

# **Világítódiódák fotometriai és színingermetriai jellemzése**

Doktori (PhD) értekezés

DOI: 10.18136/PE.2016.642

**Csuti Péter**

Témavezető:  
Dr. Schanda János<sup>†</sup>

Konzulens:  
Dr. Hangos Katalin

Pannon Egyetem  
Műszaki Informatikai Kar  
Informatikai Tudományok Doktori Iskola  
2016.

# Világítódiódák fotometriai és színingermetriai jellemzése

Az értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a Pannon Egyetem  
Informatikai Tudományok Doktori Iskolája keretében

Írta: Csuti Péter

Témavezető: Dr. Schanda János<sup>†</sup>, Konzulens: Dr. Hangos Katalin

Elfogadásra javaslom (igen / nem) .....  
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton ..... %-ot ért el,

Veszprém, .....  
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: ..... (igen / nem) .....  
(aláírás)

Bíráló neve: ..... (igen / nem) .....  
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....% - ot ért el

Veszprém, .....  
a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

Veszprém, .....  
az EDHT elnöke

## Tartalmi kivonat

Napjainkban a leggyorsabban fejlődő fényforrás technológia a világítódioda. Ez a típusú fényforrás rohamosan terjed és ezért egyre komolyabb feladatot állít mind a mérés technika, mind a különböző alkalmazási területeken.

A disszertáció első felében a szerző a világítódiodák fotometriai jellemzésével kapcsolatos kutatásait mutatja be és ismerteti a témában általa javasolt  $f_{I,PAR}$  parciális színképi illesztettségi mutató meghatározási módját. A szerző által javasolt módszerrel a színes világítódiodák mérés technikájában lehet egy konkrét méréshez a legmegfelelőbb fotométert kiválasztani.

A disszertáció második felében a színingermetrikával kapcsolatos kutatásait ismerteti a szerző. A téma mélyebb kutatása előtt több esetben is felmerült a színingeregyeztetés problémája pl. izzólámpa fényszínének előállítására vörös, zöld, és kék világítódiodák fényének keverékeként. A szerző többféle vizuális kísérleti összeállítást is bemutat a színingeregyeztetési probléma jellemzésére. A kísérletek során használ Maxwell-típusú kísérleti elrendezést, de alkalmazta a legnagyobb telítettség módszerét is. A dolgozatban ismerteti a CIE TC1-36-os műszaki bizottság által javasolt színingeregyeztető függvények hatását a feltárt színingeregyeztetési különbségre és ismerteti a módszert, amelynek segítségével tovább tudta csökkenteni az objektív egyeztetési hibát.

## Summary of Contents

Light emitting diode is nowadays most dynamic light source technology. This type of light source spreads rapidly and therefore it means quite a challenge in the field of its measurement techniques and also in the different application areas.

In the first part of the dissertation the author introduces his research work about the characterization of light emitting diodes and reviews the determination of his proposal  $f_{1,PAR}$  partial spectral mismatch index. By applying the method proposed by the author the most suitable photometer can be chosen for the measurement of an LED with a specified colour.

In the second part of the dissertation the author introduces his research work about the colorimetric characterization of light emitting diodes. Before the deeper investigation of the topic multiple times arose the problem of colour matching e.g. by reproducing the chromaticity of an incandescent lamp by the mixture of red, green and blue LEDs. The author introduces various visual experimental setups for the characterization of the colour matching problem. During the experiments he used Maxwell matches but he applied also the maximum saturation technique. In his dissertation work the author introduces the effect of the colour matching functions proposed by the CIE technical committee TC1-36 on the revealed colour matching differences and explains the method how he decreased further the objective matching error..

## Zusammenfassung

Heutzutage die meistens entwickelnde Lichtquelle Technologie ist die Leuchtdiode. Die Lichtquelle dieser Art erweitert sich rapide und deshalb stellt es immer ernstere Aufgaben im Messtechnik und in den verschiedenen Anwendungen.

In die erste Hälfte der Dissertationsarbeit der Autor schildert seine Forschungen im Thema Fotometrische Charakterisierung der Leuchtdioden und erklärt die Bestimmung seinen Vorschlag  $f_{1,PAR}$  Partielle Spektrale Anpassungsindex. Mit der vorgeschlagene Methode kann die beste Photometrische Detektor ausgewählt werden beim Messung farbigen Leuchtdioden.

In der zweiten Hälfte der Autor schildert seine Forschungen im Bereich der Farbmessung. Bevor der sorgfältige Forschung dieser Thema mehrere mal kam das Problem der Farbanpassung vor.

A téma mélyebb kutatása előtt több esetben is felmerült a színingeregyeztetés problémája pl. izzólámpa fényszínének előállítására vörös, zöld, és kék világítódiodák fényének keverékeként. A szerző többféle vizuális kísérleti összeállítást is bemutat a színingeregyeztetési probléma jellemzésére. A kísérletek során használ Maxwell-típusú kísérleti elrendezést, de alkalmazta a legnagyobb telítettség módszerét is. A dolgozatban ismerteti a CIE TC1-36-os műszaki bizottság által javasolt színingeregyeztető függvények hatását a feltárt színingeregyeztetési különbségre és ismerteti a módszert, amelynek segítségével tovább tudta csökkenteni az objektív egyeztetési hibát.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönet illeti elsősorban Családomat – feleségemet és gyermekeimet – türelmükért és támogatásukért. Külön köszönet illeti témavezetőmet, Dr. Schanda János professzor urat, aki szakmai kiválóságával és felbecsülhetetlen mértékű szakmai tapasztalatával és elméleti tudásával mindig készségesen válaszolt a felmerülő kérdéseimre és biztosította iránymutatása mellett munkám feltételeit. Sajnálatos módon a dolgozat végső változatát a számára megadott földi életében már nem olvashatta. Köszönöm továbbá Dr. Hangos Katalin professzor asszonynak türelméért és a dolgozat véglegesítése során tőle kapott hasznos iránymutatásaiért.

Köszönettel tartozom továbbá munkatársaimnak, akik készségesen álltak rendelkezésemre a vizuális kísérletek végrehajtása során, amivel aktívan hozzájárultak dolgozatom elkészültéhez.

## Tartalom

Tartalmi kivonat .....	3
Summary of Contents.....	4
Zusammenfassung .....	5
1. Világítódiodák fotometriai és színingermetriai jellemzése .....	10
1.1. Bevezetés .....	10
1.2. A világítódiodák jelentősége és jellemzői .....	10
1.3. A kutatás célkitűzései .....	10
1.4. Az értekezés szerkezete .....	11
2. Fény- és szintani alapfogalmak .....	12
2.1. A színeképi teljesítményeloszlás jellemzése .....	12
2.1.1. Színeképi mérések.....	14
2.2. Fotometria.....	15
2.2.1. A radiometria és a fotometria kapcsolata .....	15
2.2.2. Fotometriai műszerek .....	18
2.2.3. Az $f_1'$ színeképi illesztetlenségi mutató .....	19
2.3. Színingermetrika.....	20
2.3.1. A színingermetrika alapjai .....	20
2.3.2. Színingermetriai eszközök .....	24
2.3.3. Színinger-egyeztetéssel kapcsolatos kutatások és módszerek.....	26
2.4. Fényforrás technológiák .....	28
2.4.1. Az izzólámpák fizikai és színeképi tulajdonságai.....	30
2.4.2. A LED-ek fizikai és színeképi tulajdonságai .....	32
3. Világítódiodák fotometriai jellemzése .....	38
3.1. Fotometriai hibák jellemzői.....	38
3.2. Detektorok érzékenységének illesztettsége a $V(\lambda)$ függvényhez.....	40
3.2.1. Az $f_{1,LED}$ színeképi illesztetlenségi mutatók.....	40

3.2.2.	Detektorok relatív fénymérési hibáit jellemző PE függvény .....	41
3.2.3.	Az $f_1'$ színképi illesztetlenségi mutató és a valódi fotometriai hiba kapcsolata	42
3.3.	Az $f_{1,PAR}$ parciális színképi illesztetlenségi mutató .....	43
3.4.	Az $f_1'$ mutató, mint a legnagyobb fotometriai hiba becslése .....	53
3.5.	Eredményeim hatása a LED-ek fénymérésének gyakorlatában .....	54
4.	Világítódiodák színinermetrikai jellemzése .....	55
4.1.	Bevezetés .....	55
4.2.	Maxwell típusú színinger-egyeztető kísérletek fehér ingerekkel .....	58
4.2.1.	A kísérlet célja és módszere .....	58
4.2.2.	Kísérleti eredmények értékelése.....	61
4.3.	Maxwell típusú színinger-egyeztető kísérletek színes ingerekkel.....	65
4.3.1.	A kísérlet célja és módszere .....	65
4.3.2.	Kísérleti eredmények értékelése.....	69
4.4.	Legnagyobb telítettség típusú színinger-egyeztető kísérletek .....	73
4.4.1.	A kísérlet célja és módszere .....	73
4.4.2.	Kísérleti eredmények értékelése.....	76
4.5.	A kísérleti eredmények szintetizálása és újabb színinermegfeleltető függvények megalkotása.....	77
4.5.1.	Szintetizálás.....	77
4.5.2.	További fejlesztés.....	78
4.6.	További kísérletek fehér LED-ek észlelt egyezésének vizsgálatára.....	80
4.6.1.	Színinger egyeztetés jó, és közepesen jó színvisszaadású LED-ekkel.....	80
4.6.2.	Melegfehér lámpák ellenőrzése.....	82
4.6.3.	Az eltérő kék gerjesztésű fehér LED-ek vizsgálata.....	85
4.7.	Összefoglalás .....	86
5.	Az új tudományos eredmények összefoglalása .....	87
5.1.	További kutatási lehetőségek.....	88



5.2. Saját publikációk .....	89
I. Melléklet: A Wold-féle fundamentális színinger-megfeleltető rendszer .....	90
II. Melléklet: Az RGB LED-ek vezérlése .....	93

# **1. Világítódiodák fotometriai és színingermetriai jellemzése**

## **1.1. Bevezetés**

Napjainkban a világítódioda alapú fényforrások lassan meghódítják az általános világítás területeit is, ahol az utóbbi évtizedek során számos technológia próbálkozott az uralkodó technológia címének megszerzésével. A hagyományos és a halogén izzólámpa által keltett fény azonban olyan nyomot hagyott a sokéves használat során a használóiiban, hogy az alternatív technológiák ugyan teret nyertek, de sokáig nem tudták átvenni a vezető szerepeket dacára annak, hogy a fényhasznosításuk esetlegesen többszöröse is lehetett az izzólámpákénak. Egy tipikus felhasználói környezetet megvilágító fénycső, vagy kompaktfénycső fénye még ma is szembetűnően eltér az izzólámpák fényétől. A jelek szerint, a ma is folyamatosan fejlődő világítódioda technológia lesz az első olyan fényforrás technológia, amelynek segítségével végleg búcsút inthetünk az izzólámpák egyeduralmának. Az izzólámpa sikerét az is alátámasztja, hogy a legtöbb retrofit világítódiodás fényforrás az izzólámpa fényminőségét és fényeloszlását igyekszik utánozni több-kevesebb sikerrel. Dolgozatomban nem a fényforrás technológiák kutatására fektetem a hangsúlyt, hanem a világítódiodákkal kapcsolatban felmerült mérés technikai problémákat igyekszem bemutatni és igyekszem hozzájárulni kísérleti eredményeimmel egy jobb mérőrendszer megalkotásához.

## **1.2. A világítódiodák jelentősége és jellemzői**

Ma már lehetetlen úgy beszélni a világítástechnikáról, hogy ne kerüljenek előbb utóbb szóba a világítódiodák. Segítségükkel számos világítási feladat könnyedén megoldható, de akadnak szép számmal problémás területek is. Elsőként a színes világítódiodák terjedtek el a jelzőfények területén, majd a fehér világítódiodák megjelenésével egyre hatékonyabb általános világítási megoldások is születtek. A színes világítódiodák keskeny színek tartományban sugároznak, amely rámutatott a leghétköznapibb fénymérő műszerek, a megvilágításmérők, vagy egyéb fotométerek működésében eddig – a hagyományos fényforrások esetében – nem jelentős mérési hibáira. A keskeny spektrális sugárzási tartomány mind a fotometriájában, mind a színingermetriában okozott a metrológusoknak kihívást.

## **1.3. A kutatás célkitűzései**

A fentiek alapján igen fontos tehát megvizsgálnom a kérdéskört, mert a jelek szerint a következő évtizedekben nagy szükség lesz világítódiodák mérése esetén is megbízható fénymérésre és színingermetriára. Céлом egyrészt a fénymérő fejek kiválasztását

megkönnyíteni, másrészt magyarázatot adni a színes világítódiodákkal működő hangolható világítóttesteknél tapasztalható színinger-egyeztetési problémákra és megoldást kínálni azokra.

#### **1.4. Az értekezés szerkezete**

A dolgozat 5 fejezetet tartalmaz az alábbi tartalmakkal.

A bevezetést követő 2. fejezetben ismertetem a fotometriai és színingermetrikai módszereket, majd bemutatom a különböző fényforrás technológiákat, bővebben tárgyalva az értekezés témájához kapcsolódó típusok tulajdonságait (izzólámpa, világítódioda).

A 3. fejezet a világítódiodák fotometriai jellemzésének témakörével foglalkozik rávilágítva a világítódiodák fotometriájával kapcsolatos gyakorlati problémákra. Ilyen probléma a fénymérők érzékelőinek emberi látáshoz való illesztésének jelenleg használt minőségi jellemzése, amely világítódiodák által keltett fényingerek mérése esetén nem ad információt a várható fotometriai hiba mértékéről. Ismertetem a problémák megoldására tett javaslataimat, kutatási eredményeimet.

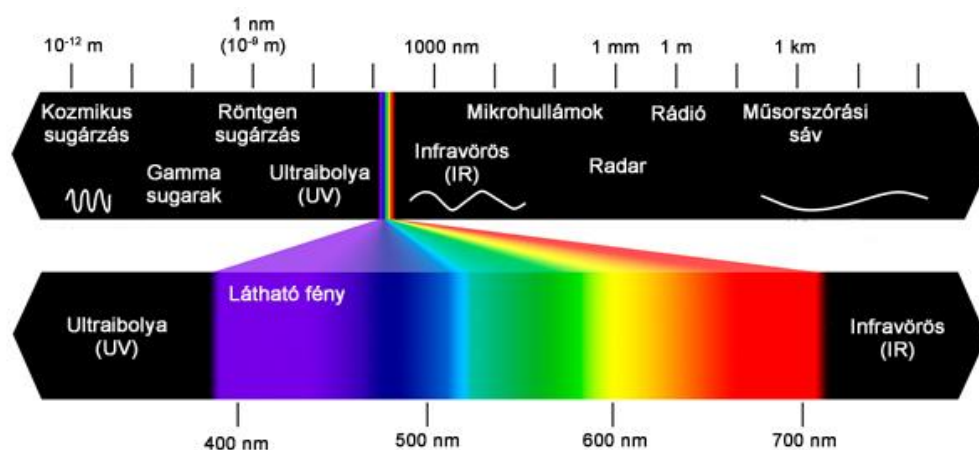
A 4. fejezet a világítódiodák színinger-metrikájának témakörét taglalja részletesen bemutatva a témában végzett színinger-egyeztető kísérleteimet, illetve azok eredményeit. A színinger-egyeztetés problematikája leginkább a keskeny sávú alapszíningerekből additívan alkotott fényingerek esetében jelentős, de önvilágító felületeknél (például képmegjelenítőknél) is tapasztalhatunk egyeztetési problémákat.

Az 4.7. fejezetben összefoglalom az értekezésben bemutatott kutatási eredményeimet és ismertetem a téziseimet.

## 2. Fény- és színtani alapfogalmak

### 2.1.A színeképi-teljesítményeloszlás jellemzése

Ahhoz, hogy az emberi észlelés szempontjából vizsgálhassuk meg a különböző fényforrás technológiákat, meg kell ismerkednünk a fényforrások, pontosabban a fényforrásokból kilépő elektromágneses sugárzás színeképi jellemzésével, illetve azokkal a mérőműszerekkel, amelyekkel színeképi felbontású méréseket végezhetünk. A 2.1. ábra mutatja az elektromágneses színeképet, kiemelve a látható tartományt és annak közvetlen környezetét.



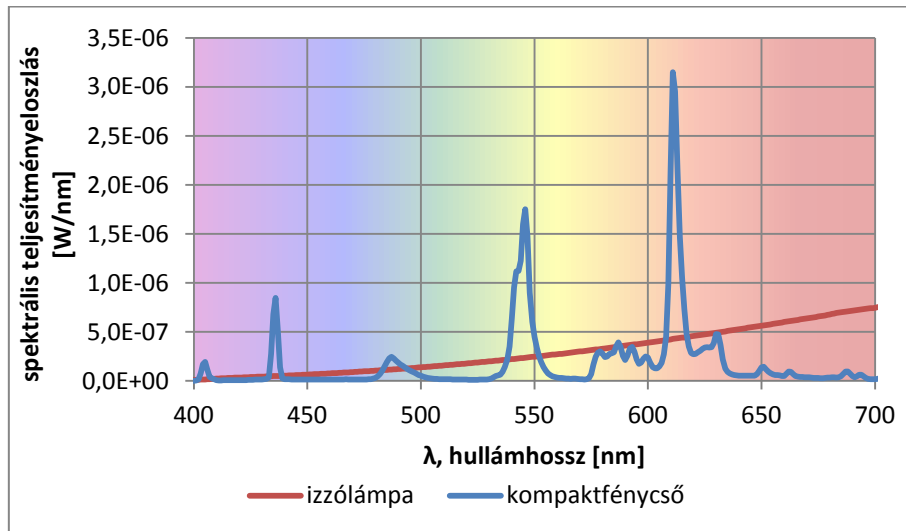
2.1. ábra

*Az elektromágneses spektrum és a színekkel kiemelt látható tartomány [1]*

Tekintsünk tetszőleges optikai sugárzást, azaz adott irányba 1 nm és 1 mm közötti hullámhosszal rendelkező fotonok formájában energiát továbbító elektromágneses sugárzást. Ha meg tudjuk mondani, hogy a kérdéses sugárzásban az egyes szűk hullámhossz intervallumokban másodpercenként hány foton áramlik, akkor ismerjük az optikai sugárzás színeképi teljesítményeloszlását. A 2.2. ábra két hagyományosnak tekinthető fényforrás (izzólámpa és kompakt fénycső), míg a 2.3. ábra a fényforrások újabb generációinak (fényporos világítódioda, illetve vörös, zöld és kék komponenseket tartalmazó, úgynevezett RGB-LED) színeképi teljesítményeloszlását láthatjuk. A diagramokon bemutatott fényforrások fényszíne mindkét esetben melegfehér.

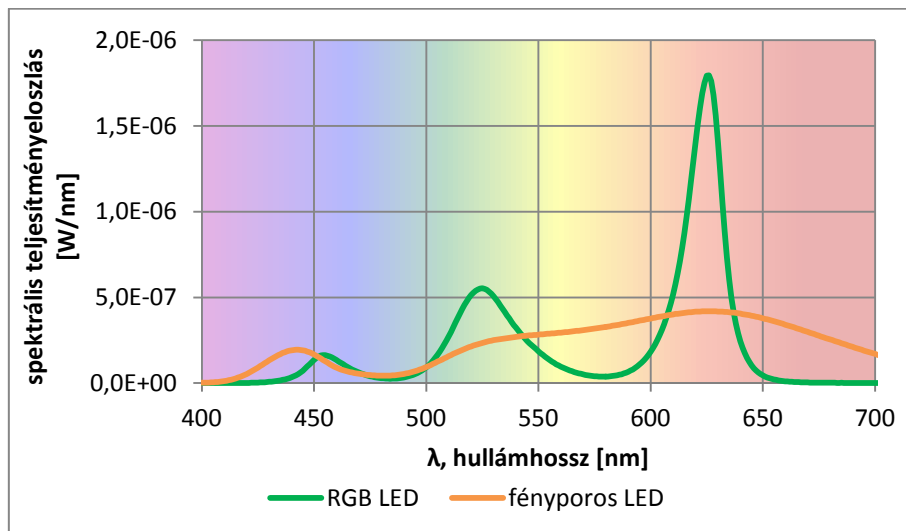
A 2.2. ábra diagramján a vörös görbével jelölt függvény által reprezentált izzólámpa színeképeinek jellege szigorúan monoton növekedő, míg a kompaktfénycső színeképe teljesítménycúcsokkal és a nullaszint közeli értékekkel rendelkezik. A két fényforrás fényszíne ugyan megegyezik, de a megvilágított felületek színeit az izzólámpa fénye képes csak – a színvisszaadás definíciója szerint [2] – tökéletesen visszaadni, hiszen annak spektrális

teljesítmény eloszlása a teljes látható hullámhossztartományon nem nulla értékű. A 2.3. ábra LED-es fényforrásainak színeképeit tanulmányozva láthatjuk, hogy a melegfehér fényszínek sokféle módon előállíthatóak. Látási rendszerünk egy fehér fényingert tekintve nem tud különbséget tenni két azonos fényszínű, ám eltérő színeképi teljesítményeloszlású fényforrás fénye között, legalábbis abban az esetben nem, ha fehér felületet világítunk meg azokkal. Amint színes környezetben hasonlítjuk össze az előbbi fényingereket, a színvisszaadási különbségekből már következtethetünk a spektrális teljesítményeloszlás jellegére.



2.2. ábra

*Izzólámpa és kompakt fénycső spektrális teljesítmény eloszlása*



2.3. ábra

*Fényporos LED és RGB LED spektrális teljesítmény eloszlása*

### 2.1.1. Színképi mérések

A színképi-teljesítményeloszlás mérésére használható berendezés a *spektroradiométer*, amelynek segítségével mérhető adott, kicsi hullámhossztartományokban a kisugárzott optikai teljesítmény. A spektroradiométer detektora teljesítményt mér és hogy a detektor jele melyik mennyiséggel lesz arányos, az a műszer optikai kialakításától és a mérési elrendezéstől függ. A két leggyakoribb spektroradiométer által mért mennyiség a spektrális besugárzás és a spektrális sugársűrűség. A *spektrofotométer* olyan műszer, amely két azonos hullámhosszhoz tartozó radiometriai mennyiség arányának a mérésére használható. Ily módon származtathatunk például spektrális visszaverési tényezőt, vagy spektrális átérésztési tényezőt. Fény- és színmérés esetén az említett, közel három nagyságrendnyi ( $1 \text{ nm} < \lambda < 1 \text{ mm}$ ) hullámhossztartománynál csak a lényegesen szűkebb  $380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$  közötti tartomány az érdekes, hiszen – jelenlegi ismereteink szerint – az emberi látásért felelős receptorok csak ebben a tartományban érzékelnek.

Vizuális kísérletekhez kapcsolódó radiometria mérésekhez az emberi látórendszer optikai felépítéséhez legközelebb álló mérőműszert, egy spektroradiométert célszerű használni. Laboratóriumunkban rendelkezésemre állt egy kalibrált PR-705 spektroradiométer (2.4. ábra), amelyet a különböző elsődleges és másodlagos sugárzók, illetve összehasonlítható színingerek színképi teljesítmény eloszlásának méréséhez használtam. A műszeren  $\frac{1}{2}^\circ$  és  $2^\circ$  kerek apertúrák közül lehet választani, amelyek közül én a keskenyebb sáváteresztéssel rendelkező  $\frac{1}{2}^\circ$ -os látószöveget választottam. A műszer optikai kialakítása Pritchard rendszerű [3], amely lehetővé teszi a mérendő célterület pontos pozícionálását oly módon, hogy beállításkor látható a mérőfelület közvetlen környezete. A műszerben a mérendő területről érkező optikai sugárzást optikai rács bontja összetevőire, majd ezen összetevők egymás mellé elhelyezett fotodiódákban gerjeszt fotoáramot. Ezekből a fotoáramokból 16 bites analóg-digitális átalakító segítségével keletkezik számítógép segítségével is feldolgozható adatsor. A műszer mérési bizonytalansága a kísérletek szempontjából igen lényeges színességi koordináták tekintetében  $u_x = \pm 0,0015$  és  $u_y = \pm 0,001$ . A színességi koordináták mérésének ismétlődőképessége  $\pm 0,0005$  izzólámpa mérésekor. A spektroradiométer a látható színképtartományban  $380 \text{ nm}$  s  $780 \text{ nm}$  között képes méréseket végezni,  $2 \text{ nm}$ -es felbontással és  $5 \text{ nm}$ -es sáváteresztéssel rendelkezik. A műszer alkalmas arra, hogy azt a korábbi kísérleteknél tapasztalt színességi koordináta különbségek méréséhez felhasználjam.



2.4. ábra

*A PhotoResearch, SpectraScan PR-705 típusú spektrométer*

## 2.2. Fotometria

Ahhoz, hogy a fotometria területével megismerkedhessünk, először távolabbról kell a méréstudománynak ezen területére tekintenünk. A fényérés is a méréstudomány (metrológia), azaz a különböző mennyiségek objektív mérésének elméleti és gyakorlati ismereteivel foglalkozó tudományág része. A radiometria foglalkozik az elektromágneses sugárzásnak az optikai sugárzás tartományával, amely az 1 nm és 1 mm hullámhosszak közötti tartomány. Ezen belül a fotometria az ember által fényként észlelhető sugárzás leírásával foglalkozik.

### 2.2.1. A radiometria és a fotometria kapcsolata

Az elektromágneses sugárzás szinte észrevétlenül vesz minket körül mindennapjainkban. Az ember az elektromágneses sugárzást a látási rendszerével a 360 nm és 830 nm hullámhosszak közötti tartományon belül képes észlelni. Ugyan a látható tartományon kívüli sugárzásokat is érzékelhetjük a saját bőrünkön, mint például az ultraibolya sugárzás (bőrelváltozás, barnulás), vagy az infravörös sugárzás (hőérzet) hatását, de ezek vizsgálata nem tárgya a dolgozatomnak.

A radiometria írja le az optikai sugárzást fizikai mennyiségek formájában. A fotometria úgy értékeli ugyanezt a sugárzást, hogy az átlagos emberi észlelő látására jellemző színeképi érzékenységi függvénnyel súlyozza azt, amelyet láthatósági függvénynek, az ún.  $V(\lambda)$  függvénynek [4] nevezünk. Ha ismerjük egy sugárforrás  $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  spektrális sugárzott teljesítményét, akkor (2.1) alapján meghatározhatjuk a sugárforrás  $\Phi_v$  összfényáramát.

$$\Phi_v = K_m \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (2.1)$$

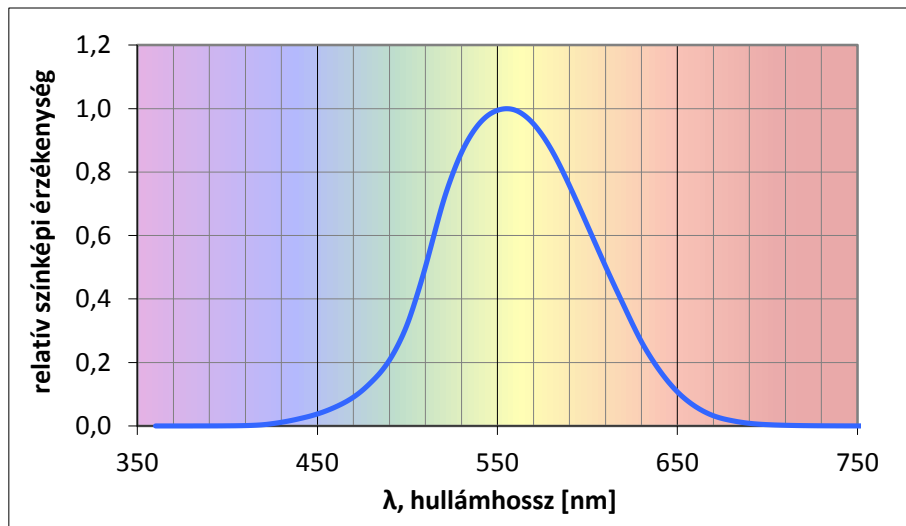
ahol:

- $K_m$  a fényhasznosítás legnagyobb értéke,
- $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  a sugárforrás spektrális sugárzott teljesítménye,
- $V(\lambda)$  a láthatósági függvény.

