

FOTOMETRIA – TRECURT ȘI PREZENT

János SCHANDA

Universitatea din Veszprém

1. Introducere

Ingineria iluminatului este atractivă și datorită faptului că reprezintă o știință tehnică și totodată artă. Proiectarea și realizarea unei lucrări de iluminat, efectuarea lucrărilor de măsurări fotometrice pe respectiva lucrare este știință inginerescă, dar o știință care nu poate înlocui intuiția artistică a proiectantului.

În istoria dezvoltării fotometriei, un moment hotărâtor l-a reprezentat aprobarea sistemului fotometric actual de către Comisia Internațională de Iluminat (CIE) în urmă cu 75 de ani, la Geneva.

Acest jubileu de 75 de ani este o excelentă oportunitate să analizăm, pe de o parte, cum s-a născut fotometria, știință de bază a proiectelor și măsurărilor noastre de iluminat, prin ce schimbări și îmbunătățiri a trecut în trei sferturi de secol, iar, pe de altă parte, ce expectative sunt pentru viitorul apropiat.

2. Scurt istoric

2.1 Pionieratul în fotometrie

Analiza luminii provenite din surse de lumină artificială are aceeași vârstă cu apariția diferitelor surse de lumină, ex. lampa cu petrol, arzătoare cu flacără, surse de lumină cu incandescență etc.

Deja în 1760, Bonguer¹ a folosit un fotometru al cărui principiu s-a bazat pe iluminarea a două coli albe de hârtie semitransparente cu două surse de lumină comparabile. Prin schimbarea distanței surselor de lumină s-a realizat iluminarea uniformă a celor două coli de hârtie.

Pe un principiu asemănător s-a bazat și fotometrul lui Rumford (1773)². Aceste aparate rudimentare, iar mai târziu, cele perfecționate bazându-se pe principiul de asemănare vizuală, au exploatat următorul enunț luminotehnic: "în cazul surselor de lumină punctiforme, luminanța este invers proporțională cu pătratul distanței dintre sursa de lumină și observator".

O comparație mai exactă între iluminarea produsă de către două surse de lumină a putut fi posibilă după apariția următorului enunț din secolul al XIX-lea: "dacă observăm două surse de lumină așezate în același plan, acuratețea liniei de demarcare dintre cele două suprafețe depinde de nivelurile de iluminare ale acestora. Când nivelul de iluminat este asemănător, linia de demarcare dispare instantaneu.

Ca exemplu pentru utilizarea enunțului prezentat este principiul fotometrului Richi (1826)³, principiu în care cele două surse de lumină studiate iluminează două suprafețe albe așezate într-un anumit unghi – figura 1.

Fig. 1 Construcția teoretică a fotometrului de tip Richi

Această idee a fost dezvoltată de către Bunsen (1843)⁴, realizând chiar un "Cap" fotometric (fig. 2). Fotometrul Bunsen elimină o eroare des întâlnită chiar și la aparatele cele mai moderne, asociată iluminării oblice a unor suprafețe.

Fig. 2 Construcția teoretică a fotometrului de tip Bunsen

Comparația cea mai exactă și sensibilă prin metoda fotometriei vizuale poate fi obținută prin fotometrul Lummer - Brodhun (1889)⁵.

În cazul fotometrului de tip "contrast" prezentat în figura 3, cele două jumătăți al unghiului vizual al aparatului sunt iluminate de două surse de lumină diferite. Principiul de funcționare se bazează pe "pătratul de tip Lummer - Brodhun" care proiectează lumina primei surse pe suprafața trapezoidală din unghiul vizual secundar și viceversa. Putem considera că iluminarea celor două surse de lumină este aceeași numai când linia de demarcare dintre suprafețe dispare.

Fig. 3 Fotometrul "contrast" de tip Lummer – Brodhun

2.2 Fotometria de tip "flash"

Culorile surselor de lumină bazate pe diferite principii de funcționare sunt diferite. Nici în cazul utilizării fotometrelor cu grad ridicat de sensibilitate, comparația surselor de lumină având diferite culori nu poate fi realizată cu exactitate.

Pentru comparația intensității surselor de lumină având diferite culori putem folosi un alt principiu, fotometria de tip "flash"⁶.

Exemplificare: Asupra ochiului uman se proiectează succesiv spoturi de lumină cu culori și intensități diferite, cu frecvențe în creștere. Se constată că în cazul frecvențelor joase (<10 Hz) ochiul uman sesizează schimbarea culorilor și

pulsul intensității. Crescând frecvența la 15 Hz - 20 Hz, este sesizat doar pulsul intensității, iar la frecvențe mai mari ochiul uman receptează o lumină generală, fără pulsații și variații de culoare.

