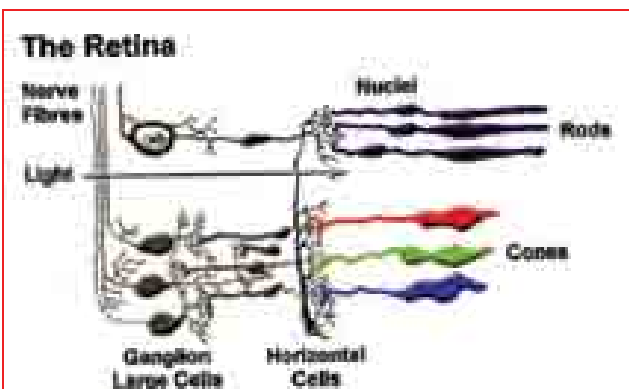


LED - היבטים אנרגטיים וביצועי תאורת חוץ במשטר MESOPIC LIGHTING

ד"ר אינג' אורי זומן

למצבי הפעולה לעיל, אחראים קולטני הראייה ה-CONES וה-RODES (ראה תרשים 2). קולטני ה-CONES ממוקמים במרכז הרשתית וקולטני ה-RODES בהיקף הרשתית כאשר הרגישות הראייתית הינה 555 ננומטר (תאורה "צהובה") ו-505 ננומטר (תאורה "ירוקה") בהתאמה. לעובדה פיזיולוגית זו, משמעויות הן בהיבט ביצועי התאורה והן בהיבט האנרגטי, כפי שיפורט בהמשך.



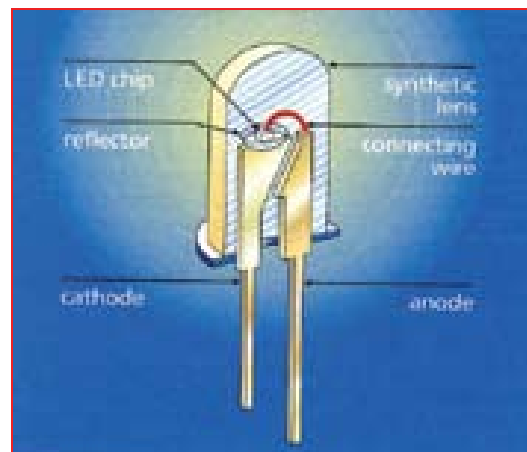
תרשים 2: קולטני ה-CONES וה-RODS ביחס לרשתית (המקור: LJ, 2009)

במצב (a) PHOTOPIC קולטני ה-CONES פעילים וקולטני ה-RODS נמצאים במצב רוויה. זהו תחום פעילות מערכת הראייה ברמת בהיקות של 3 cd/m² ומעלה. במצב (b) SCOTOPIC קולטני ה-RODS פעילים וקולטני ה-CONES כמעט ואינם פעילים ומערכת הראייה מתפקדת בתחום רמות בהיקות נמוכות מאד 0.001 cd/m² ומטה, לדוגמה, ברמת תאורת כוכבים. במצב (c) MESOPIC מערכת התאורה פעילה בתחום הביניים שבין (a) ל-(b). במצב זה מתקיים שילוב בין קולטני ה-RODS וה-CONES כפונקציה של רמות התאורה וההרכב הספקטראלי של מקור האור.

מתוך האמור לעיל, ניתן להסיק שמערכת הראייה האנושית, נמצאת בתחום (a) PHOTOPIC כאשר הפעילות הראייתית נעשית בתנאי תאורת פנים ובתחום (c) MESOPIC כאשר הפעילות הראייתית נעשית בתנאי חוץ (תאורת כבישים, שבילים, כיכרות, מנהרות וכיו"ב).

העין האנושית מאפשרת ביצועים ראייתיים רציפים במגוון רחב של תנאי תאורה החל מתאורת PHOTOPIC ועד לתאורת SCOTOPIC, כאשר בתנאים מסוימים (בלילה) קיימת חפיפה בין פעילות קולטני

עולם התאורה – פנים וחוץ, עובר ועתיד לעבור מהפך ביישום הולך וחודר – אופקית ואנכית של מקורות אור מסוג LED. מקורות אור מסוג LED מייצגים בפעם הראשונה שילוב ייחודי של תעשיית החצי מוליכים ותעשיית התאורה המסורתית. שילוב ייחודי זה, מציב למגוון הגורמים בעולם התאורה אתגרים – הן בייצור, זיוד, קביעת פרמטרים פיזיקליים ופוטומטריים מתאימים, תכנון, יישום, תפעול ואחזקה. במקביל להעלאת המודעות ליתרונות מקור ה-LED – בהשוואה למקורות האור הקונבנציונליים כגון אורך חיים, קומפקטיות, יכולת עימעות רציף, שליטה אופטית וחסכון משמעותי באנרגיה – עונה ה-LED גם על הדרישה לתאורת חוץ עם דגש לתאורת רחובות "לבנה" וזאת על בסיס התפיסה 'WHITE LIGHT IS BETTER'.