A  $V(\lambda)$  a nappali fényviszonyok (fotopos fény-sűrűségi szint, néhány  $\text{cd}/\text{m}^2$ -nél nagyobb) melletti látást jellemzi és azt a CIE, azaz a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (Commission Internationale de l'Eclairage) 1924-ben szabványosította. A láthatósági függvény grafikonját mutatja a 2.5 ábra, ahol megfigyelhetjük, hogy az érzékenység csúcserőve a  $\lambda = 555 \text{ nm}$  hullámhossznál található, azaz a látási rendszerünk ezen hullámhosszal rendelkező fotonokra a legérzékenyebb. A fotopos fény-sűrűségi szintek esetén érvényes  $V(\lambda)$  függvény mellett beszélhetünk még éjszakai látásra jellemző láthatósági függvényről is, ez a  $V'(\lambda)$  függvény [5], azaz a szkotopos fény-sűrűségi szintek esetén jellemző érzékenységi függvényről. Az említett, két fény-sűrűségi szint által meghatározott nyílt tartományokon kívül beszélhetünk még egy kevert érzékenységi függvénnyel jellemezhető tartományról, a mezopos tartományról, amely a  $0,005 \text{ cd}/\text{m}^2$  és az  $5 \text{ cd}/\text{m}^2$  közötti fény-sűrűségi szintek között érvényes. Az ebben a tartományban érvényes láthatósági függvény meghatározására a CIE egy iteratív algoritmust ajánl a 191-es publikációjában [6].

Az emberi látásra leginkább jellemző fotometriai mennyiség, a fény-sűrűség. Tekintsünk egy olyan látási szituációt, ahol az emberi észlelő egy megvilágított felületet néz. Ekkor az észlelő látási rendszere az adott felületről, adott térszögben érkező fényinger szintjéhez alkalmazkodik (többek között beállítja a megfelelő pupillaátmérőt). Ezt az állandósult állapotot a fény-sűrűség mennyiség írja le, amely függ a látási szituáció tárgyát képező felület tulajdonságaitól és annak megvilágítójától is, valamint a megfigyelő látószögét jellemző térszögtől is.





2.5. ábra

A  $V(\lambda)$  függvény, azaz a CIE 1924-ben rendszeresített átlagos emberi észlelő láthatósági függvénye [4]

A CIE 18.2-es kiadványa [7] a fénymérés három alaptípusát különbözteti meg:

- szélessávú fénymérés,
- színeképi fénymérés,
- vizuális fénymérés.

Szélessávú fénymérés esetén lineáris integráló elemet, detektort használunk, amelynek színeképi érzékenységét a mérendő fénysűrűségi szintnek megfelelő fényhatásfok függvényhez [7] (pl.  $V(\lambda)$ , vagy  $V'(\lambda)$ ) illesztették. Már az alaptípus elnevezése is árulkodik a mérési tartományról, ezek az eszközök ugyanis a teljes látható színeképtartományból érkező fotonok hatásait integrálják. Egy, a  $V(\lambda)$  függvényhez illesztett érzékelőben képződő fotóáram arányos a detektor érzékeny területére eső megvilágítással. A módszer előnye, hogy gyors fénymérést tesz lehetővé, viszont, ha az érzékelő rendszer (fényelem érzékenysége, szűrő átteresztése, átalakító elektronika,...) eredő  $S(\lambda)$  színeképi érzékenysége nem egyezik meg a  $V(\lambda)$  (vagy  $V'(\lambda)$ ) spektrális fényhatásfok függvénnyel, úgy ez bizonyosan mérési hibákhoz fog vezetni. A gyakorlatban színszűrőkkel igazítják az  $S(\lambda)$ -t a  $V(\lambda)$ -hoz, de ennek során mindig maradnak kisebb-nagyobb illesztetlenségek.

A fénymérő detektorok színeképi illesztését az úgynevezett  $f'_1$  színeképi illesztetlenségi mutatóval jellemzik, amelyet részletesen ismertetek a 2.2.3 alfejezetben. A színes LED-ek keskeny színeképtartományban sugárzó eszközök, ezért a szélessávú fénymérés módszerét alkalmazva a tapasztalt fénymérési hiba ennél a módszernél lehet a legnagyobb mértékű, ha a

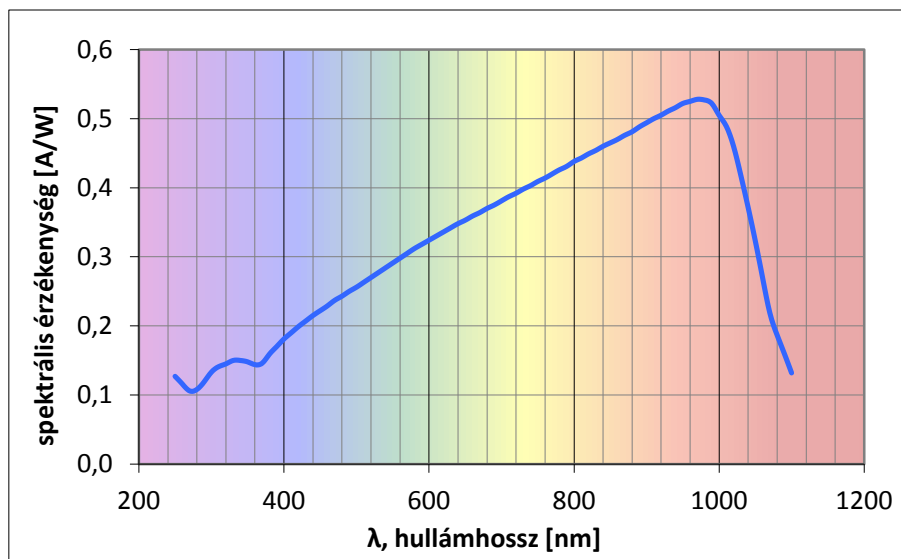
vizsgált keskeny színekű fényforrás sugárzott teljesítménye az érzékelő érzékenységének pontatlanul illesztett területére esik. Ezt a fénymérési hibát csökkenti az általam kidolgozott *parciális  $f_1'$*  mutató és a színes kalibráló fényforrások alkalmazása, amelyet a 3.3 fejezetben ismertetek.

A fentebb ismertetett integrális, vagy szélessávú fénymérés érzékenységének illesztettségéből adódó hibák csökkentésének lehetséges módja a *színeképi fénymérés* használata. Ekkor a mérendő sugárzás látható színeképtartományba eső teljesítmény eloszlását mérjük a műszer típusától, vagy annak beállításától függő sáv szélességgel és lépésközzel. Ezzel a módszerrel már nagymértékben csökkenthetjük a mérés bizonytalanságát, de ez a módszer jól felszerelt optikai laboratóriumot igényel. LED-ek mérésére ez a módszer a leginkább javallott, hiszen az utolsó fénymérési alaptípust, a *vizuális fénymérést* – az egyéni megfigyelésekből adódó szintén nagy mérési bizonytalanság miatt – csak olyan megvilágítási szinteknél javasolják, melyeknek még nincsen kidolgozott láthatósági függvénye. Jó példa erre az éjszakai vezetésnél jelentkező mezopos tartomány, amely az éjszakai (szkotopos) és a nappali (fotopos) fénysűrűségi szintek közötti tartomány.

A LED-ekre vonatkozó mérés technikai irányelveket a CIE 127-es dokumentuma [8] foglalja össze. Ebben a dokumentumban találhatjuk a LED-ek fény- és szín mérésére vonatkozó ajánlásokat. A CIE 127-es dokumentum 2007-es kiadása a fénymérő detektorok jellemzéseivel is foglalkozó fejezetben már említést tesz az általam kidolgozott  $f_{1,PART}$  *színeképi illesztetlenségi mutató* ról. A továbbiakban ismertetem a fotométer érzékelőket jelenleg minősítő illesztetlenségi mutatót.

### 2.2.2. Fotometriai műszerek

A fotometriai műszerek többnyire szilícium (Si) érzékelőre épülnek, amelynek spektrális érzékenysége látható a 2.6. ábrán. Megfigyelhető, hogy az érzékenység a teljes látható tartományt lefedi, ezért is használják előszeretettel fotométerek érzékelőjeként. Ahhoz, hogy egy szilícium alapú érzékelőből fotométert készítsünk, módosítanunk kell annak színeképi érzékenységét. Optikai érzékelők esetében ezt megtehetjük színes üveg szűrők kombinációjával, hogy az eredő érzékenység a lehető legjobban illeszkedjék az emberi látást jellemző  $V(\lambda)$  függvényhez. Ezt különböző színes üvegrétegeket használó szűrőzési technológiákkal lehet elérni. A jelenleg használatos, a színeképi érzékenység illesztésének jóságát jellemző mutatót ismertetem a következő fejezetben.



2.6. ábra

*Si érzékelő spektrális érzékenysége a hullámhossz függvényében*

### 2.2.3. Az $f_1'$ színképi illesztettségi mutató

A fotometriában használatos érzékelők különböző tulajdonságait számos mutatóval jellemzik [9], többek között a detektor érzékenységének spektrális illesztését, a detektor érzékenységének irányfüggését, vagy a detektor linearitását. A fénymérés bizonytalansága szempontjából a detektor legfontosabb jellemzője annak spektrális illesztési jósága, amit az  $f_1'$  spektrális illesztettségi mutatóval jellemezhetünk [10,11]. A mutató a detektor spektrális érzékenységének ( $s(\lambda)_{\text{rel}}$ ) az emberi látás fényérzékenységét leíró függvényhez ( $V(\lambda)$ ) való illesztését minősíti százalékos értékkel, szabványos CIE A megvilágító [] esetén. A tökéletesen, azaz hiba nélkül illesztett érzékelő  $f_1'$  értéke nulla, míg a laboratóriumi műszerek érzékelői 1,5% alatti  $f_1'$ -vel bírnak. A (2.2) egyenlet segítségével határozhatjuk meg az  $f_1'$  értékét:

$$f_1' = \frac{\int_0^{\infty} |s^*(\lambda)_{\text{rel}} - V(\lambda)| d\lambda}{\int_0^{\infty} V(\lambda) d\lambda} \cdot 100\% , \quad (2.2)$$

$$\text{amelyben } s^*(\lambda)_{\text{rel}} = s(\lambda)_{\text{rel}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda)_A \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda)_A \cdot s(\lambda)_{\text{rel}} d\lambda} , \quad (2.3)$$

ahol:

- $V(\lambda)$ , az emberi látás spektrális fényhatásfok függvénye,
- $s(\lambda)_{\text{rel}}$ , a detektor spektrális érzékenységet jellemző függvény,
- $s^*(\lambda)_{\text{rel}}$ , a detektor spektrális érzékenységének normált függvénye,
- $S(\lambda)_A$ , a szabványos CIE A megvilágító spektrális teljesítmény eloszlása.

Láthatjuk, hogy a (2.2) egyenlet számlálójában szerepel a detektor  $s^*(\lambda)_{\text{rel}}$  normált spektrálérzékenysége, valamint a  $V(\lambda)$  függvény. Az  $s^*(\lambda)_{\text{rel}}$  normált spektrálérzékenység azért szükséges, hogy a  $V(\lambda)$  függvénnyel való összehasonlítás előtt a műszerkalibrálás szokásos menetét elvégezzük. Ennek megfelelően az értékelendő detektor relatív színeképi érzékenységét kalibráljuk a szabványos CIE A megvilágító sugárzáseloszlásával, azaz a (2.2) egyenlet szerint az  $S(\lambda)_A$  kalibráló sugárzáseloszlás  $V(\lambda)$ -val vett integrálját és ugyanennek a sugárzáseloszlásnak a detektor relatív színeképi érzékenységgel vett integráljainak a hányadosával. Így biztosítjuk azt, hogy a detektor jele szabványos CIE A megvilágító mérése esetén megegyezik az elméleti  $V(\lambda)$  függvénnyel történő súlyozás eredményével.

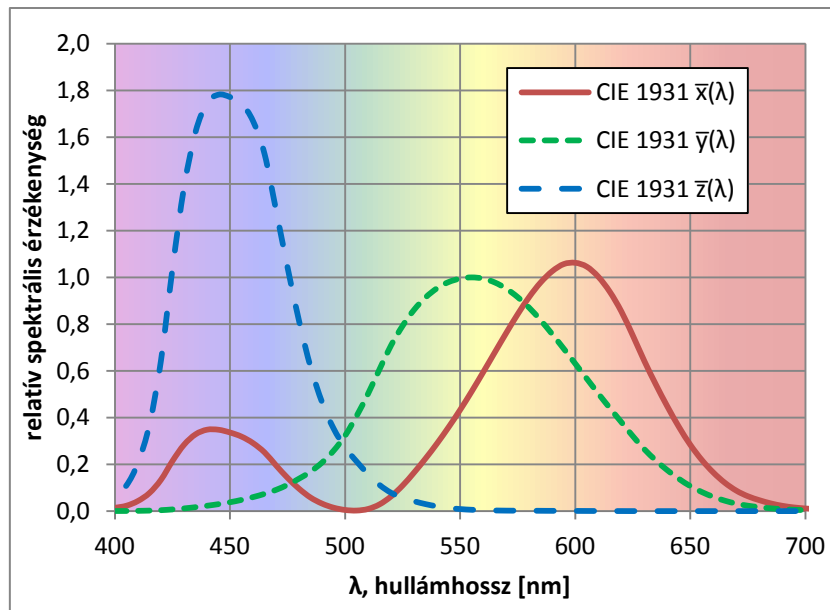
A nevezőben a  $V(\lambda)$  függvény területének értékét láthatjuk, amely általában annak közelítő értéke. A számláló integráljában az abszolútérték elhagyásával a különböző előjelű eltérések kiejthetnék egymást, aminek következtében nem kapnánk valós képet a teljes tartományon értelmezett illesztetlenségről.

A (2.2) és (2.3) egyenletekben megjelölt integrálási tartomány az integrálon belül található függvények közül a  $V(\lambda)$  értelmezési tartománya miatt praktikusán a látható hullámhossztartományra (380 nm – 780 nm) korlátozódik.

## 2.3.Színingermetrika

### 2.3.1. A színingermetrika alapjai

A színingermetrika a méréstudományon belül olyan terület, amely a fotometriához hasonlóan (2.2 fejezet) az ember által észlelhető színingereket foglalja kvantitatív rendszerbe. A XX. század elején végzett vizuális kísérletek eredményei alapján a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE) szabványosította a színmérés alapját képező színinger-megfeleltető függvényeket (SZMF), amelyek jellemezik az átlagos emberi észlelő színészleletét. Ezt a képzeletbeli észlelőt nevezzük a *szabványos színinger mérő észlelőnek*, akinek a színinger-megfeleltető függvényei (SZMF) segítségével számszerűsíthetők a különböző színingerek.



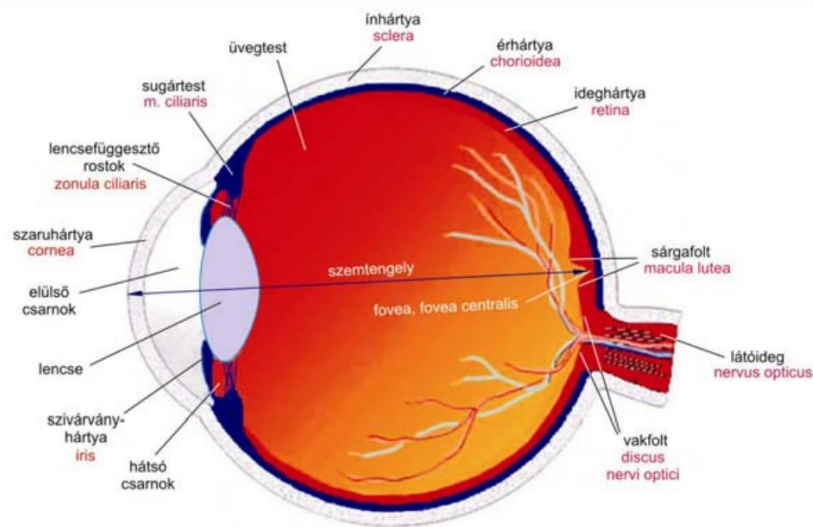
2.7. ábra

*A CIE 1931-es 2°-os szabványos színíngermérő-észlelő színíngermegfeleltető függvényei*

A színíngermetrikai problémák megértéséhez szükséges áttekintenünk az ember látási rendszerének főbb alkotóelemeit, azok tulajdonságait és szabályszerűségeit. A látási rendszerünk a színes látást a fényérzékeny sejtek, a csapok segítségével tudja megvalósítani. Biokémiai folyamat során rodopszin molekula abszorbeálja a fotonokat, majd ennek hatására keletkeznek az idegrendszerünk által is értelmezhető villamos jelek, amelyek az agy felé való továbbítás előtt még retinálisan több, párhuzamos jelfeldolgozási fázisban vesznek részt.

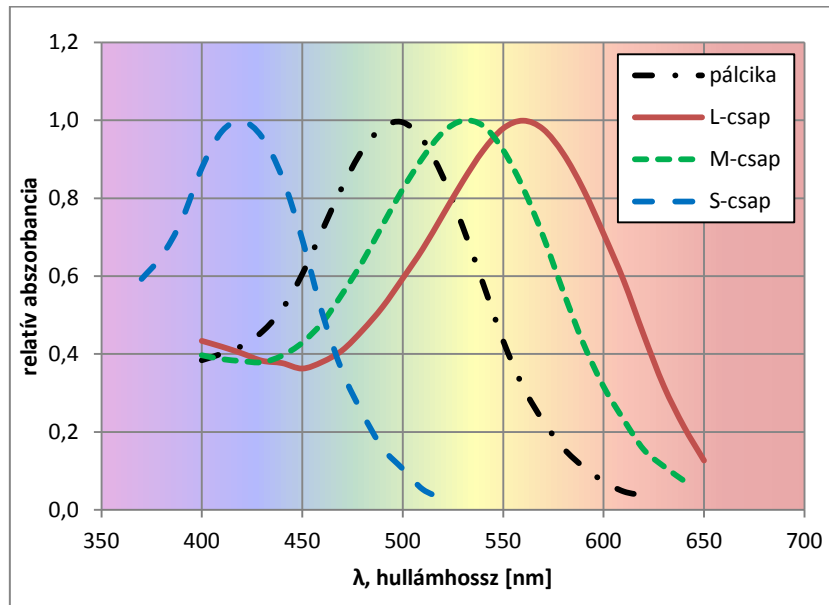
A szem szerkezetét mutatja a 2.8. ábra, itt láthatjuk a szemet kívülről határoló szaruhártyát és az ínhártyát, valamint a szem optikai rendszerének egyik leképező alkotóelemét, a szemlencsét. A csapérzékelők az ideghártyán (retina) helyezkednek el és három típusát az érzékelt fény hullámhossza alapján nevezhetjük hosszú (long) hullámhosszra, közepes (middle) hullámhosszra és rövid (short) hullámhosszra érzékeny csapoknak, azaz az angol elnevezésekből adódóan rendre L-, M-, vagy S-csapoknak. A csapok a fovea központi területén (fovea centralis) sűrűbben helyezkednek el, amely területen pálcikák nem is találhatóak.

A 2.9. ábra segítségével a csapok és pálcikák színképi abszorbanciáját hasonlíthatjuk össze, amely szoros kapcsolatban áll a receptorok érzékenységeivel hiszen egy érzékelő sejt csak olyan hullámhosszú fotonokra lehet érzékeny, amelyeknek valamekkora hányadát abszorbeálja.



2.8. ábra

*Az emberi szem felépítése*

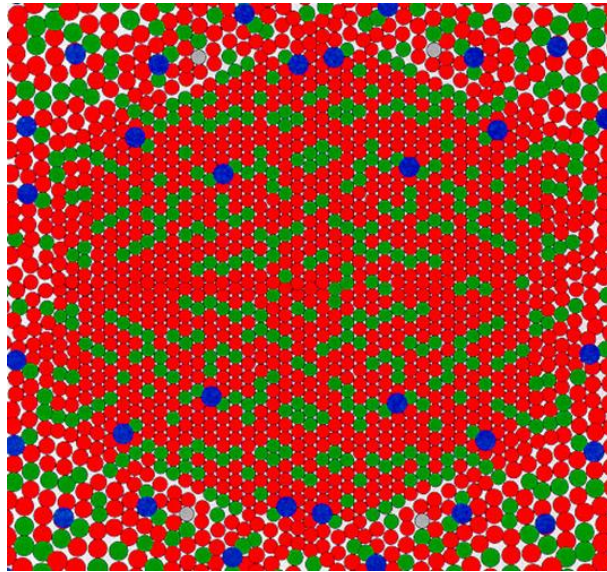


2.9. ábra

*A csapok és pálcikák színképi abszorbanca függvényei [12]*

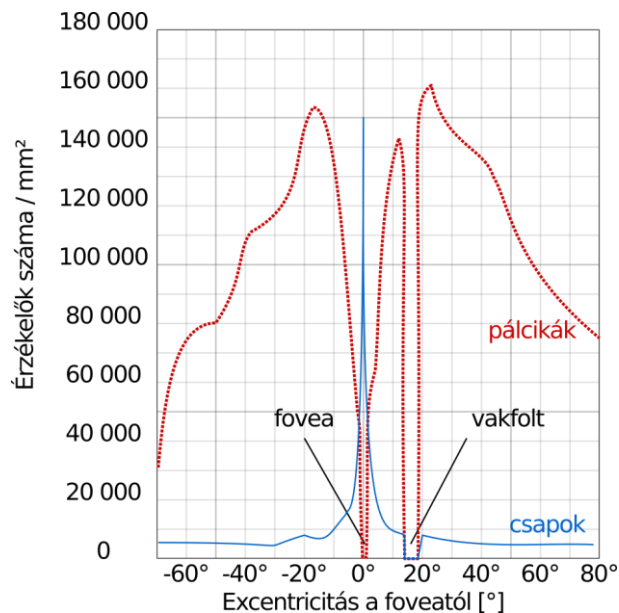
A színészleletet a megvilágító által sugárzott teljesítmény színképi eloszlása és a kérdéses terület felületi tulajdonságai mellett a látószög nagysága is befolyásolja, ami abból következik, hogy a retinán a különböző típusú csapok (L-, M- és S-csapok) előfordulási aránya a foveától távolodva folyamatosan változik, amint azt a 2.10 és 2.11 ábrákon láthatjuk. A 2.10 ábrán látható eloszlás egy modellezett példa, hiszen embereken végzett mérések alapján a csapok eloszlásának varianciája igen nagy [13]. A színíngermetrika szempontjából ez lényeges, hiszen az előbbieket szerint nem egyezhet meg az érzékenységi görbéje egy kis

látószögű látási szituációban (pl. festőművész apró részletek festésekor), és egy nagy látószögű látási szituációban (pl. épület homlokzatának szemrevételezése). A jelenség színingermérő észlelőre gyakorolt hatását a 2.3.3-as alfejezetben tárgyalom.



2.10. ábra

*A fovealis retina sematikus szerkezete. A színes foltok a különböző érzékelősejteket jelölik (vörös: L-csap, zöld: M-csap, kék: S-csap, szürke: pálcika)*



2.11. ábra

*A retinán található érzékelők eloszlása a foveától (0°) való excentricitás függvényében [14]*

A retinán található fő érzékelő sejtek (csapok és pálcikák) kapcsolati rendszerében az érzékelőkből nem közvetlenül továbbítódik az ingerület az agy felé. Ez rengeteg idegpályát feltételezne a szem és a látókéreg között, valójában az érzékelőktől induló jelek a horizontális

sejtek, a különböző bipoláris sejtek és szintén többféle ganglionsejtek segítségével többszintű jelfeldolgozás után jutnak el az agyba, illetve azon belül a látókéregbe. A retinán történő jelfeldolgozás során az L-, M- és S-csapjelekből képződnek színi információkat továbbító ún. kromatikus jelcsatornák, illetve az L- és M- csapjelekből a világosság összehasonlítását szolgáló akromatikus jelcsatorna. A különböző típusú érzékelők közötti különbségek a színeképi érzékenységük mellett a fényingerre adott válaszüdejében is megtaláljuk, hiszen míg a pálcikák nagyságrendileg tizedmásodpercig integrálnak, addig a csapok csak egy-két századmásodpercig gyűjtik a fényingereket az ingerület továbbítása előtt.

### 2.3.2. Színingermetriai eszközök

A színingerek jellemzéséhez, illetve azok összehasonlításához a szabványos színingermérő rendszerben kell dolgoznunk. A CIE 1931-ben szabványosította az 1° és 4°-os látószög tartományban észlelt színingerek leírására szolgáló CIE 1931 2°-os színingermérő rendszerét. Ebben a rendszerben az észlelőt a színeképi érzékenységeivel reprezentáljuk, amelyeket a 2.7 ábrán már láthattuk és színingermegfeleltető függvényeknek (SZMF) hívunk. Ahhoz, hogy a színingermegfeleltető függvényeket használni tudjuk, szükségünk van a színészleletet kiváltó sugárzás – 2.1-es fejezetben tárgyalt – spektrális teljesítményeloszlására. Ekkor az  $X, Y$  és  $Z$  színingerösszetevőket a szerint határozhatjuk meg:

$$\begin{aligned} X &= k_m \int_{-\infty}^{\infty} \bar{x}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda, \\ Y &= k_m \int_{-\infty}^{\infty} \bar{y}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda, \\ Z &= k_m \int_{-\infty}^{\infty} \bar{z}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \tag{2.4}$$

ahol  $k_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

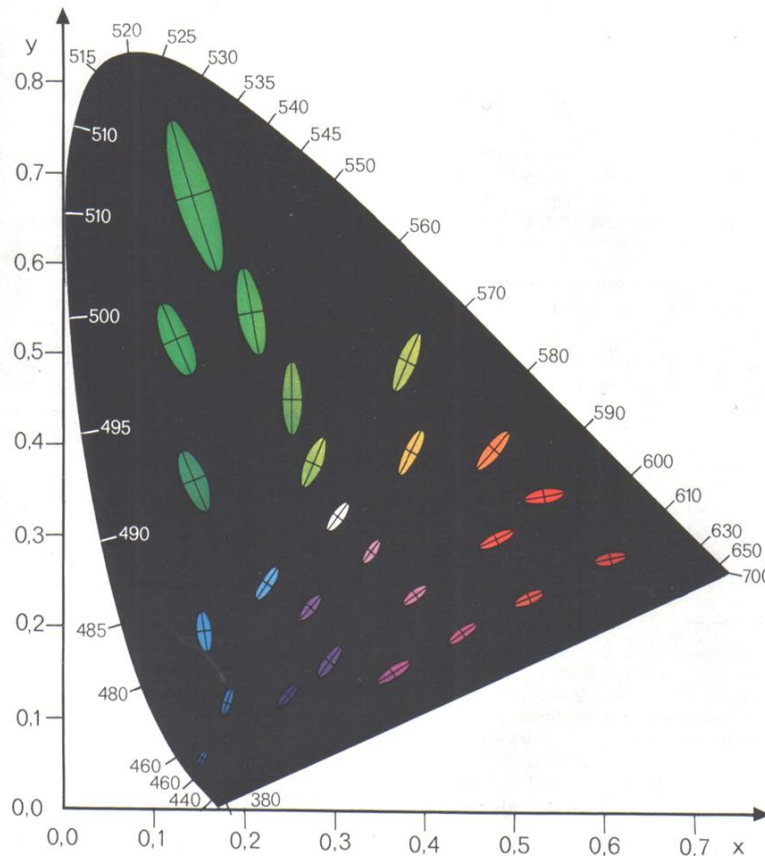
$\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  és  $\bar{z}(\lambda)$  a CIE 1931-es színingermérő-észlelő színingermegfeleltető függvényei.  $S(\lambda)$  a vizsgált színinger színeképi teljesítményeloszlása.

A színingerösszetevőkből a  $x, y$  színességi koordináták a (2.5) összefüggésekkel származtathatók.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, y = \frac{Y}{X + Y + Z} \tag{2.5}$$



A  $x,y$  színességi koordináták segítségével egy adott színingert elhelyezhetünk a teljes észlelhető színingertartományt reprezentáló diagramban, amelyet a 2.12-es ábra fekete, patkó alakú területe mutat.



