את חלקה הפנימי של השפופרת הפלואורסצנטית, וכתוצאה מהצטברות של פסולת על השפופרת. נורות פלואורסצנטיות

**כאשר בוחנים את המאפיינים של מיתקן תאורת לד, חייבים להתייחס לנתונים של כל המכלול - נורת לד בתוך גוף תאורה, כולל עדשות, אלקטרוניקה (דרייברים), ומבנה גוף התאורה עצמו**

ליניאריות מאבדות כ-5%-10% משטף האור ההתחלתי לאורך משך חיים נקוב של כ-20,000 שעות, ואילו נורות פלואורסצנטיות קומפקטיות מאבדות כ-20% משטף האור ההתחלתי לאורך משך חיים נקוב של כ-10,000 שעות.

בהשוואה לכך, הירידה בשטף האור של נורות לד נובעת בעיקר מהתחממות של הרכיב האלקטרוני של הנורה. תהליך פליטת האנרגיה בצומת PN מייצר בה חום. לפיכך, שליטה על הטמפרטורה בצומת (באמצעות תכנון נכון של ההתקן) חשובה על מנת להבטיח תיקוד נכון של ההתקן, תפוקת אור אופטימלית, ומשך חיים מקסימלי (יתואר בהמשך המאמר). כמו כן, הצטברות של לכלוך על המעטפת של הנורה עלולה להעיב גם היא על תפוקת האור שלה. יתרה מזאת, נורות לד המפיקות אור לבן באמצעות חומר זרחני מאבדות משטף האור ההתחלתי שלהן כתוצאה מבלאי של החומר הזרחני, בדומה למתרחש בנורות פלואורסצנטיות. באיור 3 מוצגת לדוגמה הירידה בשטף האור של מקורות אור שונים ביחס לשעות הפעולה שלהם (Lumen Maintenance).

מאחר שנוורות לד מסוגלות להפיק אור במשך עשרות אלפי שעות, הרי שהפחת בשטף האור (Lumen Maintenance) מתאים

**היעילות האורית של גופי תאורת לד צפויה להיות גבוהה משמעותית, כ-150 לומן פר ואט, כמעט פי 2 מזו של גוף תאורה פלואורסצנטי**

**טבלה 1: משך חיים נקוב של מקורות אור קונבנציונליים ומשך חיים שימושי של נורת לד**

מקור אור	משך חיים (שעות נקוב)	משך חיים שימושי (L70)
ליבון	2,000-750	-
הלוגן	4,000-3,000	-
מטל הלייד	10,000-7,500	-
פלואורסצנט קומפקטי (CFL)	10,000-8,000	-
פלואורסצנט ליניארי	30,000-20,000	-
נורת לד לבן	-	50,000-35,000

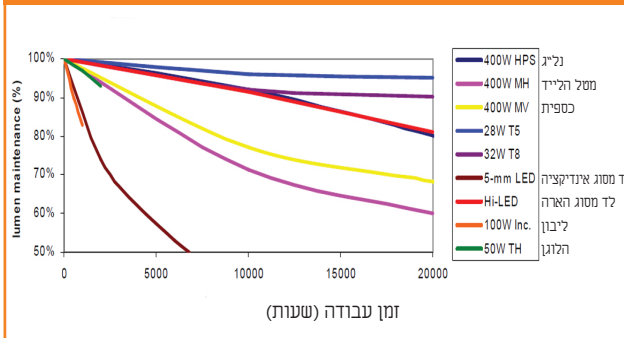
מקור: DOE

לסיכום הנושא, בטבלה 1 מוצגים ערכים אופייניים של משך החיים הנקוב של מקורות האור הקונבנציונליים, וכן משך חיים שימושי של נורת לד, עבור שטף אור של 70% מהשטף ההתחלתי (L70).