תרשים 1: מבנה עקרוני של ה-LED (המקור: FGL, 2006)

מחקרים (ASSIST, 2009-2011)² הראו שהביצועים הראייתיים בתנאי תאורת חוץ "לבנה" טובים מאלו שבתנאי תאורה "צהובה" – לבנה" (HIGH PRESSURE SODIUM) ובצד – פוטנציאל גבוה יותר של חיסכון/התייעלות אנרגטית. מאמר זה עוסק בהיבטים הפוטומטריים – פיזיקליים והאנרגטיים של תאורת LED במשטר MESOPIC LIGHTING.

משטרי ראייה - PHOTOPIC, SCOTOPIC, MESOPIC

למערכת הראייה האנושית שלושה מצבי פעולה (SLL, 2012)³
(a) PHOTOPIC; (b) SCOTOPIC; (c) MESOPIC

היבטים אנרגטיים

בצריכת החשמל הכוללת, מרכיב התאורה הכולל מהווה כ-19% - 20% ומרכיב תאורת החוץ, כ-1% (הנתונים בישראל, באדיבות משרד האנרגיה והמים). למרות שעל פניו החלק היחסי קטן, המשמעויות האבסולוטיות אינן מבוטלות, מה עוד שמרכיב תאורת החוץ מהווה הוצאה ניכרת ברשויות המקומיות או גופים ממלכתיים (דוגמת החברה הלאומית לדרכים). הקטנת צריכת האנרגיה וייעול התפעול מהווים גם גורם בהקטנת פליטת ה-CO². מרכיב מרכזי בתופעת התחממות כדור הארץ (GLOBAL WARMING).

ביישום עקרונות תאורת החוץ המבוסס על יחס ה-S/P גבוה יותר, ניתן לחסוך עד 30% מצריכת החשמל השוטפת ובמקביל את כמות ה-CO² המיוצרת בהליכי הגרציה.

טבלה 1 להלן שפותחה במסגרת מחקרי ה-ASSIST מציגה את ערכי ה-S/P השונים של מקורות האור.

| | |
|--|------|
| Low pressure sodium | 0.20 |
| High pressure sodium (HPS) 250 W clear | 0.63 |
| HPS 400 W clear | 0.66 |
| HPS 400 W coated | 0.68 |
| Mercury vapor (MV) 175 W coated | 1.08 |
| MV 400 W clear | 1.33 |
| Incandescent | 1.38 |
| Halogen headlamp | 1.43 |
| Fluorescent Cool White | 1.48 |
| Metal halide (MH) 400 W coated | 1.49 |
| MH 175 W clear | 1.51 |
| MH 400 W clear | 1.57 |
| MH headlamp | 1.61 |
| Fluorescent 5000 K | 1.97 |
| White LED ¹ 4300 K | 2.04 |
| Fluorescent 6500 K | 2.19 |

¹ על פי נתוני יצרן מקור האור (LED)

טבלה 1: יחסי ה-S/P על פי מקורות האור (ASSIST, 2009)²

ההנחה והצפייה, הינן שבעתיד יצרני מקורות האור בכלל ויצרני ה-LED בפרט, יספקו את נתוני ה-S/P באופן התואם את הקואורדינטות הכרומטיות של מקור האור בפועל (קיימת בעיתיות מסוימת בהגדרות CRI של מקורות אור מסוג LED ועל כך במאמר נוסף) וערכים אלו ישולבו בתוכנות לחישובי תאורה.