2.12. ábra

*A CIE 1931-es színességi diagramja színezett MacAdam ellipszisekkel*

A fenti, CIE 1931-es színességi diagramban ugyan minden színinger megjeleníthető, viszont a diagram a színinger különbségeket tekintve nem nevezhető egyenközűnek. Ez azt jelenti, hogy a különböző területeken eltérő mértékű távolságokkal jellemezhető azonos mértékű színingerkülönbség. Ezt a jelenséget MacAdam vizsgálta vizuális kísérletekkel [15] és kapta eredményül a később róla elnevezett MacAdam ellipsziseket. Az ellipszisek azt jelzik, hogy mely területeken nem képes az átlagos észlelő a színingerek között különbséget tenni. A 2.12 ábra ellipszisei tízszeresen felnagyított méretben láthatóak, hogy az ellipszisek fő iránya egyértelműen felismerhető legyen a teljes diagramot egészében tekintve is. Később, a koordináták további transzformálásával MacAdam létrehozott egy egyenközűbb változatot, amelyet a CIE 1960-ban rendszeresített  $(u,v)$ . Ezt a változatot 1976-ban felváltotta egy, a további vizuális eredmények alapján is jobbnak bizonyuló egyenközű színingertér, a CIE

1976 ( $u',v'$ ) színingertér. Az 1960-as változat használatát ugyan beszüntették színingerek összehasonlításával kapcsolatban, de a CIE 15-ös azonosítójú, a színingermetriát összefoglaló publikációjának 2004-es változatában még közvetett módon használják a korrelált színhőmérséklet kiszámításának leírásában. [16]

### 2.3.3. Színinger-egyeztetéssel kapcsolatos kutatások és módszerek

Az előző alfejezetekben az ember látási rendszerét és a színingermetrika eszköztárát ismerhettük meg, azonban meg kell jegyezni, hogy a színingermetrika 1931-es szabványosításakor még nem állt ilyen részletes ismeretanyag rendelkezésre az emberi fényérzékelő sejtekről. Ekkor született a szabványos színingermérő észlelő és a hozzá kapcsolható színinger-megfeleltető függvényrendszer (2.7 ábra). A színinger-megfeleltető függvények első szabványos megfogalmazását a CIE 1931-ben fogadta el [17], Wright [18,19] és Guild [20] vizuális kísérletei alapján. (A szabvány elfogadásához vezető egyes vizsgálatok összefoglalása Prof. Wrightnek, a CIE színingermérő rendszer 50 éves jubileuma alkalmából írt visszaemlékezésében olvasható [21]. A két szerző egymástól független kísérletekkel határozta meg a valós alapszínekre (ezen színek additív keverésével állítják elő a vizsgálandó színnel vizuálisan megegyező színingert) vonatkozó rendszerét. Mindkét kísérletben az alapszínek mennyiségét a CIE 1924-ben jóváhagyott fotometriai rendszerében mérték [4]. 1924-ben – és az azt megelőző években a mérés technikai háttér még nem volt olyan fejlett, mint napjainkban. A rákövetkező évtizedekben több szerző is rámutatott arra, hogy a fotometriai rendszer alapját képező empirikus  $V(\lambda)$  függvény (ún. láthatósági, pontosabban spektrális fényhatásfok függvény) nem pontosan követi az ember látási rendszerének színeképi érzékenységét. Ezen vizsgálatokat Judd foglalta össze 1951-ben és terjesztett a CIE elé javaslatot a  $V(\lambda)$  függvény és a SZMF-ek módosítására [22]. Ezen módosításokat akkor nem fogadta el a CIE, mert az akkor szokásos fényforrások és színmérési feladatok megoldásában nem hozott volna lényeges javulást.

Az ötvenes és hatvanas években rohamosan fejlődött a mérés technika is és a látásmechanizmus megismerése is. A Smith és Pokorny csap-érzékenység spektrumokat [23] a látásfiziológusok elfogadták, ezek alapján Vos javított SZMF-eket javasolt [24].

A szem szerkezetének jobb megismerése során az is nyilvánvalóvá vált, hogy az eredetileg 2°-os látómezővel végzett SZMF meghatározások nagyobb látómező esetén nagyobb hibákhoz vezet, mivel a szem középső 2°-os tartományát (fovea) sárgás pigment takarja le (macula lutea), s ezért annak színeképi érzékenysége különbözik a perifériálisabb részek (10°-os tartomány) érzékenységétől. Stiles és Burch végzett színinger megfeleltető kísérleteket,

mind 2°-os, mind 10°-os látómezővel [25,26] (sajnos 2°-os mérést csak nagyon kevés hullámhosszon). Ők a fizikai méréseket már nem fotometriai, hanem radiometriai mennyiségeket használva végezték, így azok attól a hibától, amely a  $V(\lambda)$  függvény használatából származik, mentesek voltak. Méréseik alapján, és Speranskaya méréseiből hozta létre a CIE a 10°-os színíngermérő rendszert [27], amely már jobb egyezést biztosított a vizuális megfigyelések és a fizikai mérések között.

1991-ben a CIE technikai bizottságot hozott létre, a vizuális megfigyelésekkel jobban egyező színmérési rendszer megalkotására [28]. Ez a fiziológiai optika területén működő szakemberek számára kívánta a fiziológiai vizsgálatok számára egységes adatbázist biztosítani. A rendelkezésre álló mérési adatokat elemezve arra a következtetésre jutottak, hogy a legmegbízhatóbb fizikai méréseknek Stiles és Burch mérései bizonyultak. Speranskaya adatait nem vették figyelembe, mert azok alacsony fénysűrűségek mellett készültek és a sötétben látásért felelős pálcikák kölcsönhatását nem tudták kellő pontossággal figyelembe venni. A látási rendszer különböző közegeinek spektrális áteresztését meghatározva, és az ún. König hipotézissel élve – miszerint azon szintévesztőknek, akiknek valamelyik (L- vagy M-) pigmentje hiányzik, a működő pigmentjeinek színképi érzékenysége megfelel az épszínlátók pigmentjeinek színképével – Stockman és munkatársai javaslatot tettek LMS mechanizmusokra [29,30].

Már Guild és Wright eredményei is a mért görbék szórását mutatták, hasonló jelenséget lehet Stiles és Guild méréseinél is megfigyelni. Természetesen minden megfigyelő bizonyos szóráson belül tudja a méréseit megismételni, de a más eszközökkel ép-színlátónak kategorizált megfigyelők között is lehet személyfüggő eltéréseket találni. Sarkar analizálta Stiles és Burch megfigyelőinek adatait és arra a következtetésre jutott, hogy a megfigyelőket nyolc nagy csoportba lehetett beosztani [31]. Sajnos Stiles és Burch megfigyelőinek genotypiai besorolása nem áll rendelkezésre, de Neitz és Neitz munkája alapján a kisebb színképi érzékenység különbségek fiziológiai okaira is fény derült [32].

Egy szabvány alapjául csak egyetlen átlagos megfigyelő adatsort szolgálhat, a további feladat csupán az lehet, hogy meghatározzuk, hogy a gyakrabban előforduló változatok (pl. Sarkar nyolc csoportja), mekkora színkülönbséget eredményezhetnek adott mérési feladat megoldásánál. Az átlagos SZMF-eket addig a szintig érdemes finomítani, amíg el nem érjük a populációban előforduló variánsok következtében található különbségek okozta eltéréseket<sup>1</sup>.

---

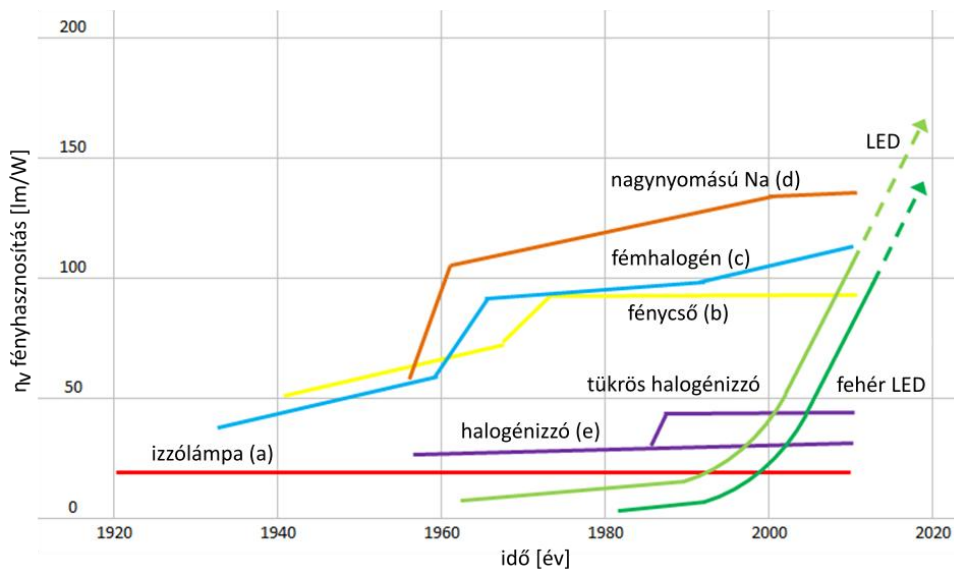
<sup>1</sup> A disszertáció végén erre a kérdésre még visszatérek, mert televíziós társaságok részéről ezzel kapcsolatos konkrét kérdés merült fel.

A CIE TC 1-36 a szem korneájára vonatkozóan közzétette az LMS-SZMF-eket, mind az alkalmazott látótér értékét, mind a megfigyelő életkorát paraméter formájában figyelembe véve. Az LMS – XYZ transzformációra, hogy hagyományos színmérési feladatokhoz is ki lehessen próbálni, a disszertációm írásának kezdetekor még nem állt jóváhagyott transzformáció rendelkezésre, a bizottság negyedik tervezetéből vettem a feltételeken – vizsgálatra szánt – transzformációs mátrixot:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_{MF}(\lambda) \\ \bar{y}_{MF}(\lambda) \\ \bar{z}_{MF}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,91098800 & -1,39465800 & 0,38931700 \\ 0,64315100 & 0,39594600 & 0,00000000 \\ 0,00000000 & 0,00000000 & 1,91933900 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l(\lambda) \\ m(\lambda) \\ s(\lambda) \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

## 2.4.Fényforrás technológiák

Az emberiség az ősidők óta próbálkozott azzal, hogy különböző fényforrásokkal segítse a sötétben való tájékozódását, de csak a XX. század elejére jutott odáig, hogy tűrhető hatásfokú fényforrásokat tudjon előállítani. A 2.13. ábra a villamos teljesítmény átalakításának elvén működő különböző fényforrások fényhasznosításának fejlődését mutatja [33]. Kezdetben próbálkoztak szabadon égő ívlámpákkal, de elfogadható élettartamot ezekkel nem tudtak elérni. Az izzószálas (a) megoldásnál is hatékonyabbnak bizonyultak a kis- és nagynyomású gázkisülőlámpák. A fénycsövek számos területen a világítás fő eszközeivé váltak (b). Napjainkban a legtöbbet használt nagynyomású gázkisülőlámpa típusok a fémhalogén lámpák (c) és a nagynyomású nátrium-lámpák (d), amelyek fényhasznosítása 100 lm/W és 150 lm/W között van. Közben az ötvenes években az izzólámpák egy új családja fejlődött ki, a halogénizzólámpáké (e), melyek 20 lm/W – 25 lm/W-os fényhasznosítással rendelkeznek.

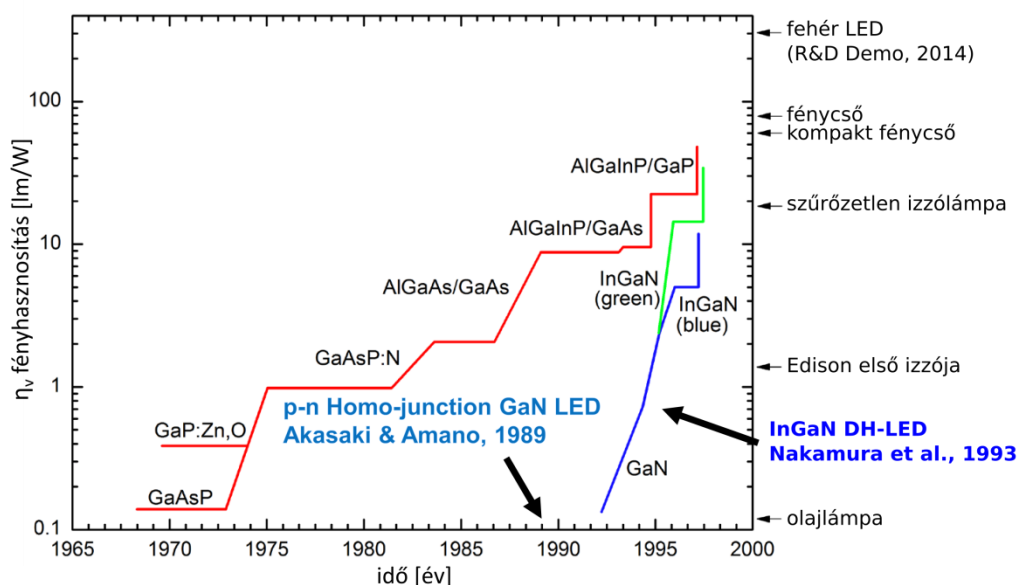


2.13. ábra

*Elektromos fényforrások fényhasznosításának fejlődése [34]*

Az első elektrolumineszcens jelenséget a XX. század elején H. J. Round [35] figyelte meg SiC-on, majd pár évtizeddel később többek között Loszev [36] és Destriaux [37] foglalkozott a különböző elektrolumineszcencia jelenségekkel. Az elektrolumineszcencia területén komoly áttörést a világítódiodák kifejlesztése hozott. Az első kísérletek az 1960-as években történtek [38] GaAsP alapú diódákkal, de az 1 lm/W-os fényhasznosítást csak a 70-es évek közepén érték el.

Az 1980-as évek végére érték el a 10 lm/W-os fényhasznosítást (2.13. ábra, f), AlInGaP elegykristályok segítségével. A 2.14. ábra mutatja be a világítódiodák fejlődését a kezdetektől napjainkig [33]. A 10 lm/W fényhasznosítás elérésével a LED-ek már a hagyományos fényforrásokkal bizonyos területeken versenyképessé váltak. A színes világítódioda alapú fényforrások keskenysávú sugárzást hoznak létre, és így például jelzőfényként sokkal gazdaságosabban hasznosítják a villamos energiát, mint a hagyományos fényforrások különböző színszűrő optikákkal.



2.14. ábra

*Különböző összetételű világítódiodák megjelenési időpontja és az azokkal elért fényhasznosítások [39]*

A világítódiodáknak egy új családja született az 1990-es évek elején, amikor megalkották a GaN és InGaN alapú félvezető világítódiodákat, amelyek már a látható színek kék tartományában is emittáltak. A GaN alapú dióda sugárzásával fényport gerjesztve sikerült jó fényhasznosítású fehéren fényt adó LED-et készíteni. 2014-ben a Nobel-díjbizottság ezt a felfedezést a fizikai Nobel díj odaítélésével jutalmazta a három japán közreműködőnek: Isamu Akasaki-nek, Hiroshi Amano-nak és Shuji Nakamura-nak a 1990-es években végzett [40,41]. A fehér LED-ek fényhasznosítása – laboratóriumi körülmények között – mára már átlépte a 300 lm/W-os értéket. A kereskedelmi forgalomban kapható LED-lámpák 100 lm/W – 150 lm/W-os, vagy nagyobb fényhasznosításaikkal mára egyértelműen a hagyományos fényforrások versenytársaivá váltak.

#### 2.4.1. Az izzólámpák fizikai és színeképi tulajdonságai

Az izzólámpa feltalálása két névhez is köthető, Edison az Egyesült Államokban, míg Swan Angliában alkotta meg az első használható izzólámpát hozzávetőleg azonos időben, 1879-ben. Gyakorlatilag azonban Edison nevéhez kötjük az izzólámpa feltalálását, mert ő végezte a kapcsolódó technológiai és energiaellátási fejlesztéseket. Az izzólámpák korai fejlődésében a XX. század elején Juszt és Hanamann, magyar feltalálók is kivették részüket az izzószal kidolgozásának területén, az ő nevükhöz fűződik a vákuumban izzó, wolfram-szálalás technológia feltalálása. További magyar vonatkozása is van az izzólámpa történetének,

miszerint 1931-ben Bródy Imre elemezte a lehetséges töltőgázokat és dolgozta ki a kripton- és xenon-gáztöltések optimumát a lámpa hatékony működésének szempontjaiból.

Az izzólámpában található spirálozott izzószálat az azon átfolyó elektromos áram hevíti magas hőmérsékletre. A kisugárzott színekpi teljesítmény eloszlására legnagyobb mértékben az izzószál hőmérséklete van hatással. A halogénizzókban lejátszódó halogén körfolyamat tette lehetővé a hőmérséklet növelését változatlan élettartam mellett, ennek hatására növekedett az összfényáram és ennek köszönhetően jobb fényhasznosítást lehetett elérni.

Az izzólámpák hőmérsékleti sugárzók, vagyis az izzószálat magas hőmérsékletre hevítve kezdenek világítani. Az izzólámpák által kisugárzott optikai sugárzás a látható tartomány mellett javarészt a hosszabb hullámhosszakkal rendelkező infravörös tartományban keletkezik. A spektrális-teljesítményeloszlás a hevített anyag spektrális emisszivitásától és a hevítési hőmérséklettől is függ. A hőmérsékleti sugárzók között speciális csoportot alkotnak az üreg-, fekete-, vagy Planck-sugárzók, ezeknek a spektrális sugársűrűségét a  $T$  hőmérséklet és a  $\lambda$  hullámhossz függvényében az alábbi összefüggés írja le:

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (2.7)$$

ahol  $L_{e,\lambda}(\lambda, T)$  a spektrális sugársűrűség,

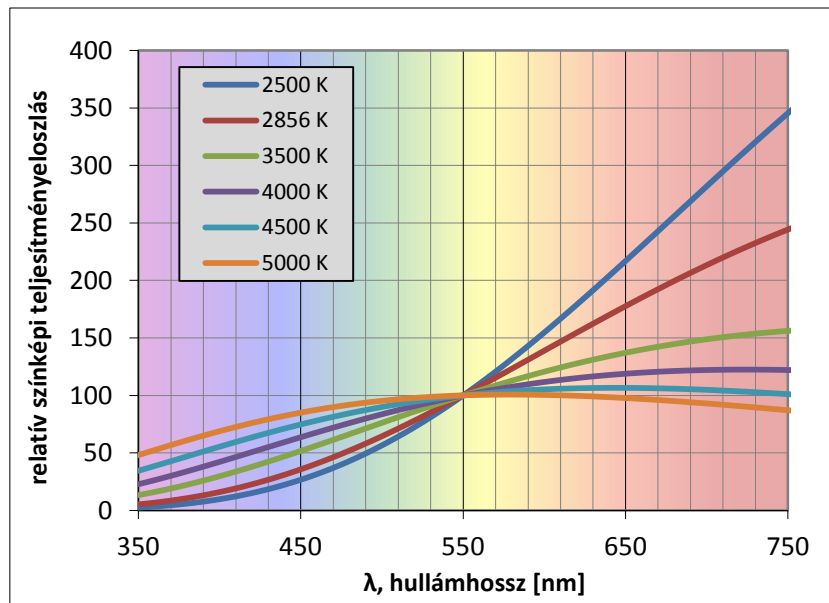
$$c_1 = 2\pi hc_0^2,$$

$$c_2 = hc_0 / k = (1,438769 \pm 0,000012) \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K},$$

$c_0$  a fénysebesség légüres térben,

$k$  a Boltzmann állandó,

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}, \text{ a Planck-féle állandó.}$$



2.15. ábra

*Különböző hőmérsékletű Planck-sugárzó spektrális-teljesítményeloszlások a látható színek tartományban (550 nm-re normálva)*

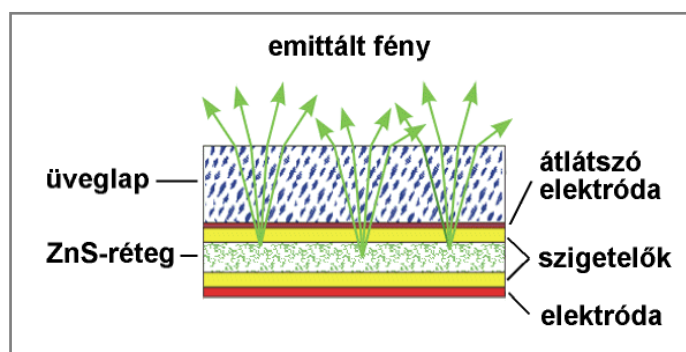
A 2.15. ábrán a (2.7) összefüggéssel meghatározott különböző hőmérsékletű Planck-sugárzó színeképi-teljesítményeloszlások láthatóak. Az adatsorokat a  $\lambda = 550$  nm-es hullámhossznál található függvényértékekhez normáltam. A feltüntetett 2 500 K és 5 000 K közötti színhőmérséklettel rendelkező színeképi-teljesítményeloszlások közül kiemelendő a 2 856 K színhőmérsékletű görbe, amely a CIE által szabványosított megvilágítók közül a CIE A jelű, és amelynek a színeképi teljesítmény eloszlását a 2 856 K hőmérsékletű Planck sugárzóval lehet numerikus formában előállítani.

#### 2.4.2. A LED-ek fizikai és színeképi tulajdonságai

A LED kifejezés a fénykibocsátó dióda (Light Emitting Diode) angol nyelvű kifejezés rövidítéséből származik és terjedt el ilyenformán a köznap használatban is. Az idegen nyelvű elnevezés magyar megfelelője a világítódíóda, vagy fényemittáló dióda. A LED-ek olyan fényforrások, amelyek a villamos energiát közvetlenül képesek átalakítani fényenergiává, vagyis az elektrolumineszcens eszközök csoportjába tartoznak. Henry Joseph Round kapitány figyelte meg először az elektrolumineszcens jelenséget (1907-ben) [35]. Szilícium-karbid kristályból készített ún. rádiódetektoron egyenáramot átvezetve tapasztalta azt, hogy a kristály sárga fényt bocsátott ki. A jelenséget az 1920-as években Loszev vizsgálta részletesen [36], ezért sokszor Loszev-effektusként is említik.



A másik korai elektrolumineszcencia kísérletet Destriaux végezte 1936-ban [37] (2.16. ábra), Destriaux cink-szulfid (ZnS) fényport ágyazott be kötőanyagba és ezt helyezte két elektróda közé.



2.16. ábra

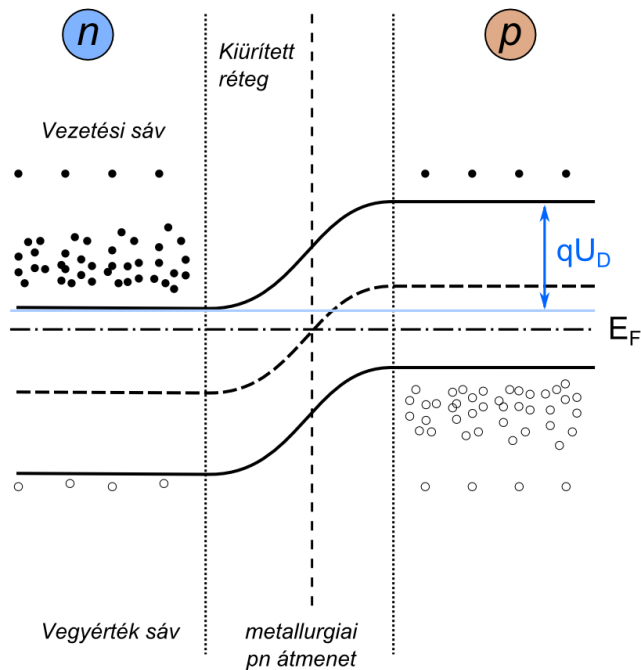
*A Destriaux cella struktúrája*

A félvezetőben keletkező fény csúcshullámhossza és a félvezető anyag tiltott sáv szélessége egyértelmű kapcsolatban van. Ennek megfelelően ahhoz, hogy a félvezető a látható színek tartományában emittáljon, tiltott sáv szélessége az 1,62 eV (vörös) és 3,26 eV (ibolya) közé kell, hogy essék. Direktsávú egy félvezető anyag akkor, ha a vezetési sáv minimum helye és a vegyérték sáv maximum helye azonos kvázi impulzus értékhez tartozik. Csak ekkor beszélhetünk világítódiodáról ugyanis a fényemisszió csak ún. direkt rekombináció esetén tud létrejönni. Az elektronikában legtöbbször használt Si tiltott sáv szélessége ennél kisebb (1,2 eV), vagyis a kibocsátott sugárzás – ha ilyen létrejön – az infravörös tartományba esik. A **2-I.** táblázat felsorol – a teljesség igénye nélkül – pár tipikus anyagösszetételhez rendelhető színezetet, tiltott sáv szélességet és a kapcsolódó emissziós hullámhossztartományokat.

## 2-I. táblázat

Tiltott sáv szélességek és a rekombináció során kilépő foton hullámhosszának kapcsolata

ibolya GaN	kék GaN	zöld InGaN/GaP	sárga GaAs <sub>0,2</sub> P <sub>0,8</sub>	narancs színű GaAs <sub>0,4</sub> P <sub>0,6</sub>	vörös GaAs	infravörös GaAlAs
~3,17 eV	~2,73 eV	~2,52 eV	~2,15 eV	~2,08 eV	~1,62 eV	~1,42 eV
400 nm		500 nm		600 nm		700 nm



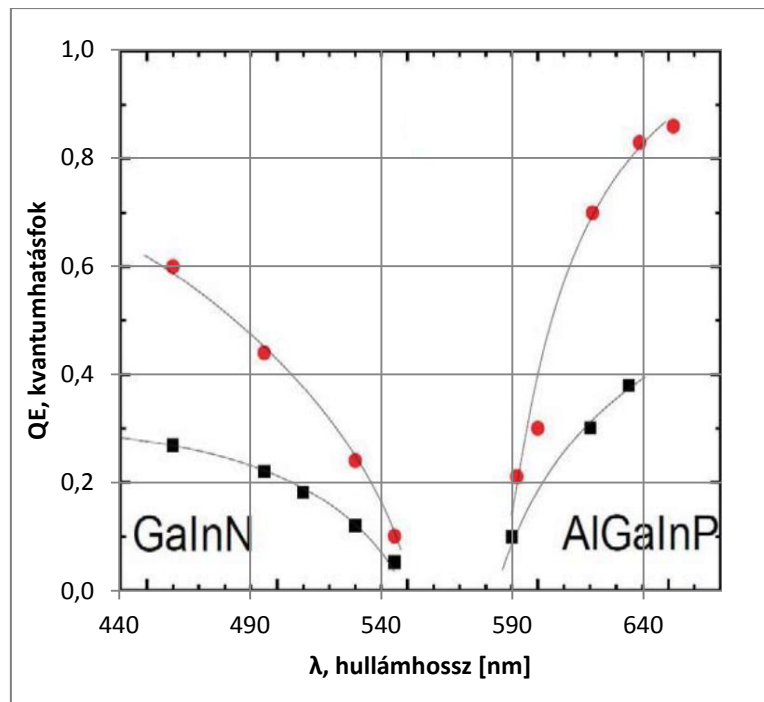
2.17. ábra

*A félvezető pn átmenetének egyszerűsített energia sávképe zéró külső feszültség esetén[42]*

A p-típusú kristályban szabad lyukak vannak (üres körök), az n-típusú kristályban szabad elektronok (teli körök). Szaggatott vonal jelzi a Fermi-nívót (ez, az az energiaszint, ameddig abszolút nulla fokon minden energiaállapot be van töltve). A világítódiodákban lezajló injekciós és rekombinációs folyamat egyszerűsített képét a 2.17. ábra mutatja. Az ábra bal oldalán láthatjuk az anyag n-típusú, a jobb oldalán a p-típusú összetevőit, a pn átmenet külső feszültség nélküli állapota látható. Ebben az esetben ún. homo-átmenetes félvezetőkről beszélhetünk, ami azt jelenti, hogy a pn átmenet alkotói azonos tiltott sáv szélességgel rendelkeznek. Az elektronok diffúziós távolsága nagyobb, mint a lyukaké és ez azonos szinten tartott szennyező koncentráció esetén komoly melegeledést is eredményezhet. A hetero-átmenetes félvezetőkben a kémiai koncentráció az átmeneten belüli pozíciótól függ. A legegyszerűbb hetero-átmenetes összetételben két, különböző tiltott sáv szélességű anyagot használnak. Ezzel a technikával a nagyobb tiltott sáv szélességű anyagok használata is lehetővé vált és tovább nőtt a sugárzásos rekombinációk valószínűsége. A további fejlesztések során megjelentek a dupla hetero-átmenetek és a többszörös kvantumvölgyes hetero-átmenetes struktúrák is. Ebben a munkában végeztek úttörő tevékenységet Nakamura és munkatársai [40,41].