**השפעת הטמפרטורה על משך החיים ושטף האור של נורת לד**

חום עודף משפיע לרעה על התקני תאורת לד - הוא מקטין את שטף האור שלהם ומקצר את משך חייהם. לכן, התקני תאורת לד טובים אמורים לסלק את החום העודף באמצעות רכיב קירור ייעודי (קרוי בשפה המקצועית Heat Sink). הנקודה החשובה ביותר בהיבט של סילוק החום העודף היא הצומת PN, שבו למעשה מתבצעת המרה של האנרגיה החשמלית לאור נראה לעין ולחום. כאשר טמפרטורת הצומת (קרויה בספרות Tj) עולה, תפוקת האור ומשך החיים של ההתקן יפחתו. שלושה גורמים משפיעים על טמפרטורת הצומת - עוצמת הזרם החשמלי בו, מערכת הקירור של ההתקן, וטמפרטורת הסביבה שבה מותקן ההתקן. בנורות לד מסוג הארה (Illuminator type LED) מותקן, בנוסף

**איור 3: Lumen Maintenance של מקורות אור שונים (עד 20,000 שעות בלבד)**



מקור: ASSIST - Lighting Research Center

יותר לייצג את משך החיים שלהן (דהיינו משך חיים שימושי), ולא את משך החיים הנקוב, כפי שנהוג ביחס למקורות האור הקונבנציונליים.

אם כן, מהו ערך שטף האור שמפיקה הנורה (ביחס לשטף האור ההתחלתי) שעל-פיו יוגדר משך החיים השימושי של נורת לד? המוסד לחקר התאורה (Lighting Research Center) שבמכון הטכנולוגי Rensselaer בארצות הברית מסתמך על מחקרים, המעידים כי שינויים בעוצמות הארה של תאורת בנייני משרדים כמעט אינם מורגשים כל עוד עוצמת ההארה אינה יורדת מתחת ל-70% מעוצמת ההארה ההתחלתית, בייחוד אם השינויים

## תקנים רלבנטיים

החשיבות של תקנים גבוהה לאין ערוך כאשר מדובר בטכנולוגיה חדשנית ומתפתחת, הן בהיבטים של בטיחות והן בהיבטים של ביצועים, כך שהם גורמים לשיפור האיכות והעקביות של מאפייני המוצר, ומגבירים את שביעות הרצון של משתמשי הקצה בהם. בשל הפיתוח המואץ של טכנולוגיית תאורת לד והשימוש הגובר בה תוך פרק זמן קצר יחסית, טרם הסתיימה מלאכת הכנת תקנים עבור טכנולוגיה זו. הדבר מתבטא באיכות המוצרים הקיימים בשוק, שחלקם בעלי איכות ירודה, כך שאינם מספקים את דרישות התאורה המיוחדות ואף אינם עומדים בהצהרות היצרנים ביחס למשך חיים שימושי ותפוקת האור, שהם בין המאפיינים החשובים ביותר של הנורות.

להלן סקירה של כמה תקנים בולטים וחשובים העוסקים בביצועים בלבד (ללא תקני בטיחות) של תאורת לד, תוך הבחנה בין התקינה האמריקאית לבין התקינה שמפרסמת הנציבות הבינלאומית לאלקטרו-טכניקה (IEC), שאת תקניה מאמצים לרוב בישראל.

## תקנים אמריקאיים

בין התקנים האמריקאיים ניתן לציין כמה תקנים חשובים מאוד הנוגעים למאפיינים הביצועיים של התקני תאורת לד, שפירסם איגוד מהנדסי המאור בארצות הברית (IES), כדלקמן:

- התקן "Approved Method: Electrical and Photometric" LM-79-08 (פורסם בשנת 2007), מתאר הליכים לביצוע מדידות של הספק חשמלי, תפוקת אור ומאפייני צבע האור של גופי תאורת לד (מכלול שלם הכולל גם את הנורה וגם את הגוף בו מותקנת).

- התקן "Approved Method: Measuring" LM-80-08 "Lumen Depreciation of LED Light Sources" (פורסם בשנת 2008), מתאר תנאים לבדיקה של תפוקת האור של נורת לד לאורך הזמן (Lumen Maintenance). חשוב לציין שהתקן מגדיר בדיקה לאורך 6,000 שעות בלבד (במקרים מסוימים 10,000 שעות).

- התקן "Projecting Long Term Lumen" TM-21-11 "Maintenance of LED Light Sources" (פורסם בשנת 2011), מתאר שיטה לביצוע הערכה (אקסטרפולציה) של משך החיים השימושי (כפי שהוסבר לעיל), על בסיס נתוני המדידה שנערכת למשך 6,000 שעות בהתאם לתקן LM-80-08.