Dacă reglăm frecvența la acea valoare medie la care schimbarea culorilor nu mai este sesizabilă, ci este percepută doar pulsația intensității, prin schimbarea distanței surselor de lumină putem regla a pulsație minimă a intensității. În acest caz se poate enunța că lumina pulsatorie a celor două surse de iluminat este asemănătoare. Acest principiu poate fi folosit cu succes la comparația surselor de lumină având diferite radiații de culoare.

La începutul secolului XX au fost efectuate studii detaliate, prin metoda comparației heterocromatice și prin fotometria de tip flash, asupra "senzație de lumină" creată de lungimile de undă a radiațiilor monocromatice^{7,8}.

Aceste rezultate luminotehnice obținute prin diferite procedee au fost studiate și catalogate de către CIE în anul 1924, creând primele reguli și prima bază informațională a acestei ramuri științifice.

2.3 Nașterea fotometriei moderne

La congresul al 6-lea organizat în 1924 la Geneva, Comisia Națională pentru Iluminat a Statelor Unite ale Americii a înaintat un comunicat-propunere, care a pus bazele unui sistem fotometric unitar pe plan mondial⁹.

În acest comunicat a fost precizate detalii privind domeniul colorimetric în care au fost efectuate cercetările, numărul observatorilor (50), și plaja de lungime de undă cuprinsă între 490 nm - 680 nm. Aceste rezultate au fost comparate și cu datele obținute de alți cercetători din domeniu și însumate în graficul curbelor caracteristice comparate (fig. 4).

Fig. 4 Curbele caracteristice comparate

CIE la congresul Comisiei din 1924 a aprobat varianta propusă a curbelor caracteristice comparate prin următorul text original¹⁰:

Comisia Internațională pentru iluminat recomandă ca datele cuprinse în graficul curbelor caracteristice comparate, să fie folosite provizoriu.

Datele de calcul din 1991 înregistrează curba $V(\lambda)$ cu pași de 1nm în plaja de 360 nm și 830 nm. În tabelul alăturat este prezentat cel mai folosit domeniu de calcul între 380 nm și 780 nm cu niveluri de 10 nm. După cum se poate observa, recomandarea de folosire "provizorie" a datelor din graficul curbelor caracteristice comparate a trecut cu succes și fără reale modificări o perioadă de trei sferturi de secol.

O problemă legată de definiții a fost determinată de definirea conceptului de percepție vizuală "vizibilitate" în 1924, respectiv "senzație luminoasă" în 1983. De aceea, în multe cazuri, puterea radiată descrisă de funcția $V(\lambda)$ este interpretată psihofizic la fel ca și senzația de lumină. Această ipoteză nu este însă corectă în cazul radiației colorate.

2.4 Dezvoltarea conceptelor de bază ale fotometriei în ultimii 75 de ani

După deciziile din 1924, atenția CIE s-a îndreptat, pe de o parte, spre aplicații diverse ale fotometriei, iar pe de altă parte, asupra unor noi domenii, în primul rând asupra științei culorii. Dezvoltarea în fotometrie a fost marcată prin stabilirea funcției scotopice $V'(\lambda)$ folosite în condițiile "vederii pe întuneric", pe lângă funcția $V(\lambda)$ valabilă în cazul densităților de lumină ridicate – funcție fotopică, în condițiile "vederii pe lumină". Deși fenomenul Purkinje (care constă în deplasarea curbei de vizibilitate spre lungimi de undă mai scurte odată cu scăderea densității de lumină) a fost cunoscut cu un secol înainte de deciziile din 1924, curba de vizibilitate

scotopică a fost standardizată de CIE doar abia în 1951¹⁵.

În aceeași ședință, comisia de măsurare a culorii a evidențiat necesitatea corectării funcțiilor de uniformizare a culorii¹⁶, pentru că funcția $y(\lambda)$, care prin definiție este identică cu funcția $V(\lambda)$, are valori mai scăzute în regiunea de undă de culoare albastru decât ar fi normal în cazul vederii cu ochiul liber. Această propunere a fost respinsă de CIE, dar în 1988 a fost standardizat un mecanism de vedere fotopică, care descrie mai corect curba de vizibilitate și în regiunea de undă de culoare albastru¹⁷. Figura 5 reprezintă această curbă $V_M(\lambda)$ împreună cu curba $V(\lambda)$ conform standardului din 1924 și curba scotopică conform standardului din 1951. Tot aici s-a reprezentat funcția de uniformizare a culorii²⁰ standardizată pentru câmpul de vedere de 10° care, deși nu a fost standardizată pentru scopuri fotometrice, este folosită în multe publicații.