Világítódiodák segítségével fehér fény a következő módon állítható elő: kék fényt emittáló LED-et a kék besugárzásra gerjedő sárgásan világító fényporról vonnak be, amelyek eredő

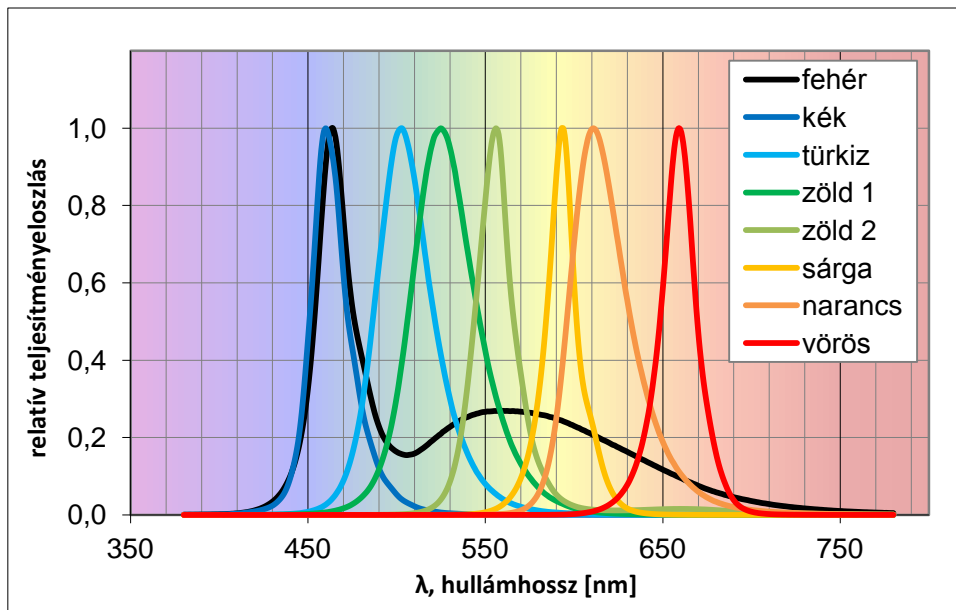
színképe már fehér fényingert kelt az észleelőben. Ilyen színképet mutat a 2.19. ábra feketével jelölt görbéje. A gerjesztő LED és fénypor kombinálásával ma már nem csak fehér LED-eket készítenek, hanem színes fény előállítására is használják ezt a módszert a színkép azon területén, ahol a félvezetők kvantumhatásfoka a legrosszabb, azaz a zöldessárga és a borostyán színképtartományokban (2.18) 540 nm és 600 nm között.



2.18. ábra

*Különböző összetételű LED-ek csúcshullámhossz és kvantumhatásfok függvénye (a körök a belső kvantumhatásfokot, a négyzetek a külső kvantumhatásfokot jelölik) [43]*

A színképi-teljesítményeloszlás maximumát a félvezető anyag tiltott sáv szélessége határozza meg, az eloszlás alakját pedig az, hogy milyen arányban található elektronok a vezetési sáv aljában és milyen a szabad helyek eloszlása a vegyértékkötési sáv tetején. A 2.19. ábra jellegzetes világítódioda színképeket mutat. A ma használatos színes világítódiodák emissziós sávjának félérték-szélessége 15 nm – 50 nm.



2.19. ábra

### *LED színekpi-teljesítményeloszlások*

Minden fény-, vagy sugárforrás használhatóságát nagyban meghatározza a keletkezett fény működés közbeni állandósága. Fényforrások esetében a stabilitást több szempontból is vizsgálhatjuk (reverzibilis változások és öregedés, a keltett fény mennyiségi és minőségi változása stb.). A dolgozat témájához alapvetően egy kvalitatív, és egy kvantitatív jellemző kapcsolódik. A kvalitatív jellemző a fényforrás által kibocsátott sugárzás színekpi összetételének stabilitása, ami szorosán összefügg a kvantitatív – fotometriai – jellemzővel is. A stabilitás jellemzésekor beszélhetünk *rövid-, közepes-, és hosszú idejű* stabilitásról.

A *rövid idejű stabilitás* a fényforrás teljes élettartama alatt többször – minden bekapcsoláskor – ismétlődő folyamat, általában azt a folyamatot jellemzi, amely a mindenkori bekapcsolás pillanatától a stabil üzemi hőmérséklet eléréséig tart (ez általában egybeesik a fényáram stabilizálódásával). A gyakorlatban ez az időtartam néhány másodperctől, akár percekig is terjedhet. Ebből a szempontból a leggyorsabb eszközök az izzólámpák, amelyek pár másodperc alatt elérik üzemi hőmérsékletüket, ezután a kibocsátott sugáráramuk (és annak színezete) a gyakorlati felhasználás számára már stabilnak tekinthető. Egy tipikus fénycső esetében a bemelegedési idő inkább percekben fejezhető ki és a kezdeti sugáráram akár a duplájára is nőhet miközben a színekpi összetétel is változhat, ennek hatására a színezet (fehér fénycső esetén a korrelált színhőmérséklet) is módosulhat. A LED-ek esetében szintén szükséges pár perc a fényáram stabilizációjához, azonban fontos megjegyezni, hogy míg a fénycsövek esetében akár +100%-os fényáram növekedés is adódhat, addig a LED-ek fényárama általában legfeljebb -30%-ot csökken a bemelegedés során. A LED-ek esetében a

fényáramcsökkenés a pn átmenet hőmérsékletnövekedése hatására következik be: ennek (termikus) időállandója határozza meg a stabil állapot elérésének idejét.

A *közepes időtartamú stabilitás* időszaka a gyártás utáni első bekapcsolástól addig az üzemóráig terjed, amikor a LED fénykibocsátása már az alkalmazás szempontjából stabilnak nevezhető és a keltett színinger sem mutat számottevő változást. A *hosszú idejű stabilitással* kapcsolatban kijelenthető, hogy a LED-ek számottevően hosszabb élettartammal rendelkeznek a többi fényforrásnál. Míg az izzólámpák, vagy fénycsövek esetében az élettartamuk végén megszűnnek világítani, addig a LED-ek esetében inkább folyamatos degradációról beszélhetünk.

Az IES-LM79-08 [44] amerikai ipari szabvány a szilárdtest fényforrások elektromos és fotometriai tesztelését részletezi. Az IES-LM80-08, pedig a LED fényforrások összfényáram stabilitásának mérésével foglalkozik [45], amelyből megtudhatjuk, hogy a szabvány egy LED élettartamának azt az üzemeltetési óraszámot tekinteni, amikor a LED összfényárama eléri a kezdeti összfényáram 70%-át (ezt L70-el jelöljük). A LED-es fényforrások meghibásodásának másik fajtája – a folyamatos degradáció mellett – a hirtelen meghibásodás, amikor a fénykeltés egyik pillanatról a másikra megszűnik. Ezt a fajta meghibásodást B-betűjellel azonosítja a szabvány és azt becsüli, hogy egy statisztikailag elégséges mintát tekintve az egyedek hány százaléka fog meghibásodni az adott élettartam elérése előtt. A B10 = 20 000 óra például azt jelenti, hogy 20 000 üzemóra alatt az egyedek legfeljebb 10%-a fog meghibásodni.

### 3. Világítódiodák fotometriai jellemzése

Amikor fotometriáról beszélünk, akkor mindig olyan mérésekről van szó, amelyek a szabványos fénymérő észlelő láthatósági függvényével – a  $V(\lambda)$ -val – súlyozzák az érzékelt elektromágneses sugárzás színeképi teljesítményeloszlását. A fejezetben ismertetem a világítódiodák által keltett fényingerek mérésének kihívásait, majd ezek tükrében bemutatom a fotométerek jellemzésére használható saját kutatási eredményeimet.

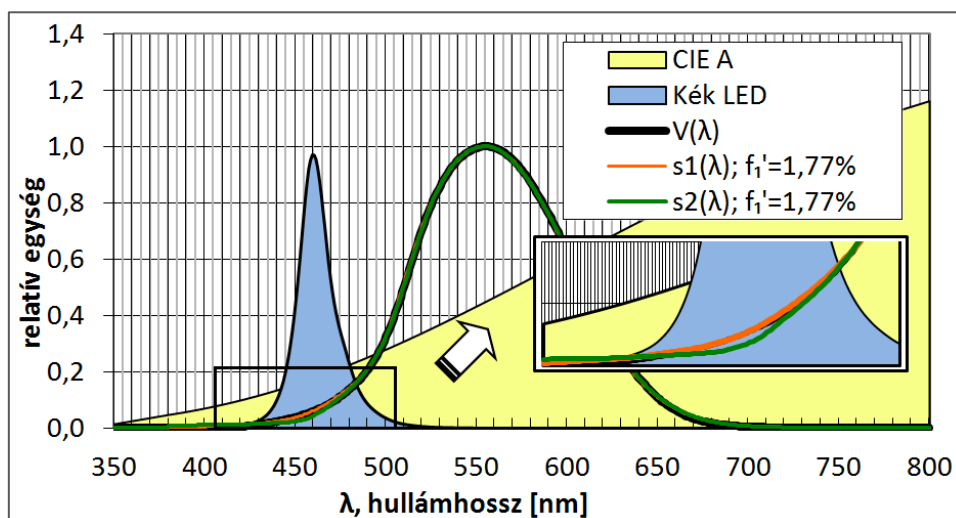
#### 3.1. Fotometriai hibák jellemzői

Mint ahogyan azt a 2.2.3 fejezetben láthattuk, az  $f_1'$  színeképi illesztettségi mutató százalékos értéke azt fejezi ki, hogy a detektor színeképi illesztettségből adódó fénymérési hiba a mért fényinger mekkora hányadát teszi ki. Ez a mutató azonban nem ad becslést arra, hogy mekkora maximális eltérésre számíthatunk egy fotometriai mérés esetén. Sajnálatos módon az  $f_1'$  értéke az eltérés irányáról sem hordoz információt, ezért a mérésben rejlő hiba korrekciójához nem használható. A mérés ilyen fajta hibája csak abban az esetben javítható, ha ismerjük mind a mérendő fényforrás színeképi teljesítmény eloszlását mind a detektor színeképi érzékenységét.

Fehér fényű LED-ek esetében az  $f_1'$  mutató hasonlóan jól használható a detektor mérési pontosságának becslésére, mint a széles sávban sugárzó fényforrásoknál, az izzólámpáknál. Ez annak köszönhető, hogy a fehér fényű LED-ek színeképi-teljesítményeloszlása is viszonylag széles. Ilyen esetekben az  $f_1'$  érték jól korrelál a mérési hibával: nagyobb  $f_1'$  esetén a várható hiba is nagyobb lesz. A CIE 127-es közleménye szerint fehér fényű LED fényforrásokat 3%-nál kisebb  $f_1'$  értékű detektorral mérjük [8].

Színes LED-ek esetében az  $f_1'$  illesztettségi mutató nem korrelál jól a várható hibával, előfordul, hogy két jó minőségű, pontosabban kis illesztettségi mutatóval (pl.  $f_1' < 2\%$ ) rendelkező detektor válasza között igen lényeges különbséget tapasztalunk színes LED által okozott megvilágítás mérésekor. Ennek oka, hogy a szélessávú referenciával kalibrált fotométerfej színeképi érzékenységének lehet olyan tartománya, ahol számottevő a különbség a  $V(\lambda)$  és az  $s(\lambda)_{\text{rel}}$  érzékenységi függvények között (3.1. ábra kerettel kiemelt része). Ez az eltérés a szélessávú etalonfényforrással történő kalibráláskor elenyésző mértékű és szinte ki sem tűnik. Amennyiben a vizsgált színes LED 20 nm – 40 nm-es széles teljesítményeloszlása ilyen tartományba esik, akkor a valódi fotometriai értéktől számottevően eltérő eredményt kaphatunk [46]. A 3.1. ábrán láthatunk két fényforrás színeképi teljesítmény eloszlását

(izzólámpa és kék LED), valamint két  $V(\lambda)$  illesztett érzékelő színeképi érzékenységi függvényének görbéjét ( $s_1(\lambda)$ ,  $s_2(\lambda)$ ). A kétféle érzékelővel való mérés szimulációjának segítségével mutatom be az érzékenység színeképi illesztetlenségeiből adódó hibákat. A **3-I.** táblázatban láthatjuk az érzékelőkkel szimulált mérések eredményeit. A két érzékelő színeképi érzékenysége eltér, viszont  $f_1'$  értékük egyezik (mindkét esetben 1,77%), mindkét érzékelő a CIE A megvilágítóval lett kalibrálva. Az izzólámpa és a kék LED fényforrások spektrális teljesítmény eloszlása rendre 50 lx, illetve 2 lx megvilágítást eredményez. Ezt az eredményt láthatjuk a  $V(\lambda)$  oszlopában. Az  $s_1(\lambda)$  és az  $s_2(\lambda)$  oszlopokban a két érzékelővel való mérés eredményeit láthatjuk a kétféle fényforrás esetén. Az „izzólámpa” jelű sorban a CIE A megvilágítóval történt kalibrációk eredményeként a mérési hiba nélküli megvilágítás értékeket láthatjuk mindegyik érzékelő oszlopában. A „kék LED” jelű sorban láthatjuk, hogy a két érzékelő mekkora megvilágítás értékeket érzékelt a kétféle besugárzás alatt. Láthatjuk, hogy az  $s_1(\lambda)$  jelű érzékelő 3,5%-kal többet mért a  $V(\lambda)$  segítségével számolt – valós – értékhez képest, míg az  $s_2(\lambda)$  jelű érzékelő ugyanarra a besugárzásra -12,9%-kal kisebb értéket adott. Az ilyen mértékű hiba a gyakorlatban nem elfogadható és ennek kiküszöbölésére kínál megoldást az általam kidolgozott detektor érzékenység jellemzési módszer alkalmazása. Korábban több szerző [47] is kísérletezett azzal, hogy a színeképilestési hibából eredő mérési hibát jobban leíró mutatót dolgozzon ki, ezeket ismertetem a következő fejezetben.



3.1. ábra

*Nagymértékű színeképi illesztetlenség a kék tartományban*

### 3-I. táblázat

Izzólámpa és kék LED által keltett megvilágítás mérésének eredménye két, jó minőségű (azonos  $f_1'$  értékű) detektorral ( $s_1(\lambda)$ ,  $s_2(\lambda)$ ) a szabványos CIE A megvilágítóval való kalibrálás után

	$V(\lambda)$	$s_1(\lambda)$	$s_2(\lambda)$
$f_1'$	0,00%	1,77%	1,77%
izzólámpa	50,00 lx	50,00 lx	50,00 lx
kék LED	2,00 lx	2,07 lx	1,74 lx
kék LED mérési hiba %		+3,5%	-12,9%

### 3.2. Detektorok érzékenységeinek illesztettsége a $V(\lambda)$ függvényhez

A 2.2.3 fejezetben láthattuk, hogy a detektorok színeképi érzékenységeinek illesztettségét az  $f_1'$  színeképi illesztetlenségi mutatóval jellemzik. Ennek az értéke megadja, hogy a kérdéses detektor érzékenysége mennyire jól illesztett az ember látási rendszerének színeképi érzékenységéhez, a  $V(\lambda)$ -függvényhez. A következőkben ismertetem az alternatív fénymérő érzékelő módszereket, továbbá megvizsgálom azt, hogy egy fotométer valódi fénymérési hibáját milyen módon lehet hatékonyan jellemezni.

#### 3.2.1. Az $f_{1,LED}$ színeképi illesztetlenségi mutatók

Színes fényű LED-ek mérése esetén a detektorok  $f_1'$  értékei alapján a fotometriai mérés hibája nem becsülhető jól. A kérdést Young és munkatársai részletesen analizálták [47], de a problémát megoldó javaslatot nem tettek. Később Y. Ohno és K. Muray is kidolgozott egy-egy javaslatot, amelyeket az  $f_{1,LED}$  mutatóval jelöltek [47]. Mindkét változat az  $f_1'$  (2.2) színeképi illesztetlenséget jellemző függvényen alapul. Az alábbi (3.1) függvény a (3.2) függvény szerint előállított LED spektrális-teljesítményeloszlások segítségével jellemzi a detektor színeképi érzékenységet.

$$F \{ S_{LED}(\lambda, \lambda_0) \} = \frac{\int_{380}^{780} S_{LED}(\lambda, \lambda_0) V(\lambda) d\lambda \int_{380}^{780} s(\lambda)_{rel} d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{LED}(\lambda, \lambda_0) s(\lambda)_{rel} d\lambda \int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda} \quad (3.1)$$

ahol:



- $V(\lambda)$ , az emberi látás spektrális fényhatásfok függvénye,
- $s(\lambda)_{\text{rel}}$ , a detektor színképi érzékenységet jellemző függvény,
- $S_{\text{LED}}(\lambda, \lambda_0)$ , LED modellfüggvény [47].

A LED színképet modellező függvény:

$$S_{\text{LED}}(\lambda, \lambda_0) = \frac{\{g(\lambda, \lambda_0) + 2g^5(\lambda, \lambda_0)\}}{3}, \quad (3.2)$$

ahol:

- $g(\lambda, \lambda_0) = \exp\left[-\left\{\frac{(-\lambda - \lambda_0)}{\Delta\lambda_{0,5}}\right\}^2\right]$ ,
- $\Delta\lambda_{0,5}$  paraméter a modellezett LED színkép félérték-szélessége,
- $\lambda_0$  a modell csúcspontjának hullámhossz értéke.

Az elgondolás szerint az  $f_{1,\text{LED}}$  alábbi két változata hivatott a színes LED-ek mérése esetén becslést adni a detektor mérési hibájára:

Y. Ohno változata:

$$f_{1,\text{YO}} = \text{Maximum} |F\{S_{\text{LED}}(\lambda, \lambda_0)\} - 1| \cdot 100\% \\ \lambda_0 = 450, 460, 470, \dots, 650 \text{ nm}, \Delta\lambda_{0,5} = 20 \text{ nm} \quad (3.3)$$

K. Muray változata:

$$f_{1,\text{KM}} = \text{Átlag} |F\{S_{\text{LED}}(\lambda, \lambda_0)\} - 1| \cdot 100\% \\ \lambda_0 = 400, 410, 420, \dots, 700 \text{ nm}, \Delta\lambda_{0,5} = 20 \text{ nm} \quad (3.4)$$

Az első (3.3) változatban a függvény a legnagyobb színképi eltérési jellemzőt választja ki a 450 nm – 650 nm-es hullámhossztartományból. A második (3.4) változatban a 400 nm – 700 nm-es hullámhossztartomány spektrális eltéréseinek jellemzőit átlagolja a függvény.

### 3.2.2. Detektorok relatív fénymérési hibáit jellemző PE függvény

A detektorok jellemzésére szolgáló színképi illesztettségi mutatók összehasonlítására bevezettem a két bemeneti paraméterrel rendelkező (3.5) PE relatív fénymérési hibafüggvényt [48]. A függvény segítségével meghatározhatjuk, hogy a tökéletlen  $V(\lambda)$  illesztés miatt egy  $s(\lambda)_{\text{rel}}$  relatív színképi érzékenyséű fotométer, egy  $S(\lambda)_{\text{LED}}$  színképi-teljesítményeloszlású

LED mérésekor mekkora relatív fénymérési hibát okoz a tökéletesen  $V(\lambda)$  illesztett érzékelőhöz képest.

$$PE\{s(\lambda)_{\text{rel}}, S(\lambda)_{\text{LED}}\} = \frac{\left| \int_{380}^{780} s^*(\lambda, \lambda_{\text{STD}}) S(\lambda)_{\text{LED}} d\lambda - \int_{380}^{780} V(\lambda) S(\lambda)_{\text{LED}} d\lambda \right|}{\int_{380}^{780} V(\lambda) S(\lambda)_{\text{LED}} d\lambda} \quad (3.5)$$

ahol:

- $V(\lambda)$ , a láthatósági függvény,
- $s(\lambda)_{\text{rel}}$ , az érzékelő relatív színeképi érzékenységet leíró függvény,
- $s^*(\lambda, \lambda_{\text{STD}})_{\text{rel}}$ , a detektor  $\lambda_{\text{STD}}$  domináns hullámhosszal rendelkező referencia LED-del  $S(\lambda)_{\text{STD}}$  normált színeképi érzékenységi függvénye,
- $S(\lambda)_{\text{LED}}$ , a mérendő LED színeképi teljesítmény eloszlása.

A (3.5) egyenletben szereplő függvények értékkészlete nemnegatív, hiszen színeképi teljesítményeloszlásokról és színeképi érzékenységi függvényekről van szó. Ahhoz, hogy a  $PE\{s(\lambda)_{\text{rel}}, S(\lambda)_{\text{LED}}\}$  csak pozitív értékeket vehessen fel, a számlálóban található különbség abszolút értékét képezem. E függvényt használhatjuk a különböző mutatók jóságának értékelésére is, hiszen segítségével meghatározhatjuk, hogy az adott mutató értéke mennyire korrelál jól a fotometriai hibával. A bemenő *érzékelő-LED* paraméter párosokat adatbázisból képezve a színeképi illesztettségi mutatók már jól összehasonlíthatóak.

A fentiek alapján megfogalmazom 1. tézisemet: A (3.5) szerinti valós fotometriai hibamutató alkalmas a különböző, ismert  $s(\lambda)_{\text{rel}}$  színeképi érzékenyséű fotométerek összehasonlítására.

### 3.2.3. Az $f_1'$ színeképi illesztettségi mutató és a valódi fotometriai hiba kapcsolata

A 3.2.1 fejezetben ismertetett két alternatív illesztettségi mutató hatékonyságának jellemzésére, illetve az ezeknél hatékonyabb mutató megalkotása érdekében a fotometriai hibákat két módon is számítottam, az első esetben a (3.2) összefüggés LED színeképi modellező függvényeinek segítségével generáltam a próba LED színeképi teljesítményeloszlásokat, majd ezekre számoltam egy sor detektor fotometriai hibáit. A **3-II.** táblázat *modell LED* oszlopában az  $f_1'$  és az  $f_{1,\text{LED}}$  mutatók és a kiszámított fotometriai hibák

közötti korrelációk együtthatóinak négyzetét láthatjuk. Y. Ohno ( $f_{1,LED\_YO}$ ) mutatója viszonylag jól korrelál a hibával, de amint a modellezet LED-ek helyett valódi LED színeképekkel számolunk, számottevően csökken a korreláció.

Számításaim alapján megállapítottam [48], hogy egyik színeképi illesztettségi mutató sem korrelál elfogadható mértékben valódi színes LED-ek mérésekor a várható hibával. A gyenge korrelációk két okra vezethetők vissza: az egyik, hogy a maximum érték kiválasztása (3.3), illetve az átlagolás (3.4) viszonylag széles hullámhossz-tartományon történik és így a mutató valójában csak a legrosszabb, illetve egy mindent átlagoló mutatóval igyekszik jellemezni a detektort. A másik ok, hogy kizárólag a modellezett LED (3.2) színeképi teljesítményeloszlásokkal számolnak, amelyek nem mindig helyettesítik jól a valós színeképeket. Az elemzés után kijelenthettem, hogy ezek a mutatók nem szolgáltatnak hasznosabb információt a klasszikus  $f'_1$  mutatónál, sőt valódi színes LED-ek esetében még annál is rosszabbak. A fejezetben bemutatott javaslatok hibáiból a tanulságokat leszűrve kidolgoztam a *parciális színeképi illesztettségi mutatót*.

### 3-II. táblázat

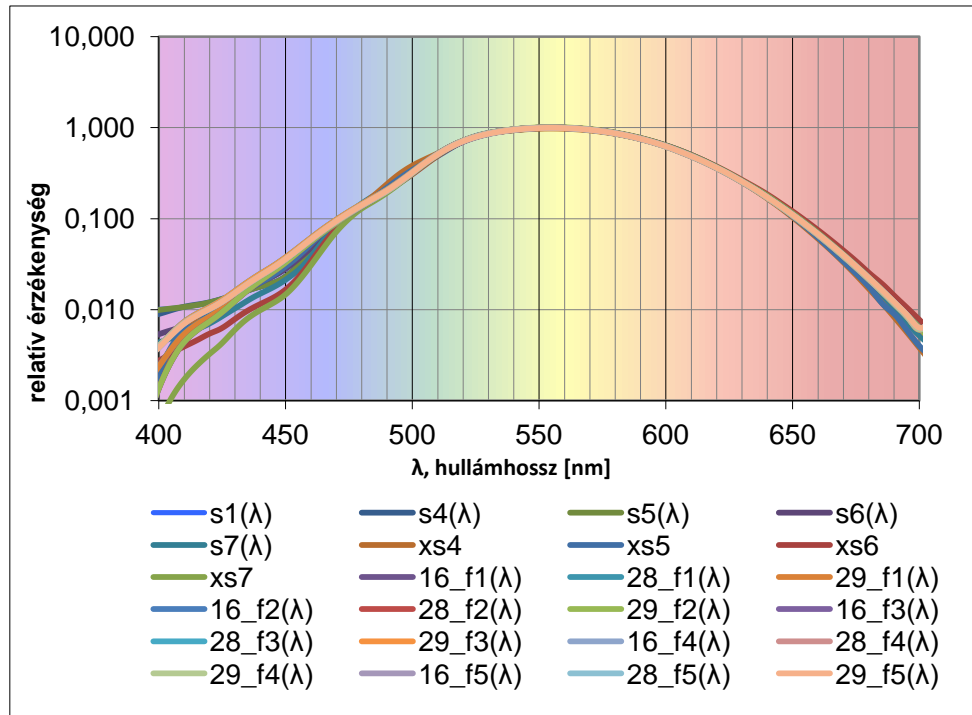
Az  $f_{1,LED}$  színeképi illesztettségi mutatók korrelációja a fotometriai hibával modellezett és valós LED színeképekkel számolva

illesztettségi mutató	$R^2$	
	modell LED	valós LED
$f'_1$	0,7798	0,7699
$f_{1,LED\_YO}$	0,8800	0,3922
$f_{1,LED\_KM}$	0,4714	0,0761

### 3.3. Az $f_{1,PAR}$ parciális színeképi illesztettségi mutató

Korábbi tanulmányokban [47] modellezett LED színeképi-teljesítményeloszlások segítségével optimalizálták a színes LED-ek fénymérőinek jellemzésére szolgáló mutatókat. Ezek a színeképi-teljesítményeloszlás modellek azonban a szigorúan szimmetrikus jellegük miatt újabb hibákat eredményeztek. Az  $f_{1,PAR}$  formula paramétereinek meghatározásához valódi LED színeképi-teljesítményeloszlásokat és valódi fotométer érzékenységeket használtam az adatbázisba rendezett, közel 100 darab színes LED színekép és 29 darab detektor színeképi érzékenysége közül. A detektorok többsége (24 db) igen jónak számító színeképi illesztéssel

rendelkezett ( $f'_1 < 3\%$ ), nagy számban reprezentáltak a laboratóriumi minőségűnek számító 1,5%-nál jobb illesztésű detektor érzékenységek is és megtalálhatóak az olcsóbb kereskedelmi kategóriát képviselő megvilágításmérők érzékenységi görbéi is.



3.2. ábra

*Detektor színképi-érzékenységek ábrázolása logaritmikus skálán*

A következőkben a *parciális színképi illesztettségi mutató* működését ismertetem. Az  $f_{1,PAR}$  értékének számításához használható (3.6) egyenlet az  $f'_1$  színképi illesztettségi mutató kiszámításához alkalmazott összefüggésre (ld. (2.2) és (2.3) egyenletek) épül. A lényegi különbség az, hogy mindegyik  $f_{1,PAR}$  egy-egy szűkített hullámhossz-tartományon érvényes és minden tartományhoz külön etalon-fényforrás tartozik.

$$f_{1,PAR}(\lambda_{STD}) = \frac{\int_{380}^{780} |s^*(\lambda, \lambda_{STD})_{rel} - V(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda}, \quad (3.6)$$

$$\text{amelyben } s^*(\lambda, \lambda_{STD})_{rel} = s(\lambda)_{rel} \cdot \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda)_{STD} \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda)_{STD} \cdot s(\lambda)_{rel} d\lambda}, \quad (3.7)$$

ahol,

- $V(\lambda)$ , az emberi látás spektrális fényhatásfok függvénye,
- $s(\lambda)_{\text{rel}}$ , az érzékelő szinképi érzékenységi függvénye,
- $s^*(\lambda, \lambda_{\text{STD}})_{\text{rel}}$ , az érzékelő  $\lambda_{\text{STD}}$  domináns hullámhosszal rendelkező etalon LED segítségével normált szinképi érzékenységi függvénye,
- $S(\lambda)_{\text{STD}}$ , a  $\lambda_{\text{STD}}$  domináns hullámhosszal rendelkező etalon LED szinképi teljesítmény eloszlása.