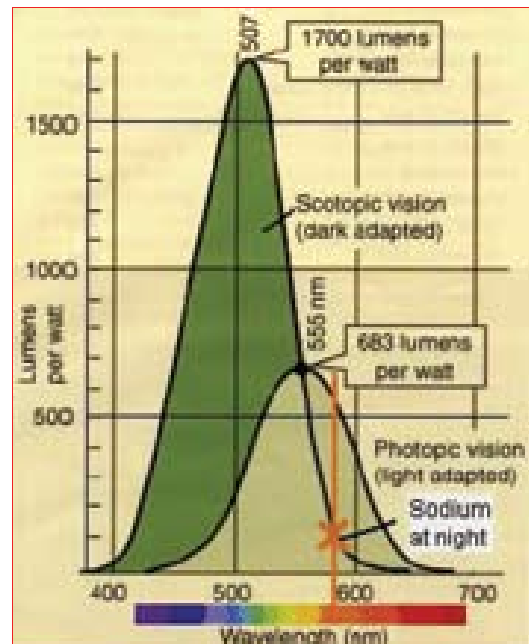
יעילות אנרגטית של מתקני מאור המבוססים על תאורת LED, מהווה גורם ראשון במעלה בקידום השימוש במקור אור זה. יישום של מקורות אורי LEDs במתקני תאורת חוץ על בסיס יחס ה-S/P טומן בחובו מספר יתרונות נוספים בנוסף לחיסכון באנרגיה והקטנת פליטת ה-CO²:

- קביעת "משקל" ליעילות מקור האור על בסיס שטף האור,
- הקטנת הספקי הפנסים/ לחילופין הגדלת מרווחי העמודים ובתנאי ששאר מאפייני התאורה U_v, U_o, U_L, TI, תואמים את דרישות ת"י 13201,
- הקטנת עלויות ההשקעה הראשונית בתשתיות,
- הקטנת הוצאות האחזקה.

ה-CONES וקולטני ה-RODS – בתחום תאורת ה-MESOPIC. להעלאת רמת הרגישות הראייתית (VISUAL SENSITIVITY) קולטני ה-ROD (הפעילים בעיקר בשעות החשיכה) אמורים לפעול בתמהיל מתאים המשלב בין ההרכב הספקטראלי (של מקור האור) ועוצמת התאורה/ רמת הבהיקות. בתרשים 3 ניתן להיווכח לדוגמה, בחוסר היעילות הראייתית של אחד ממקורות האור הנפוצים ביותר לתאורת רחובות – נתון בלחץ גבוה – נל"ג.

מערכת התקינה הבינלאומית (CIE) קבעה בשנת 1931 את עקומת רגישות העין לפי משטר ה-PHOTOPIC שכאמור מייצג את "ראיית היום" והמליצה בהתאם על רמות התאורה לפנים וחוץ. בפועל משטר הראייה בשעות החשיכה, בתאורת חוץ הינו בעיקרו MESOPIC שאינו תואם את האמור לעיל!

עבודות ומחקרים שיזמה הקהילה האירופית (MOVE⁵) וה-LRC (ASSIST²) מתייחסות לסתירה זו, ואחת התוצאות הינו קביעת היחס של ה-S/P (SCOTOPIC/PHOTOPIC) כמדד לקביעת רמות, ביצועי ויעילות התאורה בשעות החשיכה בתאורת חוץ. מדד ה-S/P פותח במרכז לחקר התאורה (LRC - LIGHTING RESEARCH CENTER, OLDBANY, N.Y) ובבסיסו, אפיון מקורות האור על פי תרומתם הכוללת לתאורה, ביצועים ראייתיים ויעילות אנרגטית.



תרשים 3: ההתפלגות הספקטראלית במשטרי הראייה - PHOTOPIC ו-SCOTOPIC ומיקום מקור האור נל"ג ביחס להתפלגות במשטר (המקור: LJ, 2009)⁴

תכנון מתקני תאורת חוץ המבוססים על יחס S/P גבוה יותר הינו הבסיס לגישה חדשנית זו. בנוסף, הראו מחקרים שעם עליית היחס S/P גם מהירות תגובת הנהג משתפרת. לדוגמה מהירות התגובה ברמת בהיקות של 1.0 cd/sq.m ובתאורת נל"ג המהירות הינה 800 msec. בה בשעה, בתאורת MH ("מטל הליד") לאותה מהירות תגובה יידרשו רק 0.17 cd/sq.m ובתאורת רחובות המבוססת על LED מהירות התגובה מרשימה אף יותר (Alan Lewis:LJ,2009)⁴.

יחד עם זאת, ראוי לציין, שפיתוח והטמעת מקורות אור יעילים יותר מלווה גם במרכיבים שליליים כמו "האור הכחול" איכות מסירת הצבע (בהיבט אמינות ההרכב ספקטרלי), זמני הדלקה והדלקה מחדש, יכולת עימעות ליניארי ועוד אחרים. כך היה עם פיתוח נורת פלורוסצנט בשנות ה-30, נורת הנתרן בלחץ נמוך (עוד לפני זאת!), נורות הכספית בשנות ה-40, נורות ההלוגן בשנות ה-50 נורות הנל"ג ואדי המתכת (MH) בשנות ה-60 ולאחר מכן נורות פלורוסצנט הקומפקטיות בשנות ה-70.