Fig. 5 Graficul curbei spectrale pentru funcțiile $V(\lambda)$, $V_M(\lambda)$, $V'(\lambda)$ și $y_{10}(\lambda)$

Odată cu stabilirea curbelor fotopice și scotopice s-a ivit necesitatea ca și pentru domeniul mezopic (vederea pe lumină intermediară între zi și noapte) să se alcătuiască un sistem de fotometrie. O aplicație în domeniul mezopic s-ar putea referi la problemele ivite în iluminatul rutier. CIE a avut multe încercări de a rezolva această problemă în ultimii 50 de ani, dar fără reușită până în prezent. Sumarul experimentelor efectuate pînă în 1988 a fost regăsit într-un raport tehnic¹⁸, cercetările după această dată apar doar în raporturile interioare ale comisiilor tehnice.

3. Funcția vizibilității: lumina și densitatea de lumină

Să efectuăm următorul experiment teoretic. Să alegem un stimul de lumină verde-albăstrui și unul roșu, și să încercăm să le comparăm cu ajutorul fotometriei de sclipire. Să luăm în considerare suma aditivă a celor două stimuluri considerate identice determinate mai sus, adică să proiectăm cele două fascicule de lumină pe aceeași suprafață a ecranului de protecție. Pe suprafața ecranului de protecție alături să proiectăm intensitatea dublată a unui stimul (de exemplu a celui roșu). Vom observa că stimulul de lumină roșu saturat va apărea mult mai luminos decât pata luminoasă galben-deschis văzută ca rezultanta aditivă a celor două stimuluri de culori inițiale (verde-albăstrui și roșu). Ca verificare, dacă comparăm cele două stimuluri ale experimentului descris mai sus cu fotometrul de sclipire vom observa că senzația produsă de cei doi stimuli este identică.

Acest fenomen (dintre doi stimuli considerați identici prin fotometria de sclipire, cel saturat mai puternic pare mai luminos) este efectul Helmholtz-Kohlausch sau abaterea dintre lumină și densitatea luminii (discrepanță).

În dezvoltările ulterioare, corespondentul psihofizic al senzației de lumină, a fost stabilită componenta Y sau transformata neliniară a acesteia. De exemplu, în descrierea spațiului de culori CIELAB, denumirea lui L^* este “factor de luminozitate CIE 1976”. (CIE 1976 Lightness). Conform cunoștințelor actuale, această formulare nu a fost cunoscută pentru că, în urma efectului Helmholtz-Kohlausch, relația dintre “densitatea de lumină” definită cu ajutorul fotometriei și “lumina” vizuală este mai complicată. Pentru definirea corespondenței luminozității avem nevoie de toate cele trei componente ale spectrului de culoare și de caracteristicile de culoare ale mediului înconjurător. CIE a propus experimentarea unui procedeu²¹ care poate fi folosit în stabilirea raportului dintre lumină și densitate de lumină, care se poate utiliza pentru a stabili care dintre mostre este mai puțin luminoasă.

Experimentele au arătat²⁴ că sensibilitatea spectrului de culoare a canalului fiziologic care face posibilă recunoașterea particulelor fine este identică cu curba de vizibilitate măsurată prin fotometria de sclipire. Deci, se poate afirma că s-a găsit corespondentul fiziologic, biologic al stimulului psihofizic al densității de lumină.

Alcătuirea senzației de luminozitate este mai complicată, la aceasta contribuie punctul urmărit

și mediul înconjurător al acestuia, nu numai contrastul dintre suma aditivă a stimulurilor de lungimi de undă medii și lungi.

S-a introdus conceptul “densității de lumină echivalente”²⁵ care definește ca ordine de mărime a luminozității mostrei urmărite, densitatea de lumină a unei mostre comparative de luminozitate identică. În trecut s-a folosit în acest scop densitatea de lumină a unei suprafețe albastre. În prezent, în definirea densității de lumină echivalente se folosește ca câmp comparat densitatea de lumină a câmpului luminos monocromatic de 550 nm²⁶.