A 3.6 egyenlet bal oldalán látható *PAR* elnevezés az érvényességi tartományt határozza meg a látható színek tartományt négy jellemző területre osztva (a BL a kék, a GN a zöld, az YL a sárga és a RD pedig a vörös tartományt jelöli). A tartományok pontos határait és az egyes tartományokhoz tartozó referencia forrás adatait a **3-III.** táblázat foglalja össze.

### 3-III. táblázat

Domináns hullámhossz tartományok és az etalon LED-ek hullámhossza

hiba index	érvényességi tartomány	etalon LED domináns / csúcs-hullámhossza
$f_{1, \text{BL}}$	450 nm – 540 nm	467 nm / 460 nm
$f_{1, \text{GN}}$	490 nm – 560 nm	505 nm / 503 nm
$f_{1, \text{YL}}$	550 nm – 630 nm	607 nm / 611 nm
$f_{1, \text{RD}}$	620 nm – 660 nm	643 nm / 659 nm

A 3.2.2-es fejezetben bemutatott *PE* relatív fotometriai hiba függvényt (ld. (3.5) egyenlet) használtam a javasolt illesztettségi mutatók összehasonlítására [48], továbbá hasznos eszközként szolgált a *parciális szinképi illesztettségi mutató* paramétereinek (domináns-hullámhossz tartományok, referencia LED-ek) meghatározásakor is. A korábbi javaslatokban ( $f_{1, \text{LED}}$ ) a modellezett LED szinképi-teljesítményeloszlások használata színezetbeli eltolódásokat eredményezhet [48], ezért a paraméterek meghatározásához sem használtam ilyeneket. A modellezett LED teljesítményeloszlások helyett az általam adatbázisba összegyűjtött LED-ek és érzékelők szinképi adataival dolgoztam. Az adatbázisban található valós adatok alapján, valamint az összegyűjtött gyártói katalógusadatok alapján határoztam

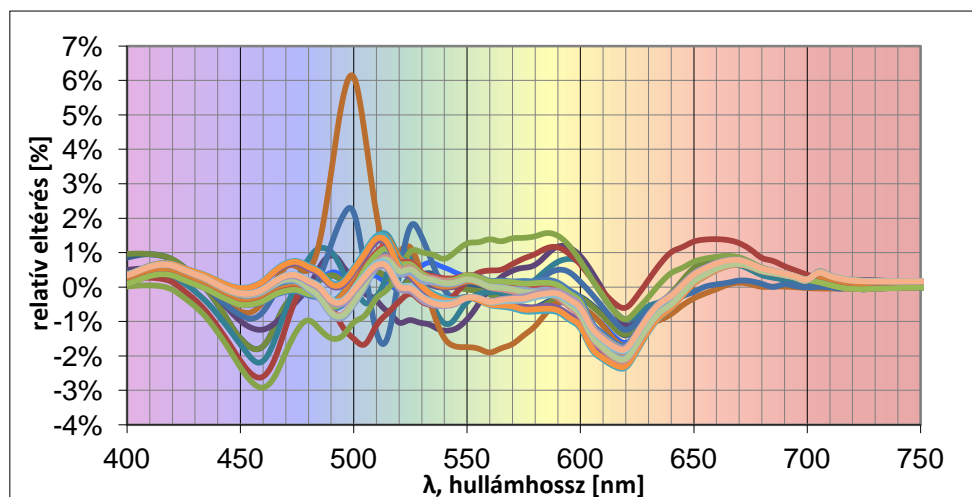
meg a színképtartományokat a kategorizáláshoz. A tartományok meghatározása a következő szempontok alapján történt:

- Mely színezeti tartományokat képes az emberi szem jól megkülönböztetni?
- A kereskedelemben kapható LED-ek domináns hullámhosszai milyen tipikus hullámhossztartományokba sorolhatóak?

Normál színlátót feltételezve könnyen besorolható egy színesen világító LED a kék, zöld, sárga, illetve vörös tartományok valamelyikébe. A *parciális színképi illesztetlenségi mutató* első változatában ezt a három színezeti tartományt használtam. A sárga, illetve narancssárga LED-ek mérésére is a vörös színtartományban használt referencia LED-et javasoltam. A számítások eredményei azonban azt mutatták, hogy a vörös tartományban nem lehetett olyan referencia LED-et kiválasztani, amelynek használata esetén a *parciális színképi illesztetlenségi mutató* jósága elfogadható lett volna. Ezért, ezt a széles hullámhossztartományt lefedő vörös tartományt további két részre – sárga és vörös tartományra – osztottam. Így a végleges változatban már ez a négy színezeti tartomány került rögzítésre.

Az etalon LED-ek kiválasztását a következő szempontok alapján végeztem:

- A látható színképtartományon belül, hol helyezkednek el a tipikus színképi illesztési hibák csúcspontjai?
- A lehető legnagyobb félérték-szélességgel rendelkezzen a referencia LED.
- Lehetőleg egy tartományon belül a kereskedelemben leggyakrabban előforduló domináns hullámhosszal rendelkezzen a referencia LED.



3.3. ábra

*Ekvienergetikus színképpel kalibrált detektorok relatív érzékenységének  $V(\lambda)$  függvényétől való eltérésfüggvényei*

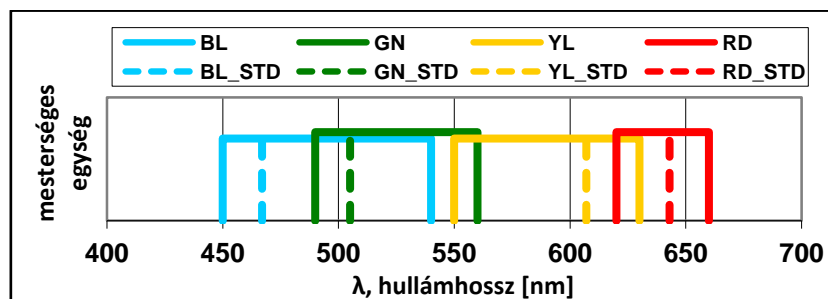
Az egyes tartományokhoz tartozó referencia LED kiválasztásánál azt is figyelembe vettem, hogy a fotometriai érzékelők színeképi illesztéseinek hol találhatóak a kritikus tartományai. A 3.3. ábrán látható, hogy a detektorok illesztési hibái egyes tartományokban halmozottan fordulnak elő. Ezek szerint fontos, hogy az etalon LED lehetőleg olyan hullámhosszterületen sugározzon, ahol a detektorok illesztési hibái a legnagyobbak. A kereskedelmi, illetve gyártási szempontok sem közömbösek, ugyanis célszerű olyan domináns hullámhosszal rendelkező LED-et választani, amelyből a gyakorlatban nagy példányszámot gyártanak. Ezért több mint 1000 katalógusadatot gyűjtöttem össze. Az adatok nagyobb részében a LED-ek domináns hullámhosszait adták meg a gyártók, számos helyen az együtt szerepelt a csúcshullámhossz értékkel, volt azonban olyan katalógus is, ahol csak a csúcshullámhossz értékeket tüntették föl. Ezeket az adatokat foglalja össze a 3-IV. táblázat.

### 3-IV. táblázat

Katalógusadatok megoszlása a hullámhosszértékek típusa szerint

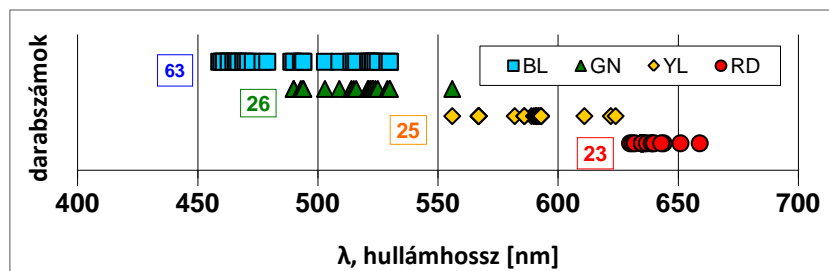
Feltüntetett hullámhossz típus	Bejegyzések száma
csak a domináns hullámhossz	425 db
domináns + csúcshullámhossz	352 db
csak a csúcshullámhossz	230 db
Összesen:	1007 db

Azon adatok alapján, ahol mind a domináns-, mind a csúcs-hullámhossz rendelkezésre állt végül négy – átfedésekkel is rendelkező – domináns hullámhossztartományt alakítottam ki. A 3-III. táblázat adatai alapján a 3.4. ábra mutatja a négy domináns hullámhossztartományt (színezett folytonos vonal), valamint a tartományokhoz használható referencia LED-ek domináns hullámhosszait (színes szaggatott vonalakkal jelölve).



3.4. ábra

*Színeképi tartományok és a referencia LED-ek pozíciói*



3.5. ábra

*A próba LED-ek eloszlása a tartományokban, az adatpont jelölők a LED-ek csúcshullámhossz pozícióiba kerültek*

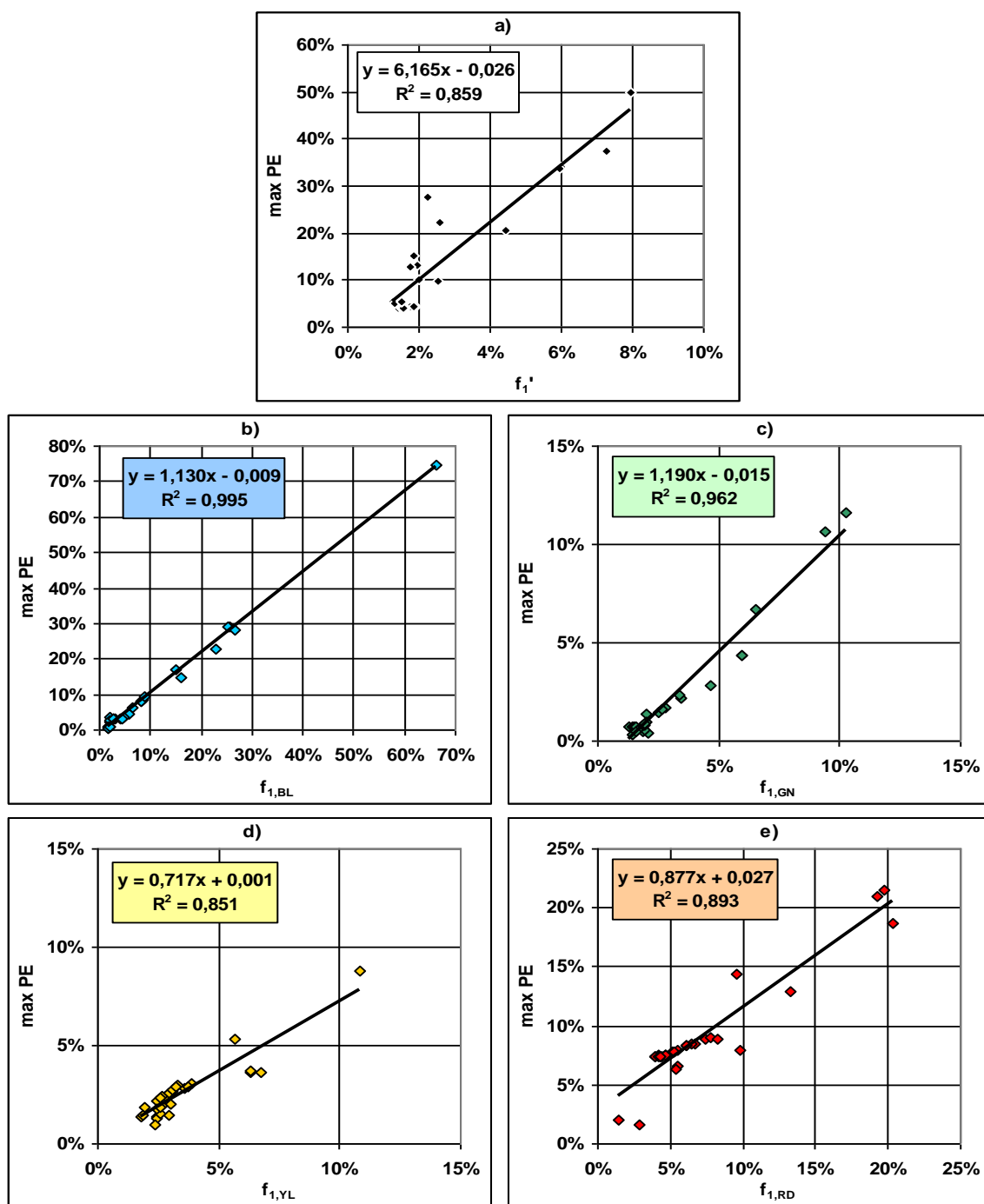
Munkám során először a tartományok határait rögzítettem, ez felosztotta a közel 100 darab LED-et a tartományok között. Minden tartományban több mint 20 valódi LED színekkel tudtam számolni. A négy különböző kategóriába tartozó LED-ek eloszlását a 3.5. ábra foglalja össze a domináns hullámhosszak eloszlását is mutatva. Természetesen az átlapolások miatt egy LED tartozhatott egyszerre két tartományba is. Majd, a fentebb felsorolt kritériumok figyelembevételével kiválasztottam a potenciális referencia LED jelöltet. A vörös színek tartományban teljesen egyértelmű volt a referencia LED típusa. A kék és a sárga színek tartományban három, a zöldben kettő referencia LED típus közül kellett választanom. A lehetséges referencia LED típusok mindegyikével kiszámítottam az illesztettségi mutatót, valamint a kategóriába eső LED-ek mérése során fellépő PE fotometriai hibákat. A fotometriai hibák közül minden detektor esetében kiválasztottam a legnagyobbat, majd kiszámítottam, hogy ezek a – detektoronként egy-egy – maximális fotometriai hibák milyen kapcsolatban vannak az adott detektor adott kategóriára számított illesztettségi mutatójával ( $f_{1,PAR}$ ). A különböző tartományokhoz tartozó korrelációs értékeket a 3-V. táblázat foglalja össze. A 3.6. ábrán láthatjuk hullámhossztartományokra bontva a detektorokhoz tartozó klasszikus  $f_1'$  a) és *parciális*  $f_1'$  b)-e) értékek és a legnagyobb fotometriai hibák közötti összefüggéseket.

### 3-V. táblázat

Az  $f_1'$  (a) és a *parciális*  $f_1'$  *színekpi illesztettségi mutatók* (b-e) a maximális fotometriai hibával való korrelációinak értékei

	a) $f_1'$	b) $f_{1,BL}$	c) $f_{1,GN}$	d) $f_{1,YL}$	e) $f_{1,RD}$
R	92,70%	99,80%	98,10%	92,30%	94,50%
R <sup>2</sup>	85,90%	99,50%	96,20%	85,10%	89,30%





3.6. ábra

*A vizsgálatban részt vett detektorok illesztetlenségi mutatói és a legnagyobb fotometriai hibák (max PE) viszonya az  $f_1'$  (a) és a parciális szinképi illesztetlenségi mutatók (b-e) esetében*

Tekintsük a korrelációs együttható jelentését a példákra vonatkoztatva. Adottak a valódi fotometriai hiba (PE) és valamelyik illesztetlenségi mutató, mint mennyiségi ismérvek. A

korrelációs együttható megadja, hogy két ismérvet reprezentáló adathalmaz között van-e kapcsolat és ha igen, akkor az milyen erősségű. A korrelációs együttható értékeiből levonható következtetéseket nem szabad fenntartások nélkül elfogadni, ugyanis, ha nem figyelünk a részletekre, akkor könnyen előfordulhat, hogy hibás következtetéseket teszünk. Azt gondolhatnánk, hogy egy illesztettségi mutató és a maximális fotometriai hiba közötti nagy korrelációs együtthatóból egyenes ágon következik, hogy a mutató jól jellemzi a detektorral végzett mérések fotometriai hibáit. Ha tekintjük a 3.6. ábra a) és d) részeit, akkor láthatjuk, hogy közel azonosak a korrelációs eredményeik, de tekintsük a grafikonon a legnagyobb hibához tartozó becsült hiba értéket. Láthatjuk, hogy a két érték között óriási eltérés lehet, az a) esetben az 50%-os fotometriai hibához egy 8%-os becslés tartozik, a d) esetben pedig ez a pont a grafikon mindkét tengelyének 10%-os pontja közelében helyezkedik el.

A 3.7. ábra a)-e) diagramjai ugyanezeket az adatokat kördiagramokon mutatja, szembevetve a mutatók használhatósága közötti különbség. A görbék a mutató által jelzett becslést és a próbák során mért legnagyobb fotometriai hibát mutatja detektoronként. Látható például az a) diagramon, amely az  $f_1'$  értékeit mutatja, hogy az  $f_1'$  mutató által becsült hiba jóval elmarad a próbák során tapasztalt legnagyobb fotometriai hibától. A használhatóságot jól jellemzi a diagramok alapján a görbét alkotó értékek összegeinek aránya. Ezeket a 3-VI. táblázat foglalja össze. A „ $\Sigma$ (mutató)” nevezetű oszlopban a megfelelő  $f_1'$  értékek kerültek összegzésre (tehát a hibabecslések összege az összes detektort tekintve). Így kaptam egy hibabecslő összeget, amelyben az összes detektorra vonatkozó hibabecslés megtalálható. A „ $\Sigma$ (max PE)” oszlopban pedig detektoronként a legnagyobb fotometriai hibák kerültek összegzésre, tehát ez is egy olyan összeg, amelyben az összes detektor szerepel. Egy-egy mutató átlagos használhatóságát jellemzi a két összeg hányadosa, ami tulajdonképpen azt mondja meg, hogy a kérdéses hibamutató a fotometriai hibáknak hány százalékát jelzi általában. Látható, hogy a zöld és sárga tartományok esetében egy 30% – 40%-os túlbecslésről beszélhetünk, míg a kék és vörös tartományokban kisebb mértékű alulbecslésről, de mindenképpen jobban teljesítenek az új mutatók, mint az  $f_1'$  mutató ugyanezen adatokra, hiszen az csak a hibák egy-ötödét jelzi előre hatékonyan.

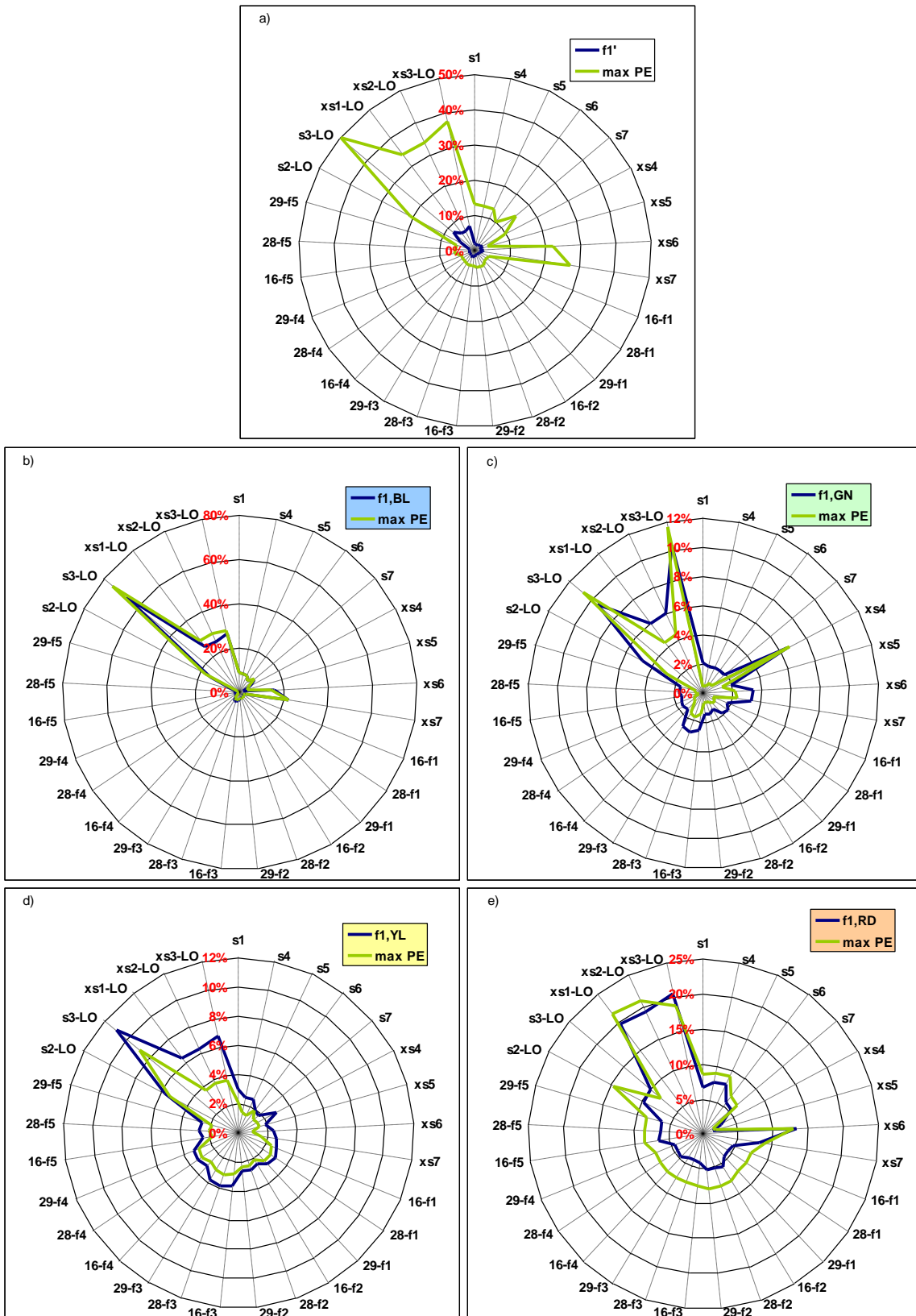
Ha azonban ezen átlagos adatok alapján alakítanám ki a végső javaslatot, akkor nem mondhatnám el, hogy sokkal javítottam volna a színes LED-ek fotometriáját. A cél az, hogy egy jól használható mutató-csomag álljon a felhasználók rendelkezésére, amelynek segítségével a felhasználó tudhatja, hogy a detektora maximum mekkora hibát fog véteni a fénymérés során. Hogy közelebb jussunk egy ilyen csomaghoz, a *parciális*  $f_1'$ -k értékét még

kis mértékben hangolni kell. Úgy jártam el, hogy olyan korrekciós konstansokkal módosítom a *parciális*  $f'_1$ -k értékét, hogy a próba LED-ek mérésekor keletkező hibák mindegyikénél felülről becsülje a mutató a maximális hibát. A legnagyobb korrekcióra természetesen a kék és a vörös színingereknek megfelelő tartományoknál van szükség. A számítások alapján a 3-VII. táblázatban látható értékeket alkalmazva minden próba LED mérésekor a *parciális*  $f'_1$ -k által jelzett értékek alatt maradnak a fotometriai hibák. Az  $f'_{1,BL}$  esetében 1,5, az  $f'_{1,GN}$  esetében 1,2, az  $f'_{1,RD}$  esetében pedig 2 a korrekciós szorzó értéke. Az  $f'_{1,YL}$  esetében nincsen szükség további korrekcióra. Jogosan vetődhet fel a kérdés, hogy miért nem maradunk az egy darab, jól bevált  $f'_1$ -nél és miért nem határozunk meg ahhoz ún. „korrekciós” együtthatót? A *klasszikus*  $f'_1$  esetében is meghatároztam annak a konstansnak az értékét, amely alkalmassá teszi az előforduló fotometriai hibák felső becslésére, sajnos a konstans értéke 13, ami elfogadhatatlanul nagy érték egy korrekciós tényezőre.

### 3-VI. táblázat

A kördiagramokon ábrázolt értékpontok összegei (hiba becslése, legnagyobb hiba), valamint e két összeg aránya.

	$\Sigma$ (mutató)	$\Sigma$ (max PE)	arány
a) $f'_1$	0,73	3,73	19,5%
b) $f'_{1,BL}$	2,85	2,95	96,4%
c) $f'_{1,GN}$	0,89	0,62	142,2%
d) $f'_{1,YL}$	1,03	0,76	134,9%
e) $f'_{1,RD}$	2,10	2,64	79,8%



3.7. ábra

A megvizsgált 29 detektor illesztetlenségi mutatói és a maximális fotometriai hibái kördiagramokon ábrázolva

### 3-VII. táblázat

A parciális  $f'_1$  színeképi illesztettségi mutatók és a maximális fotometriai hiba kapcsolata.

<b>Maximális fotometriai hiba (max PE):</b>	$PE < 1,5 \cdot f'_{1,BL}$	$PE < 1,2 \cdot f'_{1,GN}$	$PE < f'_{1,YL}$	$PE < 2 \cdot f'_{1,RD}$
---	----------------------------	----------------------------	------------------	--------------------------

### 3.4. Az $f'_1$ mutató, mint a legnagyobb fotometriai hiba becslése

Ebben az alfejezetben azt bizonyítom, hogy az  $f'_1$  színeképi illesztettségi mutató milyen feltételek mellett alkalmas a jellemzett detektor legnagyobb fotometriai hibájának becslésére. Legyen  $Y_v$  egy adott  $S(\lambda)$  színeképi-teljesítményeloszlással rendelkező fényforrás valós fotometriai értéke,  $Y_d$  pedig jelölje a vizsgált detektor által érzékelt fotometriai értéket. Jelölje  $s^*(\lambda)_{rel}$  a detektor azon relatív színeképi érzékenységét, amelyet az  $f'_1$  esetében ismertett módon egy arra megfelelő fényforrással kalibráltunk a 2.2.3 alfejezet (2.2) összefüggése szerint.

Tekintsünk el ( $K_m$ )-től, a fényhasznosítás elvi maximumértékétől és vizsgáljuk meg az  $Y_v$  és  $Y_d$  abszolút különbségét:

$$|Y_v - Y_d| = \left| \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda - \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot s^*(\lambda)_{rel} d\lambda \right| = \left| \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot (V(\lambda) - s^*(\lambda)_{rel}) d\lambda \right|.$$

A határozott integrálok egyszerű tulajdonsága alapján

$$|Y_v - Y_d| = \left| \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot (V(\lambda) - s^*(\lambda)_{rel}) d\lambda \right| \leq \int_{380}^{780} |S(\lambda) \cdot (V(\lambda) - s^*(\lambda)_{rel})| d\lambda.$$

Mivel a színeképi-teljesítményeloszlások (esetünkben  $S(\lambda)$ ) függvényértékei soha nem vesznek fel negatív értékeket

$$|Y_v - Y_d| \leq \int_{380}^{780} |S(\lambda) \cdot (V(\lambda) - s^*(\lambda)_{rel})| d\lambda = \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot |V(\lambda) - s^*(\lambda)_{rel}| d\lambda.$$

Alkalmazva egy középérték tételt, miszerint, ha  $f$  és  $g$  (a valós számok halmazából a valós számok halmazába képező) függvények folytonosak az  $[a, b]$  intervallumon és  $g \geq 0$ , akkor van olyan  $\xi \in [a, b]$  pont, melyre igaz

$$\int_a^b f(x) \cdot g(x) dx = f(\xi) \cdot \int_a^b g(x) dx, \text{ ami alapján}$$

$$|Y_V - Y_D| \leq \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot |V(\lambda) - s^*(\lambda)_{\text{rel}}| d\lambda = S(\xi) \cdot \int_{380}^{780} |V(\lambda) - s^*(\lambda)_{\text{rel}}| d\lambda \leq M_S \cdot \int_{380}^{780} |V(\lambda) - s^*(\lambda)_{\text{rel}}| d\lambda,$$

ahol  $M_S = \max_{x \in [a,b]} \{S(x)\}$ .

Azt kapjuk, hogy  $|Y_V - Y_D| \leq M_S \cdot \int_{380}^{780} |V(\lambda) - s^*(\lambda)_{\text{rel}}| d\lambda$ , vagy

$$\frac{|Y_V - Y_D|}{M_S} \leq \int_{380}^{780} |V(\lambda) - s^*(\lambda)_{\text{rel}}| d\lambda. \quad (3.8)$$

E becslés a következő előnyös tulajdonságokkal rendelkezik. A nevezőben az  $M_S$  arányos a mérendő LED színeképi-teljesítményeloszlásával, az  $S(\lambda)$ -val. Ugyan nem annak normájával arányos, de legalább a maximális értékével, ami kizárja a különböző amplitúdók eseteit.