אין ספק שהמהפך הבא (שכבר בעיצומו) של חדירת ויישום של מקור האור ה-LED מהווה קפיצת מדרגה למירוב הפוטנציאל המשולב בתחום האנרגטי, הפוטומטרי, קולורימטרי, תפעולי לרבות היבטים כלכליים. יחד עם זאת ובמקביל, יש להכשיר ולייחד מערכות תקינה ומידע שתאפשרנה יישומים הן בתאורת חוץ (בו ה-LED דומיננטי ביותר) והן בתאורת פנים על בסיס הייחודיות של מקור אור זה. תאורת חוץ מבוססת LED במשטר ראייה MESOPIC מחייבת התייחסות נוספת ושונה. ההיבטים הראייתיים המשולבים ביתרונות האנרגטיים המועילים במאמר זה - חייבים להיות מובאים לידיעת כל העוסקים בייצור, תכנון, ביצוע ותחזוקה של מתקני תאורת חוץ. הבנת המערכת הפיזיו-ביולוגית של הראייה - העין, הסביבה והביצועים הראייתיים במקביל לניהול הסיכונים המתבקש - תבטיח את מירוב היתרונות.

מקורות

1. FGL, (2006) *Led – Light from the Light Emitting Diode*, # 17, Foerdergemeinschaft Gutes Licht, Frankfurt
2. ASSIST, (2009) *Outdoor Lighting: Visual Efficacy*, Volume 6, Issue 2, Lighting Research Centre, Rensselaer, Albany, N.Y
3. CIBSE, (2012) *The SLL Code for Lighting*, Society of Light and Lighting, London
4. Elwell, M.(2009) *The World in a Different Light: Mesopic Lighting, Energy Use and LEDs*, LJ, The Institution of Lighting Engineers, Rugby
5. MOVE, <http://lrt.sagepub.com/cgi/content/abstract/39/4/365>

סיכונים

כל הליך תכנון וביצוע של מתקן הנדסי (ולא רק הנדסי) טומן בחובו סיכונים וכחלק מהליכי התכנון והביצוע, יש לא רק לזהות סיכונים, אלא גם למזער/לבטל אותם.

הערה: הסיכונים המפורטים להלן, אינם מתייחסים ליישום ושימוש במקור אור LED, אלא להיבטים שהועלו ופורטו לעיל.

- יחס גבוה של S/P אינו תואם את הביצועים הראייתיים של האוכלוסייה הבוגרת (+60) שבה הרגישות להתפלגות הספקטרלית אינה זהה לאוכלוסייה הצעירה. עם עליית תוחלת החיים, יותר ויותר אזרחים מצטרפים לקטגוריה זו ולכן בחירת מקור האור חייבת להיות מאוזנת (ולא תמיד הגבוהה ביותר על בסיס S/P). קיים איפה סיכון שבהיעדר מודעות לגורם זה, התאורה לא תתאים לחלק לא מבוטל של האוכלוסייה הבוגרת.
- תקני התאורה הנוכחיים אינם מתייחסים למקורות אור מסוג LED עם המאפיינים הייחודיים. נושא המחייב רוויזיה בתקינה. הסיכון בנושא זה, הינו למתקן שאינו עונה על כל הפרמטרים האחרים ראייתיות, אסטטיות, סנור ואחרים (ראה גם להלן).
- נושא תאורת החוץ במשטר ה-MESOPIC ובשילוב מקור האור מסוג LED, הינו חדש יחסית. תקינה ויישום הינם תהליכים מקבילים, הניזונים אחד ממשנהו. זהו תהליך דינמי ואלמלא היה דינמי היה נדון לכישלון. הסיכון הנובע ממצב זה, הינו תקינה לא מתאימה (או במקרה הגרוע - מטעה!) ותוצאות בהתאם. לנושא זה, כל בעלי העניין - יצרנים, יועצים, מכוני תקינה ונציגי האקדמיה חייבים "לשלב ידיים" ולקדם ולפתח תקינה שתכלול גם התייחסויות פרטניות למקור אור זה הנמצא בראשית דרכו לחדירה אופקית ואנכית לכל מגזרי התאורה.

סיכום

עולם התאורה עובר מהפך אחד לעשור או מספר עשורים בעיקר בכל הקשור לפיתוח והופעת מקורות אור חדשים. אחד הפרמטרים העיקריים בבסיס הפיתוחים הינו העלאת היעילות האורית (והאנרגטית של מתקן התאורה) של מקור האור - מבוטא ב-LUMEN/WATT.