4. Vederea cu bastonașe în percepția luminii

În cele mai joase domenii ale densității de lumină (aproximativ sub 10^{-3} cd/m²), conurile (un tip de celule luminoase ale retinei) sunt deja insensibile, vederea noastră este transmisă în întregime prin bastonașe (alt tip de celule luminoase ale retinei). Aceasta este domeniul scotopic al “vederii în întuneric”. Deoarece bastonașele nu pot “vedea” culorile, sistemului fotometric construit prin curba de vedere $V'(\lambda)$ este utilizabil în descrierea psihofizică a luminozității experimentate în cele descrise mai sus.

4.1 Fotometria vederii mezopice

În fotometria clasică, bastonașele nu au nici un rol în domeniul densității de lumină al vederii în timpul zilei (aprox. peste 3 cd/m²). Între 3 și 10 cd/m² (vedere mezopică) funcționează atât sistemul conurilor, cât și sistemul bastonașelor. Cu scăderea densității de lumină scade senzația creată prin intermediul conurilor și crește rolul vederii cu bastonașe.

Cu această presupunere s-au creat pentru fotometria mezopică modele de fotometrie care nu au fost recunoscute pe plan internațional. Una dintre cauzele posibile este că în domeniul vederii fotopice și scotopice, descrierea psihofizică modelează alte funcții ale văzului. În domeniul fotopic, densitatea de lumină descrie schimbările bruște (sclipiri, palpitații); În domeniul scotopic, densitatea de lumină este corespondentul luminozității. Mecanismul de vedere se transferă de pe fotometria caracterizată prin curba $V(\lambda)$ pe fotometria caracterizată prin curba $V'(\lambda)$, dar se schimbă criteriul de vedere descris de cele două sisteme.

Experimentele^{29,30} au arătat că observarea apariției bruște a unor obiecte mici în câmpul de vedere mezopic se conștientizează prin perceperea “densității luminoase – contrast” a vederii cu conuri. De aceea, în proiectarea sistemelor de iluminat stradal, chiar dacă nivelul de iluminare cade în domeniul mezopic, este preferabilă utilizarea fotometriei dezvoltate pentru vederea fotopică.

4.2 Vederea cu bastonașe în domeniul densității de lumină fotopică

În sistemul fotometric actual folosit nu se ia în considerare interacțiunea cu bastonașe. Pentru fotometria clasică, studiul realizat de Berman și colaboratorii săi^{31,32} a însemnat o provocare. Ei au arătat că pentru vederea în timpul zilei, un rol important îl are vederea transmisă de bastonașe, deoarece pe retină, în timp ce ne îndepărtăm de la fovea care asigură vederea cu acuitate maximă, concentrația de bastonașe crește. În prelucrarea informațiilor care sosesc din lateral, rolul bastonașelor nu poate fi neglijat. De exemplu, contracția pupilei este influențată de un stimul periferic.

4.3 Spectru total/lumina pe lungimi de unde critice

Unele publicații oferă o altă interpretare a fenomenelor discutate mai sus. Acestea susțin, pe de o parte, ca pentru iluminare să folosim acea sursă de lumină care emite în întregul domeniu al spectrului vizibil. Pe de altă parte, pentru a obține o vedere clară, culori bune și recunoașterea detaliilor, să utilizăm energia în mod optim (adică să emitem în benzi înguste de radiație ale spectrului vizibil). Thornton și colaboratorii lui^{34,35} propun ca iluminarea să se facă cu o emisie de unde înguste radiate pe 450 nm, 533 nm și 611 nm. Se pare că în cazul unor asemenea iluminări este optimală perceperea constantei de culoare, adică să percepem în mod identic anumite culori în condițiile iluminărilor realizate la temperaturi de culoare diferite, în emisia de unde înguste (ex.: culoarea feței umane, culoarea ierbii).

5. Simpozionul de fotometrie CIE

După cum am încercat să arătăm în unele capitole ale lucrării, deși folosim cu succes sistemul de fotometrie CIE de 75 ani, se preconizează dezvoltarea acestuia în multe domenii de utilizare.

CIE a organizat un simpozion în acest domeniu la Budapesta în perioada 30 septembrie – 2 octombrie 1999. Rezumatele lucrărilor prezentate pot fi accesate de pe pagina de web

<http://cie.kee.hu/symp99/symp99.html>

6. Bibliografie

??

??

??

??

Dr. János SCHANDA

Head of Department

Image Processing and Neurocomputing

University of Veszprém

H-8201 Veszprém, P.O.B.158, Egyetem u. 10

Hungary

Phone: +36.88.422 022

E-mail: schanda@almos.vein.hu

Notă: Traducerea a fost efectuată după articolul original în limba maghiară de către ing. Șandor ORBAN și ing. Márton VERESS.