Láthatjuk, hogy a (3.8) formula szerkezete nagyon hasonlít az  $f'_1$  formulára, amiből következik, hogy az  $f'_1$  érték egyenes arányban áll a detektor legnagyobb lehetséges fotometriai hibájával. Valójában ez csak akkor lehetséges, ha monokromatikus sugárzást mérnénk, de a LED-ek színeképi teljesítményeloszlása is lehet nagyon keskeny. Ez az oka annak, hogy az új mutatók tulajdonképpen az  $f'_1$  leszármazottjai és ezek jobban használhatóak a LED fotometriára szánt érzékelők mérési hibáinak becslésére.

A fentiek alapján megfogalmazom 2. tézisemet: a (3.6) szerinti parciális színeképi illesztettségi mutatókkal becsülhető a valós fotometriai hiba nagysága.

### 3.5. Eredményeim hatása a LED-ek fénymérésének gyakorlatában

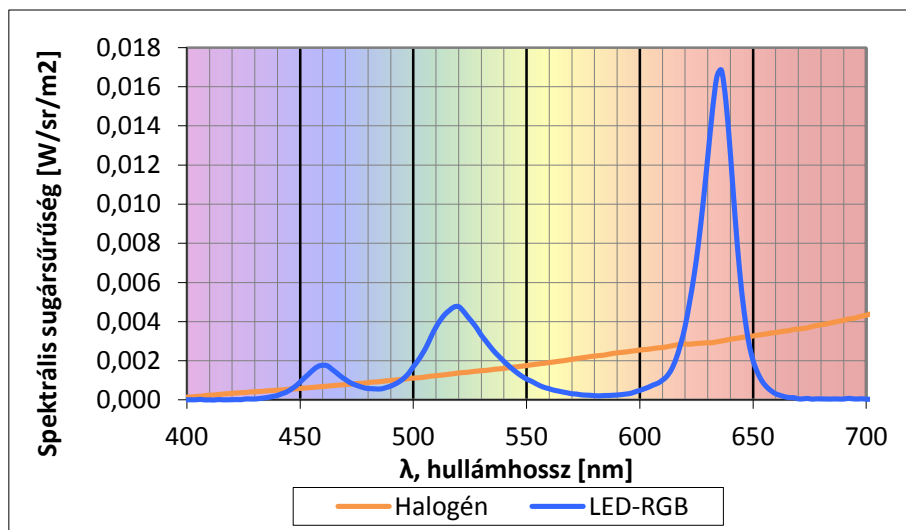
Az általam kidolgozott jellemzési módszer segítségével a fénymérő detektoroknál elfogadott és a gyakorlatban használt  $f'_1$  színeképi illesztettségi mutatót kiegészíthetjük négy további mutatóval. Ezek az  $f'_{1,BL}$ , az  $f'_{1,GN}$ , az  $f'_{1,YL}$  és az  $f'_{1,RD}$  parciális színeképi illesztettségi mutatók, amelyek rendre a látható színeképtartomány kék, zöld, sárga és vörös tartományaira vonatkoznak. Használatukkal a hagyományos  $f'_1$ -nél jobb becslést kaphatunk a kérdéses detektorral az adott színtartományban végzett mérés során fellépő legnagyobb mérési hiba mértékéről. Így a mérendő LED színének ismeretében kiválasztható a tartományban legkisebb hibával mérő detektor.

## 4. Világítódiodák színingermetrikai jellemzése

Dolgozatom ezen részében a színingermetrikai kutatásaim indíttatását, előzményeit ismertetem és bemutatom a témához kapcsolódó, a színingermetrikát különböző aspektusokból megközelítő vizuális kísérleti összeállításaimat. Mint azt majd részletesen is kifejtem, a színingermetrikai kísérleteim alapvetően kétmintás összehasonlító/egyeztető kísérletek, ahol minden esetben egy tesztíngert hasonlítanak a megfigyelők egy referenciaingerhez. Eközben vagy ítéletet mondanak az egyezésről, vagy lehetőséget kaptak az egyeztetési mezők változtatására. Minden kísérlettípust egy-egy alfejezetben tárgyalok, amelyek mindegyikét az abba a fejezetbe tartozó eredmények értékelésével zárom. Az értékelés alapja minden esetben színingerkülönbség, amelyet a PR-705 típusú spektrométerrel végzett mérések eredményei alapján számítottam ki a referenciainger és tesztíngerek között a különböző színinger-megfeleltető rendszerekben, úgymint a CIE 1931-es 2°-os szabványos színinger-mérőben, a CIE TC1-36 bizottság által javasolt csapérzékenységi függvényekre épülő színinger-mérő rendszerben és ez utóbbinak az általam módosított változatában.

### 4.1. Bevezetés

Már egyetemi tanulmányaim alatt is több, valamilyen színmegjelenési tulajdonságot vizsgáló pszichofizikai kísérletben vettem részt megfigyelőként, majd később magam is terveztem és vezettem hasonló vizuális kísérleteket. A saját kísérleteim közül az első megtervezéséhez korábbi tanulmányaim és az azokkal kapcsolatos kísérletek adták a fő motivációt. Korábbi [49] *keskeny színekű* teszt (4.1 ábra LED-RGB adatsor) megvilágítókat alkalmazó színinger összehasonlító kísérletek előkészítésénél azt tapasztaltam, hogy egy észleletbeli zöldes-sárgás eltolódás jelent meg a referencia megvilágító (4.1 ábra, Halogén adatsor) által keltett színingerhez képest. Mindez olyan esetben jelentkezett, amikor mesterségesen állítottunk elő metamer színingerpárokat úgy, hogy a színességeket a szabványos CIE 1931-es 2°-os színinger-megfeleltető függvények segítségével határoztunk meg objektív módon. A metamer színingerek definíció szerint eltérő színekpi-teljesítményeloszlásokkal rendelkeznek, de a színingerekhez tartozó tristimulusos értékek megegyeznek.



4.1. ábra

*Metamer színingerek spektrális teljesítményeloszlása*

Két vizuálisan egyeztetett színinger színingerösszetevői –  $S_1(\lambda)$  és  $S_2(\lambda)$  színeképi teljesítményeloszlásokkal – az alábbiak szerint számíthatóak:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= k_m \int S_1(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 X_2 &= k_m \int S_2(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\
 X_1 &\neq X_2
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

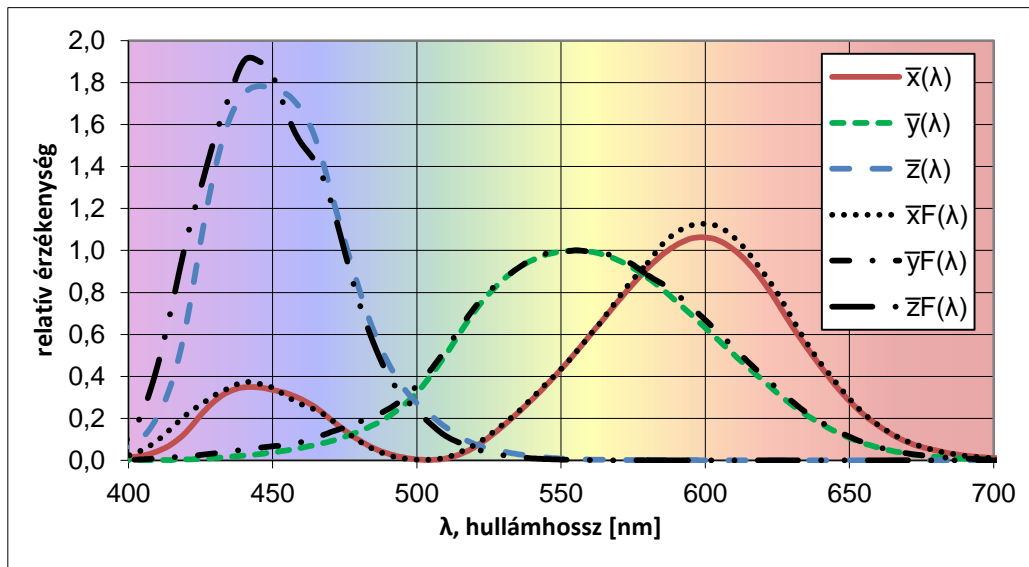
azaz, a numerikus eltérést az  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  és  $\bar{z}(\lambda)$  függvények és az emberi percepció közötti különbség okozza. Feladatomban tehát az volt, hogy meghatározzam az  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  és  $\bar{z}(\lambda)$  függvényeken végzendő módosításokat ahhoz, hogy az  $X_1 = X_2$  egyenlet is teljesüljön az egyébként vizuálisan egyeztetett színingerekre.

Kísérleteim segítségével arra kerestem a választ, hogy miként határozhatjuk meg pontosabban a vizuálisan egyeztetett – tehát metamer – színinger-párok színességeit, és hogy miképpen csökkenthetjük a korábban is tapasztalt észleltbeli eltéréseket. A fejezet első felében a három részből álló színingeregyeztető kísérleteimet mutatom be, amely kísérleteket a laboratórium eszközeiből állítottam össze. A fejezet végén pedig egy olyan kísérletsorozatot ismertetek, amelyben fehér LED-eket alkalmazó ipari termékeken tesztelem a módszerem eredményességét.

A fent ismertetett probléma megoldására egy lehetőség az, ha az emberi szem csapérzékenységi függvényeiből Wold [50] által transzformált színinger-megfeleltető függvényeket használjuk. A Wold által transzformált függvényeket a 4.2. ábrán láthatjuk összehasonlítva az eredeti CIE 1931-es 2°-os szabványos színinger-mérő észlelő színinger-



megfeleltető függvényeivel. A Wold-féle fundamentális színínger-megfeleltetőktől előzetesen azért várható a jelenség jobb leírása, mert azokat – a fiziológiai méréseken alapuló – csapérzékenységi függvényekből transzformálták.



4.2. ábra

*A CIE 1931 2°-os (első három adatsor színes vonallal) és az LMS alapjelekre épülő Wold-féle, fundamentális (F-betűvel jelölt adatsorok) színínger-megfeleltető függvények*

A színínger-egyeztető kísérletsorozat eredményeinek értékelését a CIE 1931-es  $(x, y)$  színességi diagramban kezdtem, hiszen az  $X_1 = X_2$  egyenlet – mindhárom színíngerösszetevő párra történő – teljesülésének következménye a színességi koordináták egyezősége. A CIE 1931-es  $(x, y)$  színességi diagram észleleti szempontból nem tekinthető egyenközűnek [15] a teljes színínger tartományon, de mivel a színínger-egyeztetési vizsgálataim során relatív kisméretű ( $R_{xy} < 0,1$ ) színínger-környezetekben történik, ezért az ilyen összehasonlításokra az mégis alkalmas. Később már több színességi pontban folytak a kísérletek és hogy az eredmények egymással összehasonlíthatóak legyenek, áttértem az észleleti szempontból egyenközűbbnek tekinthető CIE 1976-os  $(u', v')$  színességi diagram rendszerére. Kísérleteimmel arra kerestem a választ, hogy a Wold-féle fundamentális színínger-megfeleltető rendszer alkalmasabb-e a megfigyelők által beállított egyezések leírására, mint a szabványos CIE 1931-es színínger-megfeleltető rendszer. A Wold-féle fundamentális színínger-megfeleltető rendszer származtatását az  $\bar{l}$ ,  $\bar{m}$ , és  $\bar{s}$  csapérzékenységi függvényekből az I. melléklet tartalmazza részletesen.

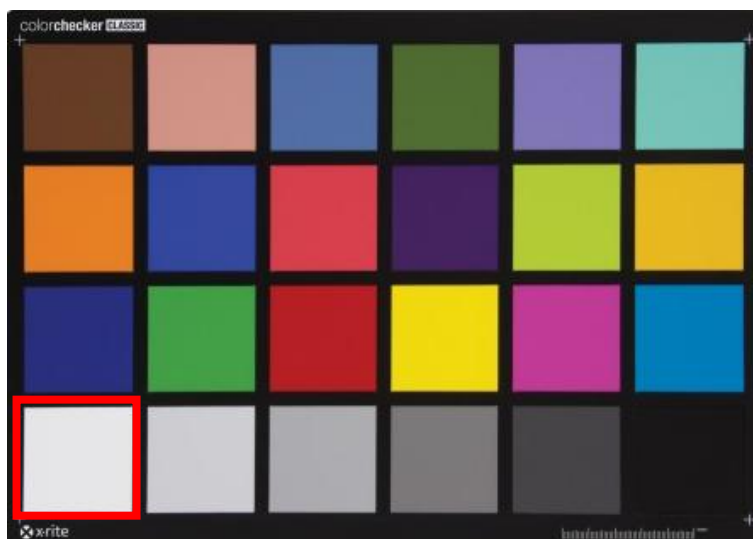
## **4.2. Maxwell típusú színinger-egyeztető kísérletek fehér ingerekkel**

Az első kísérlet a bevezetőben említett fehér színinger-környezetben megjelenített mintákkal történt, hiszen a kísérlet indíttatásául szolgáló kísérleti elrendezésben is így történt a színvisszaadás vizsgálatához szükséges fehér fények beállítása.

### **4.2.1. A kísérlet célja és módszere**

A fejezet bevezetőjében említett objektív színinger-egyeztetés során keletkező észleletbeli különbség elsősorban a fehér fényszínnek környezetében volt szembetűnő. Ez indukálta a fehér színességek környezetében történő vizsgáldást, amelyet elsőként mutatok be. A kísérleti összeállítást is úgy alakítottam ki, hogy az egyeztetés tárgya egy fehér színingert keltő minta legyen, ezt a jól ismert színinger-ellenőrző táblázat (color checker chart) fehér mintájának megvilágításával értem el. A megfigyelők ily módon, másodlagos sugárzóként keletkező fényingereket egyeztettek.

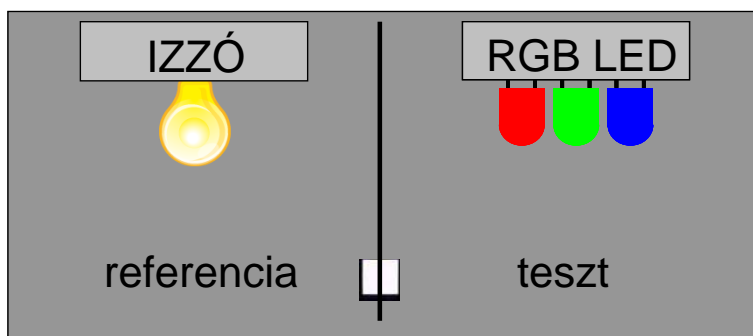
A kísérleti elrendezés Maxwell-típusú [51] színingeregyeztető összeállításnak tekinthető, amit egyenletesen szürkére festett belső oldallapokkal rendelkező, saját építésű megfigyelődobozban alakítottam ki. Az egyeztetési elrendezésben a Macbeth Colour Checker tábla legvilágosabb, semleges (90%-os fényűrűségi tényezőjű) mintáját (ld. a piros négyzettel jelölt területet a 4.3 ábrán) használtam, amelyet egy vékony, eltűnő élű, matt fekete felületű takarólemez segítségével osztottam referencia és teszt oldalra. Az elrendezés felülnézeti sematikus képe látható a 4.4. ábrán. Az egyeztetési mezőket úgy helyeztem el, hogy a megfigyelők azokat egyszerre láthassák, ilyen módon a memóriahatás miatt nem növekedett az egyeztetési beállítások bizonytalansága. Az elrendezés megfelel a szabványos 0°/45°-os mérési elrendezésnek, miszerint az egyeztetési mezőkre 0° irányból érkezik a megvilágítás, a megfigyelés – és a mérés – pedig 45° alatt történik. A megfigyelők a mezőket mintegy 50 cm-es távolságból nézték, amely a 4 cm x 4 cm-es megfigyelési mezőn 45°-os betekintési szög alatt 3,2°-os látószöget eredményez.



4.3. ábra

*A Macbeth színiger ellenőrző tábla, vörös kerettel jelölve a kísérletben használt egyeztetési mező*

A referencia terület megvilágítására 50 W villamos teljesítményű halogénizzót választottam. A mintát a teszt területen keskeny színeképű sugárzók füzerszerű elrendezése (ún. LED cluster) világította meg. A füzér 8 db vörös (0,5 W), 7 db zöld (1 W) és 6 db kék (1 W) színeképtartományban sugárzó világítódiodából állt, ezek összes felvett villamos teljesítménye névleges értéken 17 W, ekkor azonban az eredő fényinger nem eredményez fehér fényt. A 4.5. ábrán a teljes füzér látható működés közben, az első kísérletben vizsgált melegfehér fényszín előállításához azonban a 6 darab kék LED-ből mindösszesen egy darabra volt szükség, így a LED-füzér által felvett összes villamos teljesítmény legfeljebb 12 W-ra módosult. A kísérlet összeállításában a következő csúcs-hullámhosszakkal rendelkező világítódiodákat használtam: vörös – 636 nm, zöld – 518 nm, kék – 458 nm (4-I. táblázat 1. sora).



4.4. ábra

*Az első kísérlet referencia és teszt területe az összeállítás grafikáján*



4.5. ábra

*Vörös, zöld, és kék LED-ek (RGB-LED-ek) füzére a teszt minta megvilágítására*

#### 4-I. táblázat

A különböző színineregyeztető kísérleteimben alkalmazott világítódioda alapszíninerek csúcs-hullámhosszai [nm]

kísérlet azonosító	hullámhossz szerinti kategória		
	hosszú	közepes	rövid
PC – Maxwell fehér fények	636 nm	518 nm	458 nm
PC – Maxwell színes fények	640 nm	518 nm	474 nm
AP – legnagyobb telítettség	662 nm	595 nm	505 nm

A vörös, a zöld, és a kék alapszíninereket keltő világítódioda-füzérek áramellátásáról háromcsatornás tápegység gondoskodott, amelynek segítségével a megfigyelők a csatornák áramát szabadon változtathatták önállóan, vagy igény esetén a kísérletvezető segítségével. A megfigyelő feladata a csatornaáramok beállítása volt, olyan módon, hogy a teszt felületről érkező sugárzás által keltett érzet megegyezzen a referencia felületről érkező sugárzás által kiváltott érzettel. Ha a megfigyelők a beállítás után, a termikus stabilizálódási folyamat miatt esetlegesen tapasztaltak vizuális eltérést, úgy lehetőségük volt kismértékű korrekciókra. Az egyeztetést követően kalibrált PR-705 típusú spektrométerrel mértem a két egyeztetett mezőről a megfigyelők szeme által érzékelt sugárzás spektrális sugársűrűségét.

Ebben a kísérleti összeállításban a referencia terület színességét a hagyományos izzólámpa színességének megfelelő  $x=0,4513$  és az  $y=0,4100$  CIE 1931-es  $(x, y)$  színességi

koordinátákkal jellemezhetjük. A megfigyelt terület fény­sűrűségét  $\gamma = \sim 140 \text{ cd/m}^2$ -re állítottam be. A kísérlet során ezt a színességet és fény­sűrűségi szintet, igen kis értékű szórással ( $\Delta E_{xy} \text{ STD} = 0,0002$ ) tudtam reprodukálni. Az előző értékeknek megfelelően a megvilágítási szint, az ilyen típusú színingeregyeztető kísérleteknél szokásos  $E_v = 500 \text{ lx}$  környezetében helyezkedett el. A referencia megvilágító típusából és a fentebb közölt színességi koordinátákból már tudható, hogy a fényinger színe melegfehér, ennek megfelelően korrelált színhőmérséklete  $2830 \text{ K}$ .

A megfigyelők a teszt oldalon kétfajta előbeállításal találkozhattak. A két előbeállítás közötti különbség az volt, hogy az egyik sorozatban szándékosan csak közelítőleg állítottam be fehér színességet a LED-ek fényének keverékeként és műszer segítségével csak a megvilágítási szintet egyeztettem a laboratóriumunkban található Optelcom típusú fotoárammérővel és annak koszinusz korrigált fotodetektorával.

Emellett az előbeállítás mellett a színinger egyeztetés első lépéseként a megfigyelők – a teszt terület észleleti szempontból legbefolyásosabb csatornája – a kék csatorna szabályozásával állíthatták be számukra a referenciával leginkább egyező színességet. Amennyiben ebben a lépésben még nem sikerült az észleleti egyezést elérni, úgy a második lépésként lehetőséget adtam a másik két színcsatorna áramának változtatására is. Amikor már nem észleltek színezetbeli és világosságbeli különbséget a két oldal között, spektroradiométerrel mértem a beállított tesztmegvilágítás színeképi-teljesítményeloszlását a fehér tesztmezőn.

E kísérletsorozat második részében a tesztmező előbeállítását a CIE 1931-es színességi diagramban egyeztettem a referencia színesség koordinátájához ( $\Delta E_{xy} \text{ STD} = 0,001$ ;  $\gamma = \sim 140 \text{ cd/m}^2$ ). A kísérlet kezdetekor a megfigyelőknek dönteniük kellett, hogy a teszt mező előre beállított színessége egyezik-e a referencia mezőn észlelhetővel. „Nincs egyezés” ítélet esetén szintén lehetőségük volt a teszt mező LED fényeinek csatorna jeleivel a teszt színességet a számukra leginkább referencia közelinek beállítani. Az egyezés teljesülésekor pedig a PR-705-ös spektroradiométerrel mértem a megfigyelő által beállított csatornaáramoknak megfelelő teszt oldali besugárzás színeképi-teljesítményeloszlását.

#### **4.2.2. Kísérleti eredmények értékelése**

A kétféle előbeállításal végzett színinger egyeztetési kísérletek szempontjából nem tapasztaltam különbséget, ezért mindkét sorozat eredményeit felhasználtam az értékelésnél. A kísérletben kilenc fő ép-színlátó fiatal megfigyelő vett részt, akik átlagosan 10 ismétléssel

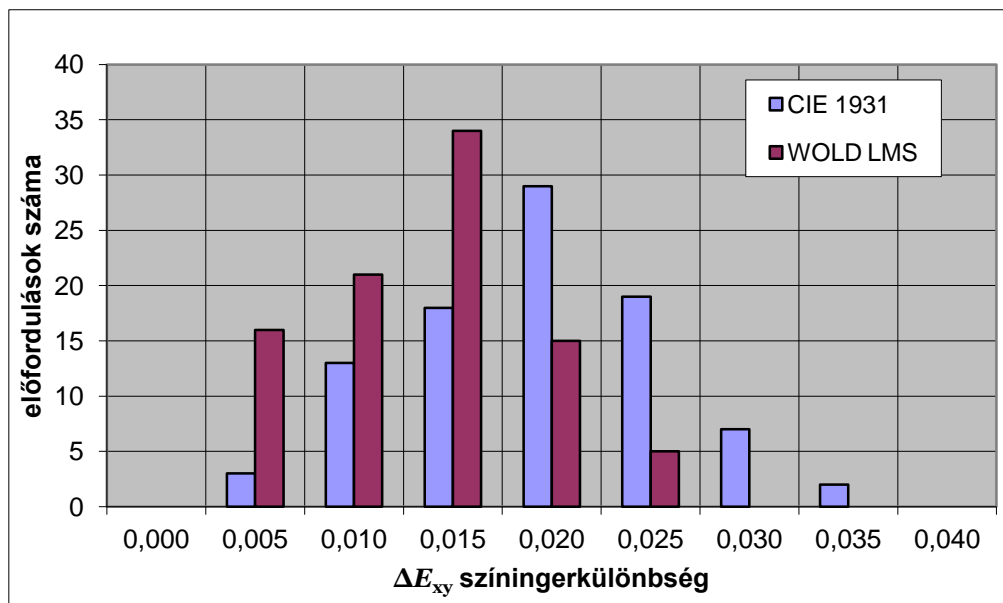
végezték el a kísérletet. A kísérlet során gyűjtött mérési adatok kiértékeléséhez a színínger-megfeleltető függvények két változatát használtam. A CIE 1931 2°-os szabványos színíngermérő észlelő színínger-megfeleltető függvényeit, valamint a Wold által közzétett [50], az L-, M-, és S-csapok érzékenységi függvényeiből (alap jelekből) transzformált fundamentális színínger-megfeleltető függvényeket. Mindkét rendszerben a referencia és a teszt oldali beállítások színíngerkülönbségei ( $\Delta E_{xy}$ ) képezik az értékelés alapjául szolgáló statisztikai mintákat. Ez a színíngerkülönbség az adott színességi diagramban értelmezett euklideszi távolság a (4.2) egyenlet szerint. A kísérlet összes megfigyeléseit jellemző színíngerkülönbségek hisztogramjait láthatjuk a 4.6. ábra grafikonján a két vizsgált színínger-megfeleltető rendszerre számolva (CIE 1931 és WOLD LMS adatsorokkal jelölve).

$$\Delta E_{x,y} = \sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2}, \quad (4.2)$$

ahol

$x_r$  és  $y_r$ , a referencia színínger színességi koordinátái,

$x_t$  és  $y_t$ , a teszt színínger színességi koordinátái.

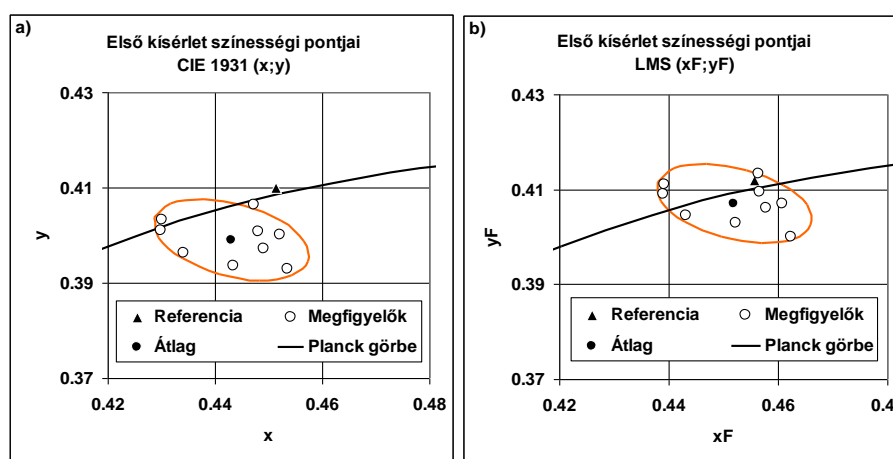


4.6. ábra

*A kísérlet adataiból számított színíngerkülönbségek hisztogramja a CIE 1931-es és a Wold két vizsgált színínger-megfeleltető rendszerben*

A 4.7. ábra színességi diagram részleteket láthatunk, ahol a referencia mező színességét fekete háromszög jelöli, a korong jelek a megfigyelők által beállított adatokra utalnak, a fehér korongok az egyéni átlagos beállításokat, a fekete az összes megfigyelő összes

megfigyelésének átlagát jelöli. Az összehasonlítás alapját a teli fekete jelek közötti színíngerkülönbség képezte, azaz a referencia színesség és a megfigyelők átlagos beállítása közötti színesség. Látható, hogy a jobb oldali grafikonban a – Wold-féle fundamentális színíngere-megfeleltetőkkel számított – referencia színessége a megfigyelések szórásán belülre kerül. Ebből az következik, hogy a Wold-féle fundamentális színíngere-megfeleltető rendszer az első kísérlet (melegfém) referencia színíngere – amely egyébként folytonos színekű sugárzó – környezetében alkalmasabb a három keskeny sávban sugárzó alapszíníngerek segítségével előállított vizuális színíngeregyeztetés leírására.



4.7. ábra

*Melegfém fényszínű színíngere környezet a CIE 1931 2°-os (a) színességi diagramban és a Wold-féle (LMS) fundamentális (b) színességi diagramban*

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a Wold-féle fundamentális színíngere-megfeleltető rendszer az előző bekezdésben felsorolt feltételekkel alkalmasabb a vizuális színíngeregyeztetés leírására. Azt azonban még statisztikailag bizonyítani kell, hogy a két színíngere-megfeleltető rendszer között valódi, lényeges különbség van.