## תקני הנציבות הבינלאומית לאלקטרו-טכניקה

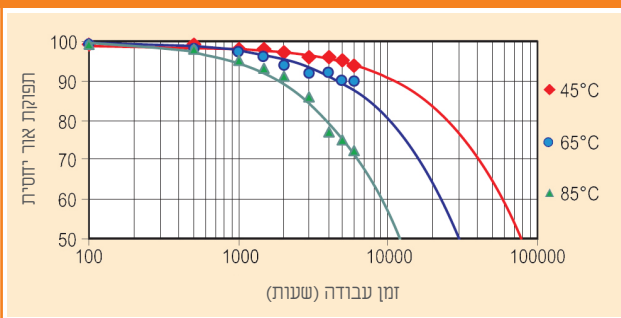
כתיבת תקני IEC עבור תאורת לד מפגרת מעט בלוחות הזמנים אחר התקנים האמריקאיים, אך היא הולכת וצוברת תאוצה. חלק מהתקנים בנושא זה שפירסם ה-IEC פורסמו בגרסת PAS Publicly Available Specifications - שמשמעותה היא גרסת-קדם לתקן, ומטרתה היא לתת מענה מהיר וזמני לענפים בהם ההתפתחות הטכנולוגית מהירה מאוד ומתחוללים בה שינויים מהירים ותכופים. בין התקנים הבולטים ניתן לציין את התקנים הבאים:

- התקן "LED Modules for General Lighting - Performance requirements" IEC/PAS 62717 (פורסם בשנת 2011), מתאר דרישות ביצועים לנורות לד. אשר למשך חיים שימושי, בדומה לתקן האמריקאי LM-80-08, גם תקן זה מגדיר מדידה של שטף האור למשך 6,000 שעות בלבד. בנוגע לשטף האור מעבר לשעות מדידה אלו, הגדרת השיטה לביצוע האקסטרפולציה מצויה בשלבי הכנה ועדיין לא פורסמה.

- התקן "Luminaire Performance- Part 1: General Requirements" IEC/PAS 62722-1 (פורסם בשנת 2011), מתאר דרישות ביצועים ביחס לגופי תאורה.

לרכיב הקירור הפנימי, גם רכיב קירור חיצוני, אשר מחובר למעטפת ההתקן, או מהווה חלק מהמעטפת או מגוף התאורה. חשוב להקפיד למנוע פגיעה (כגון הצטברות לכלוך עליו, כיסוי וכדומה) ברכיב הקירור החיצוני, אשר חשוף מטבעו לסביבת ההתקנה של גוף התאורה, וזאת כדי למנוע הרס של הלד. מאפייני הנורה הנקובים מוגדרים על-ידי יצרני הנורות בתנאי טמפרטורת צומת של 25 מעלות צלזיוס. אולם בפועל, טמפרטורת הצומת של התקן לד אשר נמצא בטמפרטורת חדר (20-25 מעלות צלזיוס), ואשר לו מערכת קירור טובה, תהיה 60-90 מעלות צלזיוס. לכן, כאשר בוחנים את המאפיינים של התקן תאורת לד, מומלץ לעקוב אחר נתונים מפורטים יותר של יצרני ההתקן לגבי טמפרטורות גבוהות יותר.