A 4-II.-es összefoglaló táblázat tartalmazza az átlagos beállított teszt oldali színesség megfigyelők közötti (interobserver) szórását, amely mindkét rendszer esetében 0,006 közeli. A megfigyelőnkénti (intraobserver) szórás értékek 0,001 és 0,007 között változnak. A táblázat utolsó sorában találhatóak a referencia színességekhez tartozó koordináták, amihez képest a színíngerkülönbségeket számítottam. A megfigyelések során a CIE 1931-es színességi diagramban műszeresen egyeztetett majd a tesztoldalra beállított színíngere esetében egyetlen megfigyelő sem mondta ki az egyeztetést, továbbá ezt a beállítást határozottan, ámde különböző mértékben a kék csatorna áramának növelésével korrigálták a megfigyelők.

Tekintsük a megfigyelések adatait t-eloszlású statisztikai sokaság mintájaként. A két színíngendiagramban adódott színíngerkülönbségek átlagainak azonosságára állítottam fel a nullhipotézist.  $H_0 =$  „A CIE 1931-es 2°-os és a Wold-féle, fundamentális színínger-megfeleltető rendszer, ugyanúgy írja le a melegfehér színíngerek környezetében előforduló színíngerkülönbségeket.”. Statisztikai vizsgálataimat az SPSS programrendszerrel végeztem.

E nullhipotézist t-próbának alávetve igen kis valószínűséggel bizonyul igaznak ( $p < 0,0001$ ,  $df = 170$ ). Az SPSS statisztikai segédprogram kimeneti adatai láthatóak a 4-III. táblázatban. Az eredmény azt jelenti, hogy a két vizsgált statisztikai minta különbözik, azaz a minták közötti különbségek valóságosak és nem a véletlen okozza azokat. Ezzel bizonyítottam, hogy a melegfehér színíngerek környezetében szignifikáns különbség van a két színínger-megfeleltető rendszer között. A kísérlet eredményeit összefoglaló 4-II.-es táblázatból, illetve a közölt grafikonok alapján látható, hogy a Wold-féle fundamentális színínger-megfeleltetővel számolva kisebb színíngerkülönbségek adódnak a referencia és a megfigyelők által beállított tesztszínességekre. Tehát kijelenthetjük, hogy a Wold-féle fundamentális színínger-megfeleltetők alkalmasabbak – a CIE 1931-es 2°-os színínger-megfeleltetőknél – a melegfehér fényszínű metamerek leírására.

#### 4-II. táblázat

Az első kísérlet megfigyeléseinek átlagos adatai megfigyelőnként (1-9. megfigyelő)

Megfigyelő sorszáma	CIE 1931 szabványos			LMS fundamentális				
	Átlag		Szórás StdD	Színínger- különbség		Szórás StdD	Átlag	
	$x$	$y$					$x$	$y$
1.	0,4299	0,4011	0,0041	0,0232	0,0168	0,0035	0,4391	0,4089
2.	0,4535	0,3929	0,0019	0,0172	0,0136	0,0020	0,4623	0,4000
3.	0,4520	0,4002	0,0018	0,0099	0,0070	0,0016	0,4608	0,4071
4.	0,4300	0,4033	0,0062	0,0223	0,0164	0,0049	0,4392	0,4111
5.	0,4474	0,4064	0,0028	0,0053	0,0016	0,0028	0,4563	0,4133
6.	0,4480	0,4008	0,0012	0,0098	0,0026	0,0011	0,4567	0,4095
7.	0,4435	0,3935	0,0015	0,0182	0,0096	0,0012	0,4523	0,4028
8.	0,4490	0,3973	0,0019	0,0129	0,0061	0,0016	0,4578	0,4061
9.	0,4342	0,3962	0,0026	0,0220	0,0145	0,0021	0,4432	0,4044
1-9. átlaga	0,4431	0,3991	0,0064	0,0137	0,0061	0,0058	0,4520	0,4070
Referencia	0,4513	0,4100					0,4556	0,4118



#### 4-III. táblázat

Az első kísérlet t-próbás hipotézisvizsgálatának eredményeit összefoglaló táblázat

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
CIE_LMS	Equal variances assumed	2,645	,106	5,839	170	,000	,005470	,0009368	,0036205	,0073191
	Equal variances not assumed			5,839	165,254	,000	,005470	,0009368	,0036201	,0073194

### 4.3. Maxwell típusú színinger-egyeztető kísérletek színes ingerekkel

Az első kísérlet eredményei azt mutatták meg, hogy a széles színeképű melegfehér fényszínű referenciával és keskeny színeképű teszt alapszíningerekkel végzett vizuális színingeregyeztetést a Wold-féle fundamentális színinger-megfeleltető rendszer jobban írja le, mint a CIE 1931-es szabványos színingermérő észlelő színinger-megfeleltető rendszere. A következőkben a színes fényingerekkel végzett kísérleteimről számolok be.

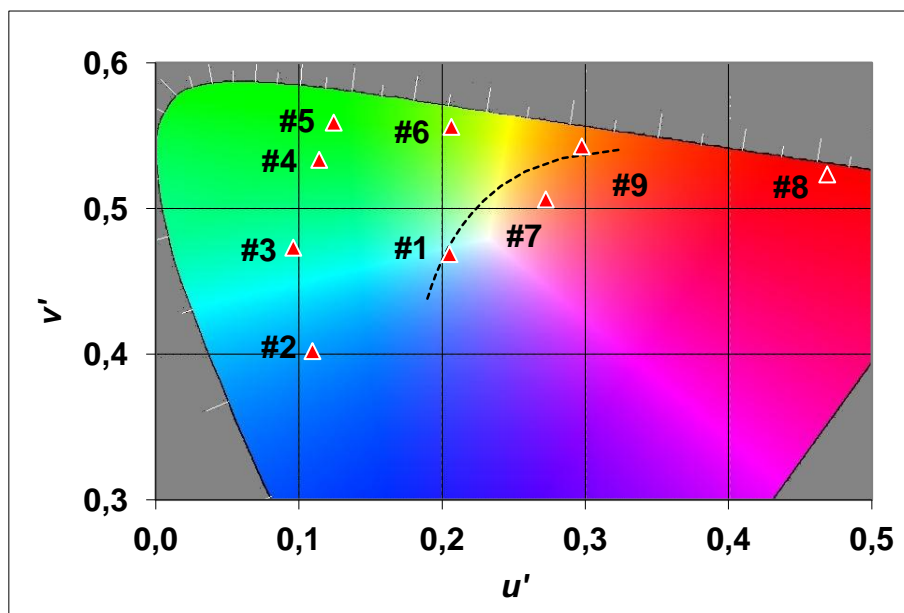
#### 4.3.1. A kísérlet célja és módszere

A második kísérlettel céltom az volt, hogy kiterjesszem a vizsgálatot a színességi diagram nagyobb területére, azaz a színes fényingerekre. A színességi diagram egyéb területein kerestem olyan referencia színingereket, amelyek színezetdúsabbak a normál izzólámpa melegfehér fényszínénél, de mégis folytonos színeképű fényforrás által keltettek. Hogy ez a feltétel teljesüljön üvegből készült színszűrőket használtam, de további módosításokat is végeztem a kísérleti összeállításon, amelyeket a következőkben ismertetek. A leglényegesebb változtatás, hogy a fehér reflexiós felület helyett transzmissziós, azaz elsődleges sugárzókat egyeztettem a megfigyelők.

Ebben a kísérletben színezetdúsabb referencia színingerek használatát terveztem, de már az első próbabeállítások során kiderült, hogy az eddig alkalmazott reflexiós minta színes megvilágításához mind a referencia, mind a teszt oldalon nagyobb sugárzott teljesítményre volna szükségem. A teljesítmény növelésével együtt járó hőmérsékletnövekedés viszont a rendszer stabilitását rontotta volna. Végül teljesen újragondoltam az összeállítást és a megvilágított reflexiós minták helyett színes üvegszűrők segítségével állítottam elő az egyeztetési mezőket. Ezzel a módosítással sokkal hatékonyabban tudtam a rendelkezésemre álló optikai teljesítményt kihasználni. Ez az összeállítás is Maxwell típusúnak tekinthető, de ki kell emelni a módosítást, miszerint az egyeztetendő színinger nem fehér, hanem annál színezetdúsabb ingerek.

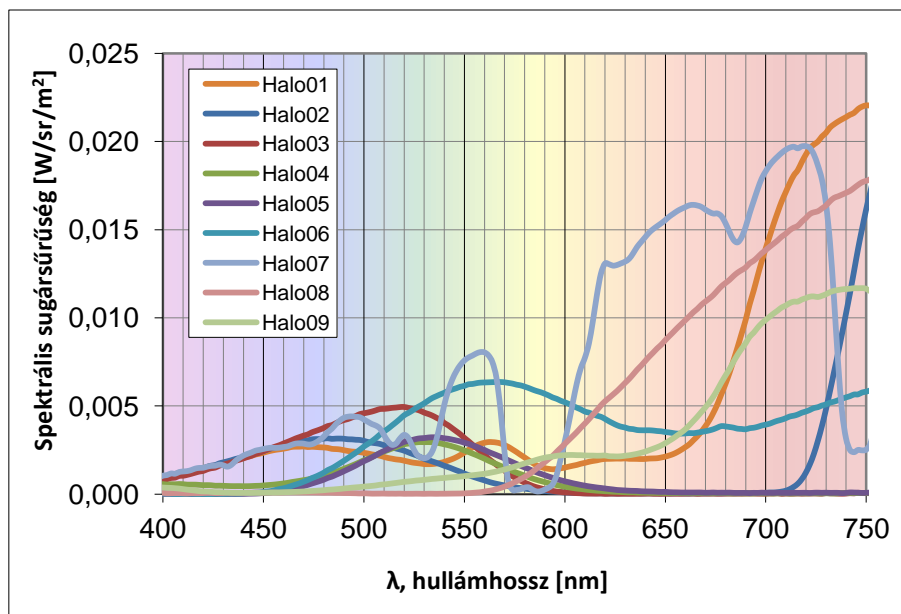
A referencia színingert ez esetben is halogén izzólámpa biztosította, igaz a módosított kísérleti összeállítás miatt a teljesítményét a tizedére csökkenthettem. A különböző referencia színességek előállításához pedig orosz gyártmányú üvegszűrő gyűjteményből válogattam olyan példányokat, amelyek segítségével még jól észlelhető fénysűrűségi szintű egyeztetési referenciamező keletkezik azt a halogén izzó elé helyezve. A referenciaként kiválasztott színingerek eloszlását a 4.8. ábrán látható színességi diagramban figyelhetjük meg #1–#9 sorszámmal jelölve. Az egyes referencia színingerek színeképi teljesítményeloszlásait láthatjuk a 4.9 ábrán.

A teszt színingert ez esetben is a keskeny teljesítménysávban sugárzó színes LED-ek biztosították. A transzmissziós felület miatt jóval kisebb teljesítmény is elegendőnek bizonyult a megfelelő fénysűrűség eléréséhez, így a vörös, a zöld és a kék LED-ekből is elegendőnek bizonyult egy-egy darab használata. Ezt a három LED-et  $\sim 1 \text{ cm}^2$ -en belül elhelyezve és a LED-ek előtt 5 cm-es mélységű keverőteret alkalmazva már tetszőleges homogén színingert elő tudtam állítani.



4.8. ábra

*A 9 db referencia színinger CIE 1931-es színinger-megfeleltetőkkel számítva, a CIE 1976 UCS színességi diagramban ábrázolva*



4.9. ábra

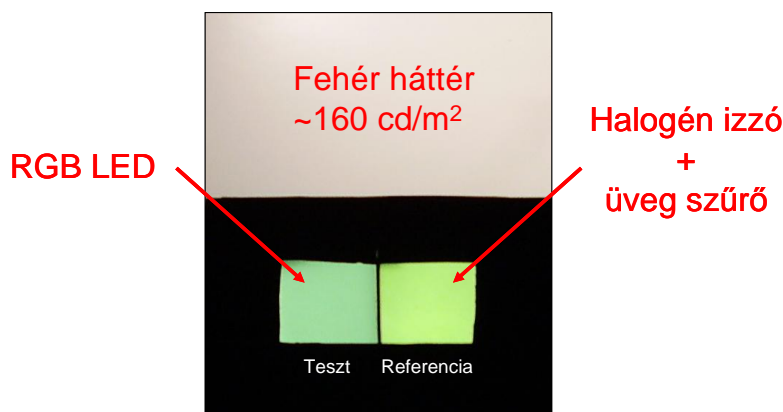
*A 9 féle referencia színingerhez tartozó színekpi-teljesítményeloszlás*

Az első kísérlethez képest a megfigyelők beállítási lehetőségei is változtak. A változtatásra azért volt szükség, mert már az első sorozatban gyakran érkezett a megfigyelők részéről olyan visszajelzés, hogy nehézkes a vörös, zöld és kék csatornák közül kiválasztani, hogy melyik csatorna áramának növelésére, vagy csökkentésére van egy adott pillanatban szükségük az általuk kívánt változtatás eléréséhez. Így valósult meg a második kísérletsorozat előkészítése során a vörös, a zöld és a kék LED-ekhez tartozó csatornaáramok közvetlen változtatása helyett az észleleti paraméterek, azaz a színezet, a színezetdűsség, és a relatív világosság (HSV: hue, saturation, value) módosításának lehetősége a megfigyelők számára. A számítógépes grafikában is általánosan használatos HSV – RGB transzformációt [52] implementáltam a vezérlésért felelős mikroszámítógép programjába, ily módon a megfigyelők számítógép billentyűzet segítségével változtathatták az észleleti paramétereket. A HSV – RGB transzformáció kódrészletei a II. mellékletben találhatók.

A LED technológia bemutatása fejezetben már kitértem arra, hogy a LED-ek áramvezérelt fényforrások, azaz a kilépő fényáramának változtatása a LED-en átfolyó áram értékének változtatásával lehetséges. A LED-gyártók azonban arra figyelmeztetnek, hogy a LED optikai paraméterei is megváltozhatnak, amennyiben eltérő áramerősségeket alkalmazunk azon. Ez a jelenség adott esetben akár a kísérlet eredményét is befolyásolhatná. A gyártók alternatívaként a korábban már említett, a digitális technikában gyakran használatos teljesítmény-vezérlési technikát, az impulzus szélesség modulációt (ún. PWM, Pulse Width Modulation) ajánlják. A PWM technikával megvalósított LED vezérléssel tudtam biztosítani, hogy az alapszínigerek

szimmetrikai tulajdonságai különböző kivezérlési fokoknál is állandóak maradjanak a kísérlet során. Az első kísérletnél még analóg áramvezérelt megoldást alkalmaztam, de ez nem befolyásolta jelentősen a kísérleti eredményeket. A PWM technika alkalmazását a számítógépről való vezérlés igénye indokolta.

A megfigyelők betekintési pozíciójából készült felvétel látható a 4.10. ábrán. A kép alsó felén a két egyeztetési mező látható, ugyanezen kép felső felében a színi adaptációt biztosító akromatikus felület látható, amit szintén egy halogénizzó világított meg a kísérletben alkalmazott többi fényforrástól függetlenül. Felmerülhet a kérdés, hogy miért volt szükség az adaptációs mező bevezetésére. Erre azért volt szükség, mert a megfigyelők az egyébként sötét kísérleti helyiségben a színes ingerek egyeztetése közben folyamatos színi áthangolódásnak volnának kitéve, amely igen gyors fáradáshoz vezetne és ezzel feleslegesen növelte volna az egyéni beállítások bizonytalanságát. A folyamatosan látható állandó fénysűrűségű fehér adaptációs mező jelenléte mellett a megfigyelők látási rendszere a saját fehérpontját ehhez a fehér mezőhöz állítja. Az egyeztetések után a színingerek színeképi teljesítményeloszlását ez esetben is a PR705-ös spektrométerrel mértem meg.



4.10. ábra

*Egyeztetési mezők a második kísérletben*

A kísérlet során hat megfigyelő egyeztetett kilenc különböző színingert. A kísérletben alkalmazott „megfigyelőbarát” vezérléssel tovább csökkent az egyénekenkénti bizonytalanság, ezért elegendőnek bizonyult a megfigyelők részéről egy színinger egyszeri beállítása. A bizonytalanság meghatározásához azonban két megfigyelőtől nagyobb ismétlésszámot követeltem meg.

A megfigyelők a teszt színingert vezérlő eszköz segítségével állíthatták be, amely LED-csatornánként 8 bites, azaz 255 szint beállítását tette lehetővé a vezérlőhöz csatlakoztatott

billentyűzet segítségével. A csatornák felbontásából adódik, hogy a *Hue*, azaz színezet csatornán 1530 színárnyalat beállítása vált lehetségessé.

A kísérlet során minden egyes új referencia-szűrő behelyezésekor a teszt színinger alaphelyzetbe került, így minden megfigyelő a Hue = 0, Saturation = 255, Value = 255 alapállapotból kezdhette az egyeztetést, ami megfelel az R = 255, G = 0, B = 0 csatornabeállításoknak. A megfigyelőknek a vezérlő értelmezési tartományában lehetőségük volt durva (10 egységnyi) és finom (1 egységnyi) lépésközök bevitelére, így viszonylag gyorsan elérhették azt a beállítást, amely számukra a referenciával egyező színészleletet keltette.

A sikeres egyeztetést a megfigyelők gombnyomással jelezték, aminek hatására a vezérlő programja eltárolta a beállított észleleti (HSV) paramétereket, majd alaphelyzetbe állította a LED-ek áramát, ezután a referencia mező és a referencia lámpa közötti szűrő cseréje következett. Amikor egy megfigyelő végzett a saját beállítási sorozatával, akkor a vezérlőprogramban eltárolt beállítási értékeinek megfelelően a PR-705-ös spektrométerrel sorra lemértem a teszt mezőről érkező színingerek színeképi teljesítményeloszlását a későbbi értékelés céljából.

A kísérlet során a fénysűrűségi szintek természetesen színingerenként eltérőek [88 cd/m<sup>2</sup> és 400 cd/m<sup>2</sup> közöttiek], a pontos értékeket a 4-IV. táblázatban találjuk.

#### 4-IV. táblázat

A második kísérletsorozat referenciáinak fénysűrűségi szintjei színingerenként (#1 – #9)

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
$L_v$ [cd/m <sup>2</sup> ]	169,9	88,2	182,7	129,4	151,8	401,7	394,3	106,4	108,1

#### 4.3.2. Kísérleti eredmények értékelése

A fehér ingerekkel végzett kísérlet értékelését tárgyaló 4.2.2 fejezetben a CIE 1931-es ( $x, y$ ) színességi diagramban a (4.2)-es egyenlet szerint számított színingerkülönbségek alapján történt, ami arra az esetre helyes választás, hiszen a vizsgált színingerek a színességi diagram csak egy kis környezetéből kerültek ki, ahol a kis mértékű színingerkülönbségek egymással összemérhetőek. A most tárgyalt, színes referencia színingerek a színességi diagram nagyobb területét fedik le, ezért a különbségek nagyságának összehasonlítására a CIE 1931-es ( $x, y$ ) diagramnál egyenközűbb CIE 1976-os UCS ( $u', v'$ ) színességi diagramot használtam. A

megfigyelők egyeztetése után mérhető színíngerkülönbségeket a (4.3) egyenlet szerint számított Euklideszi távolság alapján hasonlítottam össze.

$$\Delta E_{u',v'} = \sqrt{(u'_r - u'_t)^2 + (v'_r - v'_t)^2}, \quad (4.3)$$

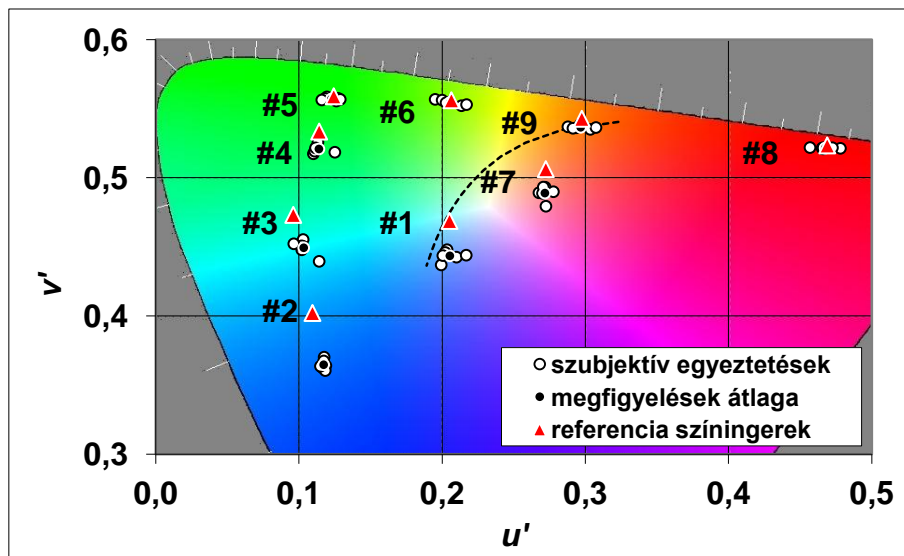
ahol

$u'_r$  és  $v'_r$ , a referencia színínger színességi koordinátái,

$u'_t$  és  $v'_t$ , a teszt színínger színességi koordinátái.

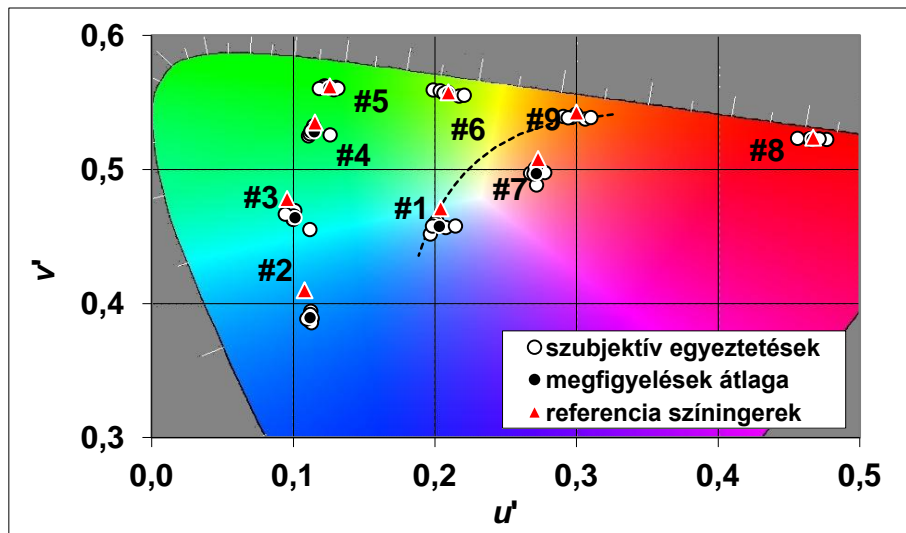
A színességi koordináták számítását ez esetben is a két összehasonlítás alatt álló színínger-megfeleltető rendszerek, a CIE 1931-es 2°-os, és a Wold-féle színínger-megfeleltető függvényeivel végeztem. A két összehasonlítandó csoportot külön-külön diagramon láthatjuk a 4.11. és 4.12. ábrákon mindkét esetben a CIE 1976-os UCS ( $u', v'$ ) színességi diagramban ábrázolva. A diagramokban a referencia színíngereket a piros háromszögek, míg a megfigyelők beállításait a fehér korongok jelölik.

Az eredmények alapján megfogalmazom 3. tézisemet: A CIE 1931-es szabványos színíngermegfeleltető függvények bizonyos keskeny színekben sugárzó LED-ek és széles sávban sugárzó egyeztető színíngerek esetében nem jól írják le az egyezést (4.11. ábra).



4.11. ábra

*A kísérlet színíngerei CIE 1931 2°-os színínger-megfeleltetővel számítva*



4.12. ábra

*A kísérlet színingerei Wold-féle fundamentális színinger-megfeleltetőkkel számítva*

A fehér ingerek egyeztetését vizsgáló kísérletben egyeztetett melegfehér fényszínű ingerhez a második kísérleti összeállításból a #7-es azonosítóval rendelkező referencia inger a legközelebbi. A színes ingerekkel végzett kísérlet egyeztetései után a kétféle színinger-megfeleltetővel számított színingerkülönbség összhangban van az első kísérletben tapasztalt színingerkülönbséggel. Már a diagramokon is szembetűnő, hogy az első kísérletben tapasztalt eltéréseknél számottevően nagyobb eltéréseket láthatunk azoknál a színingereknél, amelyek nagyobb arányban tartalmaznak kék sugárzást, ellenben a kék sugárzást egyáltalán nem tartalmazó színingereknél (#5, #6, #8 és #9) az objektív és a szubjektív színinger egyeztetés között a különbség nem számottevő.

Az eredményeket a 4-V. táblázat foglalja össze, amelynek szürkével kiemelt oszlopaiban jól látható, hogy mindegyik színingerpár esetében a Wold-féle fundamentális színinger-megfeleltetőkkel számított színingerkülönbség a kisebb, tehát azok a színinger-megfeleltetők jobban írják le a valós színinger egyeztetéseket. A középső kiemelt oszlopban a javulás mértéke látható %-ban kifejezve.

A statisztikai vizsgálatra ebben a kísérletben a páros mintás t-próbát használtam a két színinger-megfeleltető rendszer közötti különbség ellenőrzésére. Külön vizsgáltam az interobserver és az intraobserver adathalmazt és mindkét esetben bebizonyosodott, hogy szignifikáns különbség van a két színinger-megfeleltető rendszer között ( $\alpha=0,05$ ). A vizsgálat eredményének pontos értékeit a 4-VI. és 4-VII. táblázatok foglalják össze. A táblázatok utolsó oszlopában található szignifikancia alacsony valószínűségi értéke bizonyítja, hogy a kísérlet

eredményeinek vizsgálatokor használt színínger-megfeleltető rendszerek között valódi eltérés van.

A 4.13. ábrán adattáblával kiegészített oszlopdiagramon is megfigyelhetjük a különbségeket, ahol még jobban kitűnnek a kék-mentes színíngerek alacsony különbségei.

A második kísérlet eredményei alapján megállapíthatom, hogy a Wold-féle LMS fundamentális színínger-megfeleltetők – a CIE 1931-es 2°-os színínger-megfeleltetőknél – alkalmasabbak a színes metamerek leírására, továbbá, hogy CIE 1931-es 2°-os színínger-megfeleltető rendszer hibája arányos az egyeztetendő színínger teljesítményének kéktartalmával.

#### 4-V. táblázat

A második kísérletsorozat színíngerkülönbségei színíngerenként (#1 – #9) a CIE 1931-es, és a Wold-féle Fundamentális színínger-megfeleltetőkkel számolva

referencia sorszáma	CIE 1931 szabványos				LMS fundamentális		
	bizonytalanság		Színíngerkülönbség		bizonytalanság		
	intra-obs.	inter-obs.	$\Delta E_{u'v'}$	Javulás [%]	$\Delta E_{u'v'}$	inter-obs.	intra-obs.
Ref #1	0,0030	0,0040	0,0253	46,6%	0,0135	0,0037	0,0027
Ref #2	0,0025	0,0034	0,0383	45,5%	0,0209	0,0030	0,0021
Ref #3	0,0015	0,0068	0,0249	39,6%	0,0150	0,0064	0,0013
Ref #4	0,0013	0,0039	0,0126	44,7%	0,0070	0,0041	0,0010
Ref #5	0,0019	0,0019	0,0026	51,7%	0,0012	0,0015	0,0021
Ref #6	0,0023	0,0039	0,0017	70,3%	0,0005	0,0043	0,0023
Ref #7	0,0013	0,0050	0,0173	36,8%	0,0110	0,0044	0,0010
Ref #8	0,0023	0,0037	0,0024	48,1%	0,0012	0,0038	0,0016
Ref #9	0,0011	0,0029	0,0062	44,1%	0,0035	0,0034	0,0016



#### 4-VI. táblázat

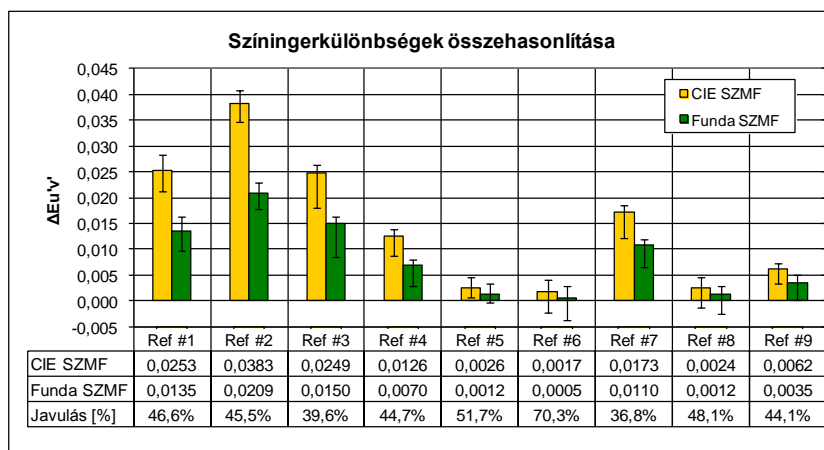
A második kísérlet interobserver statisztikája (SPSS eredmény)

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	CIE1931 - LMS	,005894	,0056608	,0007703	,004349	,007439	7,651	53	,000

#### 4-VII. táblázat

A második kísérlet intraobserver statisztikája (SPSS eredmény)

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	CIE1931 - LMS	,006146	,0058237	,0008681	,004397	,007896	7,080	44	,000



4.13. ábra

*Az egyes színinkerekhez tartozó színingskülönbségek és a beállítások bizonytalanságai (felső hibasávok: intraobserver, alsó hibasávok: interobserver)*

### 4.4. Legnagyobb telítettség típusú színings-egyeztető kísérletek

Következő kísérletemben arra kerestem a választ, hogy vajon az előbbiektől eltérő tulajdonságú alapszíninkereket alkalmazva milyen eltérés tapasztalható színings-egyeztetés során.