איור 4: השפעת טמפרטורת הצומת על משך החיים השימושי של נורת לד

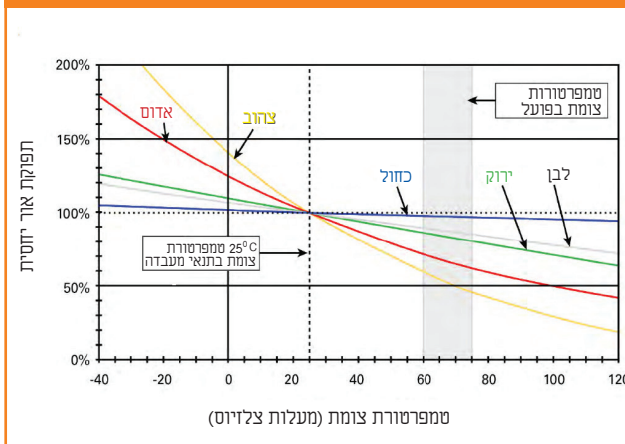


מקור: ASSIST- Lighting Research Center

**מגדירים את משך החיים של נורות לד כ"משך חיים שימושי", המבטא את ההפחתה בשטף האור שמפיקה הנורה לאורך הזמן**

באיור 4 מוצגת לדוגמה ההשפעה של טמפרטורות צומת שונות על משך החיים השימושי של התקן תאורת לד. חשוב לציין שהנתונים המדוברים מתייחסים ל-10,000 שעות בלבד, ואילו המשך הגרף מוצג באמצעות השערה (אקסטרפולציה). אשר להשפעת טמפרטורת הצומת על תפוקת האור של ההתקן, כמתואר באיור 5, נורות לד הפולטות אור אדום ואור צהבהב-חום (ענבר) הן הרגישות ביותר לעליית טמפרטורת הצומת, בעוד

איור 5: השפעת טמפרטורת הצומת על תפוקת האור של נורות לד



מקור: DOE

שנורת לד הפולטת אור כחול היא הפחות רגישה. חשוב לציין גם, שטמפרטורת צומת גבוהה עלולה לגרום שינוי בגוון האור הנפלט, דבר שיש להביא בחשבון ביישומים מסוימים, בהם יש חשיבות גבוהה לגוון אור אחיד.



חיים שימושי ארוך ביחס לזה של מקורות האור הקונבנציונליים; אינה פולטת קרינה בתחום התת-אדום (IR) ולא בתחום העל-סגול (UV); נטולת כספית, ונחשבת ידידותית לסביבה. חרף ההתקדמות הטכנולוגית העצומה שלהן, נורות לד עדיין אינן מהוות תחליף מלא לכל יישומי התאורה. יתרה מזאת, הפיתוח המהיר של הטכנולוגיה והגידול העצום בממדי השווקים העוסקים בהתקני תאורת לד הולידו גם חסרונות וכשלים הקיימים בענף זה, ובהם: טרם הסתיימה כתיבת התקנים הרלבנטיים; חוסר ניסיון של יצרני התקני תאורת לד, אשר מתבטא במוצרי שוק שאינם עומדים בציפיות המשתמשים; עלות גבוהה יחסית של ההתקנים, ועוד.



• התקן: IEC/PAS 62722-2-1 "Luminaire Performance- Part 2-1" (פורסם בשנת 2011), מתאר דרישות ביצועים נוספות ייעודיות עבור גופי תאורת לד.

קיימים תקנים רבים נוספים שלא ציינתי, אשר חשיבותם רבה ואינה מוטלת בספק. התקנים הללו דנים גם בהיבטים של בטיחות וגם בהיבטים של ביצועי הציוד, במיגוון נושאים, כגון צבע האור הנפלט, בטיחות פוטו-ביולוגית, תאימות אלקטרומגנטית (EMC) ואיכות החשמל, תאורת לד להארת כבישים, ציוד עזר (דרייברים וציוד עמעום) ועוד. חשוב לציין, שהתקנים העוסקים בתאורת לד משתנים בקצב מהיר, ולכן מומלץ לעקוב אחר החידושים בתחום זה.

## סיכום

על אף שזו טכנולוגיה חדישה יחסית, תאורת לד הולכת ומבססת את מעמדה במרבית יישומי התאורה, החל מאינדיקציה וסימון וכלה בהארת פנים וחוץ. טכנולוגיה זו כבר משתווה לטכנולוגיה של מקורות האור הקונבנציונליים בפרמטרים שונים, כגון יעילות אורית, ידידותיות לסביבה, וכדאיות טכנו-כלכלית, ולעיתים אף עולה עליה.

בין היתרונות הבולטים של תאורת לד ניתן לציין: יעילות אורית גבוהה ביחס לתאורת ליבון והלוגן, ולעיתים אף ביחס לתאורה פלואורסצנטית; מקור אור נקודתי אשר מאפשר להשתמש בו בצורה יעילה יותר ליישומים השונים; צבע אור אחיד ומגוון; משך