#### 4.4.1. A kísérlet célja és módszere

A második kísérlet után – azaz a színes inkereket vizsgáló kísérlet után – arra következtettem, hogy a melegfehér fényszínű inkerek mellett a színezetdús metamerek estében is a CIE 1931-

es 2°-osnál jobban teljesítenek a Wold-féle fundamentális színínger-megfeleltetők. Az eddig bemutatott két kísérletben az alapszíníngerek (4-I.) által lefedett színkészlet mérete és elhelyezkedése nagyon hasonló volt, hiszen kísérleti összeállítás módosításával csak a kék alapszíníngert szolgáltató LED domináns hullámhossza változott jelentősebb mértékben.

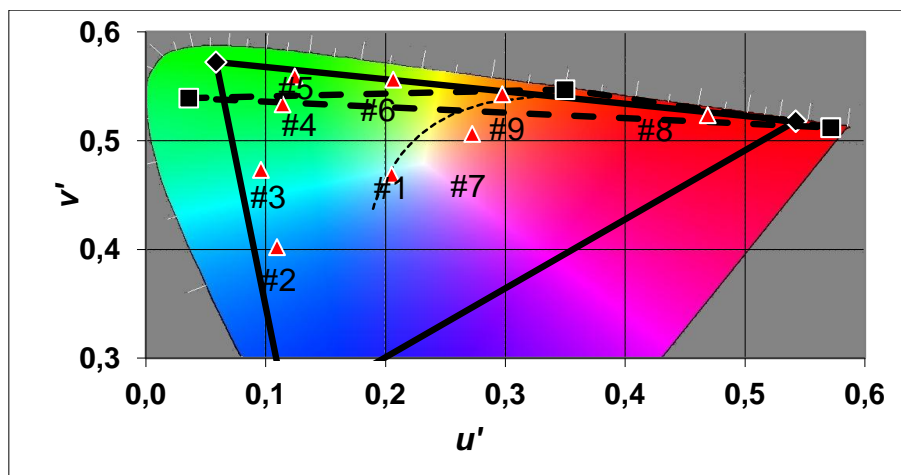
A különböző alapszínínger kategóriáknak a színínger-megfeleltetésre gyakorolt hatását Thornton és munkatársai már évekkel ezelőtt vizsgálták [54]. Az alapszíníngerek domináns hullámhossza alapján három alapszínínger kategóriát határoztak meg, úgymint Prime-Colour (PC), Non-Prime (NP) és Anti-Prime (AP). Például a PC kategóriájú alapszíníngerek olyan csúcshullámhosszú alapszíníngerek, amelyekre a látási rendszerünk leginkább reagál, vagyis, amelyekre a legérzékenyebb. A különböző monokromatikus alapszíníngerek használatával megállapították, hogy a különböző kategóriákba eső alapszíníngerekkel eltérő színíngerkülönbségek tapasztalhatók metamer színíngereket egyeztetve az alábbi – a színíngerkülönbségek nagyságára vonatkozó – összefüggés alapján.

$$PC < NP < AP \quad (4.4)$$

Harmadik kísérletem célja volt megállapítani, hogy a megfigyelt jelenséget milyen mértékben befolyásolja az alapszíníngerek hullámhossza. Laboratóriumunkban korábban Borbély Ákos vizsgálta [55] a metamer színíngerek egyeztetése esetén a különböző alapszíníngerek alkalmazásának hatását. Ő akkor kísérleteiben a Thornton értelemben Prime Colour (PC), és Non-Prime (NP) alapszínínger kategóriába tartozó alapszíníngerek használatakor a vizuális és objektív egyeztetések színíngerei között tapasztalt különbségeket vizsgálta, amellyel akkor cáfolta Thornton és munkatársai által korábban monokromatikus alapszíníngerek használata mellett tapasztalt színíngerkülönbségi sorrendet. Mivel a PC alapszínínger kategóriába tartozó fényekkel végzett egyeztetésekkor nagyobb színíngerkülönbséget tapasztalt, mint az NP alapszínínger kategóriába eső fények esetén, amely ellentmond a fentebb ismertetett (4.4) relációs összefüggésnek. Az AP alapszínínger kategóriát még nem vizsgáltuk a laboratóriumunkban, ezért előkészítettem egy ilyen típusú színíngeregyeztető kísérlet összeállítását.

Az első és második kísérletben használt alapszínínger csoportok (4-I. táblázat, #1-es és #2-es jelű sora) után a 4-I. táblázat harmadik sorában található alapszíníngereket használtam a harmadik kísérleti összeállításban. A 4.14. ábrán láthatjuk a folytonos szakaszok által határolt színkészletet, amely megfelel a második kísérletnél használt alapszíníngerek színkészletének. Egyeztetendő színíngerként az előző kísérlet azon színíngereit választottam, amelynél a legnagyobb színíngerkülönbség adódott. (4-V. táblázat, #2-es színínger).

A 4.14. ábrán a szaggatott vonallal határolt, az előzőeknél kisebb színkészletű terület a harmadik kísérleti összeállításban előállítható színíngerek készletét jelöli. Látható, hogy ez a színkészlet (szaggatott oldalakkal határolt háromszög) csak a #8-as és #9-es referencia színíngereket tartalmazza és nem tartalmazza például a legnagyobb egyeztetési hibával sújtott #2-es számú referencia színíngeri pontját. Ezért a kísérleti összeállítást úgy módosítottam, hogy legyen közös színíngeri pontja a referencia és teszt mezőket előállító színrendszernek. Csak egyetlen megoldás adódott erre a problémára, a borostyán ( $\lambda_{csúcs} = 595 \text{ nm}$ ) alapszíníngeri fényét a referencia mintához kellett keverni, így a harmadik kísérlet két-két monokromatikusnak tekinthető alapszíníngeri keverésével a maximum telítettség módszerének felel meg.



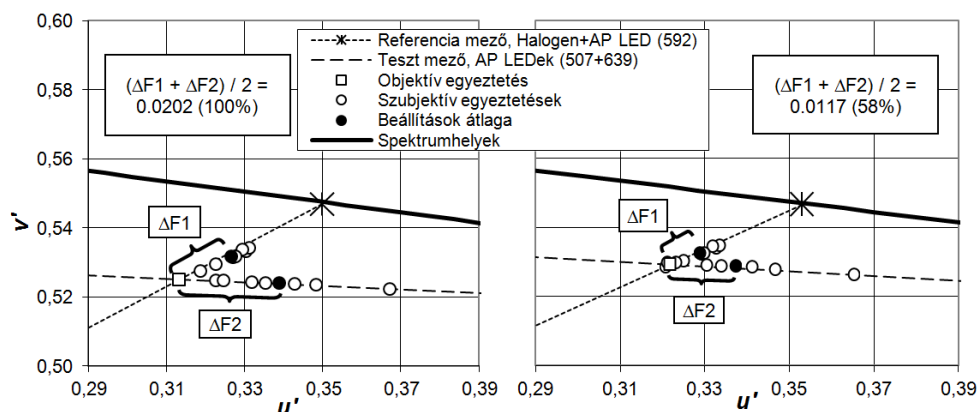
4.14. ábra

*A kísérletek színkészletei a különböző alapszíníngerekkel, folytonos vonallal a 4-I. táblázat #2-es sorában, a szaggatott vonallal pedig a táblázat #3-as sorában található alapszíníngerek színkészletét láthatjuk*

A kísérleti összeállításban tehát a három alapszíníngerből egyet (az 595 nm-eset) az egyeztetendő (#2-es) színíngerihez kellett keverni, hogy a referencia és teszt színíngeri között lehetséges legyen a színíngeregyezés. Ebben a kísérletben hét megfigyelő végezte el az egyeztetést. A megfigyelők ezzel az összeállítással speciális helyzetbe kerültek, mert elsősorban ugyan a teszt mezőhöz tartozó két alapszíníngert változtathatták, de ezen túlmenően a referencia egyeztetési mező intenzitását is módosíthatták az egyeztetés elérésének céljából. Az egyeztetések  $30 \text{ cd/m}^2$  fénysűrűségi szint mellett történtek, aminek az oka a borostyán, „elhúzó” alapszíníngeri korlátozott teljesítménye volt.

Az eredmények értékelése is speciális megközelítést kívánt, hiszen minden megfigyelőhöz tartozik egy egyedi referencia és az ahhoz beállított – szintén egyedi – teszt színíngeri. Az

objektív egyeztetésnek megfelelő színességi pontnak a két-két alapszínigereket összekötő szakasz metszéspontja (□-jel a 4.15. ábrán).



4.15. ábra

*A harmadik kísérlet eredményei. A szaggatott vonalak metszéspontjában található színesség az objektív egyeztetés helye. A bal oldali diagramban a CIE 1931-es függvényekkel számítottam, a jobb oldali esetében pedig a Wold-féle függvényekkel*

#### 4.4.2. Kísérleti eredmények értékelése

A 4.15. ábrán láthatjuk a kísérlet során beállított egyeztetések színességi koordinátáit. Megfigyelhető, hogy a megfigyelők beállításai az alapszíniger párokat összekötő szakaszra korlátozódnak. Az ábrán a fehér korongok jelölik a megfigyelők beállításainak színességi pontjait, ezek mezőnkénti (referencia és teszt) átlagát pedig a sötét korongok. A színiger-megfeleltetők jóságát jellemző mennyiség ebben az esetben is a szubjektív és az objektív színigeregyezések közötti Euklideszi távolság. Az objektív egyezési pont az alapszínigerpárokat összekötő szakaszok (szaggatott vonalak) metszéspontja. A 4.15. ábrán láthatjuk, hogy a beállítások átlagának az objektív egyezési ponttól mérhető átlagos távolsága 58%-ra csökken a Wold-féle fundamentális színiger-megfeleltetőket használva a számításokhoz (4.15. ábra, jobb oldal). Ez a színigerkülönbség csökkenés 42%-os javulásnak felel meg, ami teljes mértékben megfelel a második kísérletsorozatban tapasztalt javulás mértékével (#2-es színiger a 4.13. ábra adattáblájában), ami abban az esetben 45,5%-os volt. Ez a meglepő egyezés arra utal, hogy a vizuális és objektív színigeregyszetetések közötti színigerkülönbség kizárólag attól függ, hogy az egyeztetendő színiger színekében mennyi kék-tartalom található. Ha ez a különbség csak a színességi pont helyétől függene, akkor a harmadik kísérletben hasonló eredményt kellett volna kapnom, mint amit a második kísérlet #9-es színigerénél tapasztaltam.

## **4.5.A kísérleti eredmények szintetizálása és újabb színingermegefeleltető függvények megalkotása**

Az előbbieken ismertetett kísérleti eredményeknél láthattuk, hogy a Wold-féle fundamentális színinger-megfeleltetőket alkalmazva ~40%-50% mértékben lehet csökkenteni a színingeregyeztetési hibát. Ez ugyan szép eredmény, de még közel sem ad megoldást az alapproblémára. Ebben a fejezetben azt ismertetem, hogy milyen módon tudtam elérni a Wold-féle színinger-megfeleltetővel elért egyeztetési különbségek további csökkentését.

### **4.5.1. Szintetizálás**

A korábban tapasztalt színingeregyeztetési problémák vizsgálatára keskeny sáv szélességgel sugárzó világítódiodák, valamint színes, de széles sáv szélességű fényforrások által keltett referencia színingerek szisztematikus alkalmazásával többrészes kísérletsorozatban tártam fel a hiba előfordulásának részleteit. A legelső észleletbeli eltéréseket színvisszaadási kísérletek előkészítésekor tapasztaltam, amikor egy fehér egyeztetési mezőn izzólámpa melegfehér fényének megfelelő színingert vörös, zöld és kék világítódiodákat tartalmazó fényforrással spektrométer segítségével egyeztettem. Ekkor a színes világítódiodák kevert fénye által megvilágított fehér felület az izzólámpa fényénél zöldesebb árnyalatot kapott.

Először fehér ingerekkel végeztem kísérleteket, amelyek során a megfigyelőknek azt a feladatot adtam, hogy az egyeztetési mezőt állítsák be a színes világítódiodák meghajtóáramainak változtatásával úgy, hogy az észlelet egyezzen meg a referencia egyeztetési mezőn megjelenő izzólámpa által keltett színészlelettel. A megfigyelő által megállapított egyezés után végeztem el az objektív méréseket a spektrométerrel mindkét egyeztetési területen. Így jutottam a színingeregyeztetés vizsgálatának szempontjából igen hasznos adatokhoz. A melegfehér fényszínnek megfelelő színingerek környezetében tapasztalt első eredmények után a kísérletet kiterjesztettem a színességi diagram egyéb területeire is, hogy megismerjem a jelenség előfordulásának arányát a különböző színességi területeken.

Későbbi kísérleteimben már önvilágító egyeztetési mezőket alkalmaztam, ahol a megfigyelők feladata szintén az volt, hogy az izzólámpa és az üvegszűrők segítségével előállított színingereket, vörös, zöld és kék világítódiodák kevert fényével valósítsák meg. Az egyeztetendő színingereket a teljes észlelhető színingertartományból választottam.

A fehér és a színes ingerekkel végzett kísérletek után megvizsgáltam a színingeregyeztetés és az alapszíningerek hullámhosszának kapcsolatát. Összeállítottam egy Thornton értelemben anti-prime (AP) alapszíningerekkel dolgozó színingeregyeztető kísérletet, amelynek

eredményei alapján megállapítottam, hogy az általam tapasztalt színingeregyeztetési eltérések az egyeztető rendszer alapszíningereinek kék-tartalmától függenek.

#### 4.5.2. További fejlesztés

A bemutatott kísérletek eredményeiből láthattuk, hogy a CIE 1-36-os technikai bizottság jelentése alapján a csapérzékenységi függvényekből származtatott színinger-megfeleltető függvényekkel számolva a vizuális és objektív színinger-megfeleltetések közötti színinkülönbség hozzávetőlegesen felére csökkenthető. A CIE jelentésben a Stockman és Sharpe [56] által 2000-ben közreadott módosítások figyelembevételével származtatják a módosított CIE színinger-megfeleltető függvényeket, amelyeket  $\bar{x}_F$ ,  $\bar{y}_F$  és  $\bar{z}_F$  szimbólumokkal jelöltek. Az  $F$  index az angol *fundamental*-t jelöli, amely arra utal, hogy a függvényeket az  $l(\lambda)$ ,  $m(\lambda)$  és  $s(\lambda)$  csapérzékenységi függvényekből származtatták. A csapérzékenységi függvények és a színinger-megfeleltető függvények közötti kapcsolatot az alábbi (4.5) mátrix-transzformáció valósítja meg.

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_F(\lambda) \\ \bar{y}_F(\lambda) \\ \bar{z}_F(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,9109880 & -1,3946580 & 0,3893170 \\ 0,6431510 & 0,3959460 & 0,0000000 \\ 0,0000000 & 0,0000000 & 1,9193390 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l(\lambda) \\ m(\lambda) \\ s(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

A harmadik kísérletből az is kiderült, hogy a javulás mértéke független az alapszíninkerek típusától. Felmerülhet a kérdés, hogy vajon miként csökkenthető tovább ez a színinkülönbség? A kísérleti eredmények és a színingerösszetevők származtatásának figyelembevételével sejthetjük, hogy a megoldás a kék tartományban érzékeny színinger-megfeleltetők módosításával esetleg tovább növelhető az egyezés mértéke.

A színinger-megfeleltetők különböző matematikai modellekkel való sikertelen közelítése után a függvények hullámhossz-skálán való eltolásával kísérleteztem. Végül a (4.6) mátrixtranszformáció előtt a kék tartomány érzékenységet leíró  $s(\lambda)$  függvény -6 nm-es eltolásával sikerült olyan színinger-megfeleltető függvényeket származtatni, melyek megfelelnek a támasztott CIE követelményeknek és használatuk nagymértékben csökkenti a kísérletek során tapasztalt vizuális-objektív színinkülönbségeket. Az eredmény, azaz a második és harmadik kísérlet eredményeiből számított színinkülönbségek alakulása a 4.16. ábrán látható, a pontos értékeket pedig a 4-VIII. táblázat ismerteti.

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_{MF}(\lambda) \\ \bar{y}_{MF}(\lambda) \\ \bar{z}_{MF}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,9260000 & -1,3763289 & 0,3904850 \\ 0,6597958 & 0,4111496 & 0,0000000 \\ 0,0000822 & 0,0000000 & 1,9750000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l(\lambda) \\ m(\lambda) \\ s(\lambda)^* \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

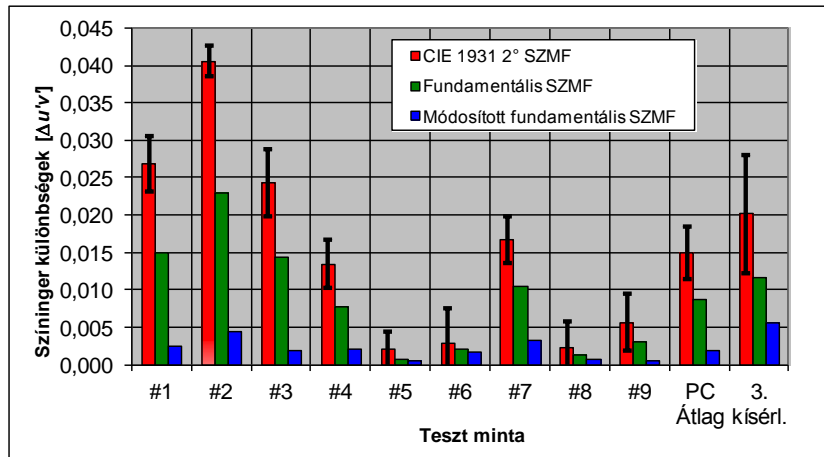
ahol  $l(\lambda), m(\lambda)$  és  $s(\lambda)$  a csapérzékenységi függvények és  $s(\lambda_1)^* = s(\lambda_{1+6})$  a függvényértékek eltolása miatt. Az  $\bar{x}_{MF}, \bar{y}_{MF}, \bar{z}_{MF}$  függvényjelölések indexében a módosított fundamentálist jelöli az  $MF$  rövidítés.

Kísérleteim és számításaim alapján megfogalmazom 4. tézisemet: a (4.6) szerinti módosított fundamentális színingermegefeleltető függvények  $\Delta(u'v') = 0,006$ -nél kisebb hibával írják le a megfigyelők által beállított színingerregyeztetéseket, függetlenül az alapszíninger csúcshullámhosszától.

#### 4-VIII. táblázat

Az objektív és a szubjektív színingerkülönbségek Euklideszi távolságának értéke a háromféle színinger-megefeleltető függvénycsomag használatával

	CIE 1931 2° SZMF	Fundamentális SZMF	Módosított Fundamentális SZMF
#1	0,0270	0,0151	0,0025
#2	0,0407	0,0231	0,0045
#3	0,0244	0,0145	0,0020
#4	0,0136	0,0079	0,0021
#5	0,0021	0,0009	0,0005
#6	0,0029	0,0022	0,0019
#7	0,0168	0,0105	0,0034
#8	0,0024	0,0013	0,0008
#9	0,0057	0,0031	0,0007
PC átlag (#1-#9)	0,0151	0,0087	0,0020
AP	0,0202	0,0117	0,0056



4.16. ábra

*A háromféle színinger-megfeleltető függvény (piros oszlopok – CIE 1931 2°, zöld oszlopok – Wold-féle, kék oszlopok – módosított Wold-féle) alapján számított vizuális-objektív színingerkülönbségek*

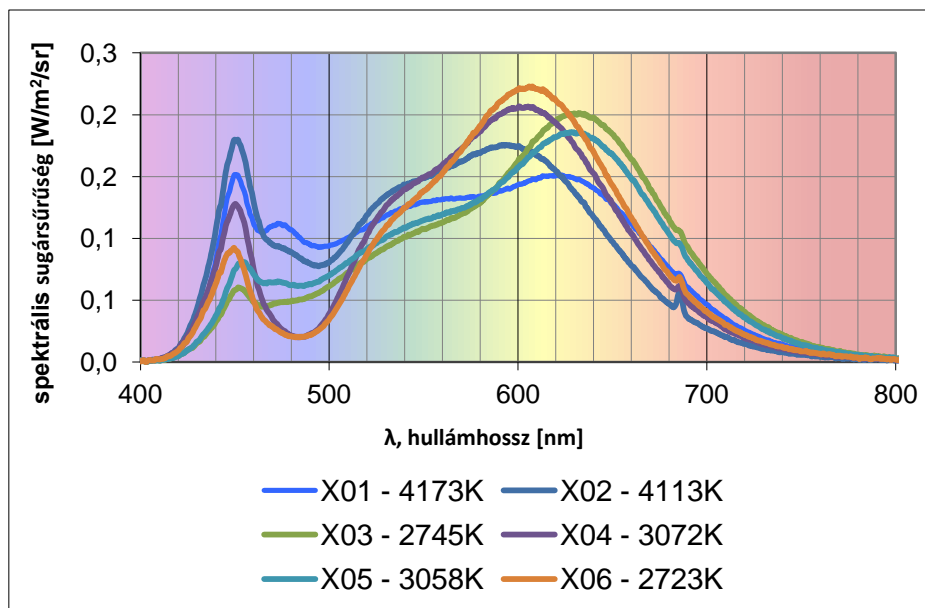
#### 4.6. További kísérletek fehér LED-ek észlelt egyezésének vizsgálatára

A 4.16. ábra alapján látható eredményeket tekintve felmerülhet, hogy az eredmény azért alakult ilyen előnyösen, mert az  $s(\lambda)$  csapérzékenységi függvény eltolásának optimalizálása a vizuális kísérleteim megfigyeléseire épült. Emiatt további kísérleteket végeztem a módszer alátámasztásának céljából. A következőkben bemutatásra kerülő kísérletek különböző fehér LED-ek felhasználásával történtek (keskeny, kék gerjesztő LED és széles sávban sugárzó sárga fénypor).

##### 4.6.1. Színinger egyeztetés jó, és közepesen jó színvisszaadású LED-ekkel

Ebben a kísérletben használt LED-es fényforrások távolról gerjesztett fényporú (remote phosphor) egységek voltak, ezekben az eszközökben fényport tartalmazó korongokat helyeznek a kék LED-eket tartalmazó üreg lezárásaként. A gyártók a korongokon elhelyezett fénypor összetételét úgy állították be, hogy különböző színekpi-teljesítményeloszlásokat kapjanak. A kísérletek első sorozatában 4000 K, 3000 K és 2700 K-es feketetést sugárzó színekpi-teljesítményeloszlásokat közelítették, viszonylag nagy színvisszaadási mutatóval ( $R_a = \sim 95$ , X03, X05, X01). Majd közepesen jó színvisszaadású ( $75 < R_a < 80$ ) egységek is készültek az előbbi példányok párjaiként, amelyeknek színingerei vizuálisan egyeztek a jó színvisszaadásúakéval. A színekpi-teljesítményeloszlások a 4.17. ábrán láthatóak.





4.17. ábra

*A jó és közepesen jó színvisszaadású egység-párok színeképei*

A vizuálisan egyeztetett egységek színességi koordinátáit különböző SZMF-kel számítottam, amelynek eredményeként a módosított függvényeimmel két pár esetben is jobb egyezést sikerült elérni. A 3000 K-es pár esetében a CIE TC 1-36 kísérleti függvényeivel [50] adódott a legkisebb színingerkülönbség, viszont ebben az esetben volt a maradék eltérés értéke a legnagyobb (0,0019), lásd a **4-IX.** táblázatban.

Egyrésztől érdekes volt, hogy az olyan kismértékű színeképi különbségek esetében is tapasztalható vizuális eltérés műszeres egyeztetés után, mint amelyeket a jó és a közepesen jó színvisszaadású párok színeképeinél figyelhetünk meg, másrészt a 3000 K-es lámpa párnál tapasztalt eltérés további vizsgálatot igényelt.

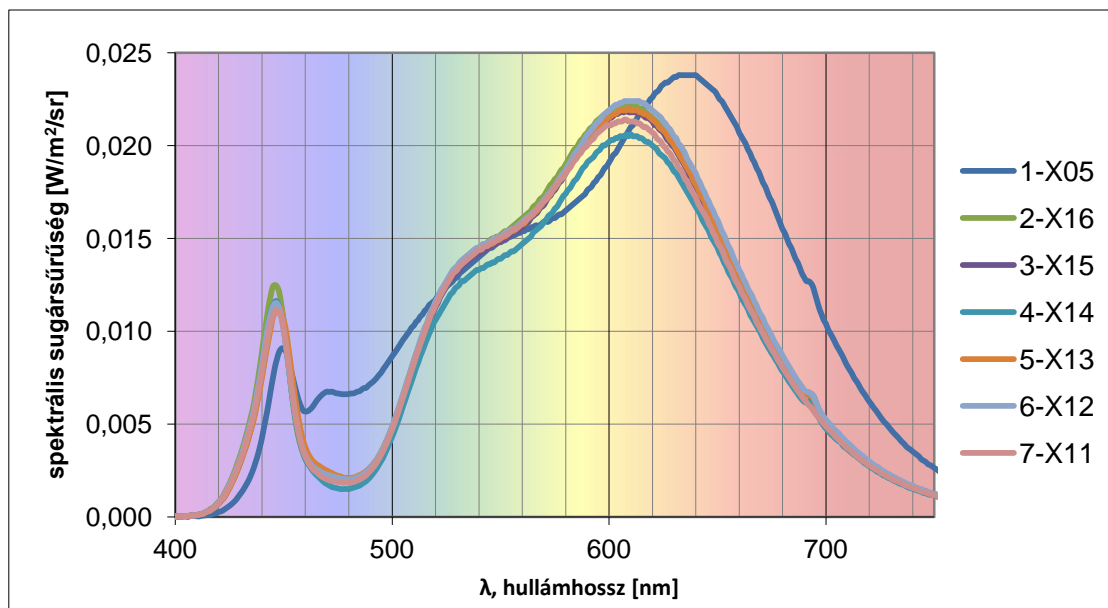
#### 4-IX. táblázat

A jó és közepesen jó színvisszaadású lámpák színességi adatai a három féle korrelált színhőmérsékletre.

LED Nr.	$T_{cc}$ , K	$R_a$		CIE 1931 2° Obs.	Fundamentális 2° Obs.	Módosított Fundamentális 2° Obs.
X06	2723	76	$u'$ :	0,2626	0,2652	0,2646
			$v'$ :	0,5272	0,5278	0,5300
X03	2745	96	$u'$ :	0,2633	0,2654	0,2648
			$v'$ :	0,5240	0,5261	0,5302
			$\Delta(u'v')$ :	<b>0,0032</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0003</b>
X04	3072	76.6	$u'$ :	0,2488	0,2511	0,2508
			$v'$ :	0,5203	0,5212	0,5239
X05	3058	95.5	$u'$ :	0,2510	0,2528	0,2525
			$v'$ :	0,5177	0,5204	0,5255
			$\Delta(u'v')$ :	<b>0,0034</b>	<b>0,0019</b>	<b>0,0024</b>
X02	4113	84	$u'$ :	0,2238	0,2248	0,2248
			$v'$ :	0,4979	0,5009	0,5066
X01	4173	94	$u'$ :	0,2244	0,2251	0,2249
			$v'$ :	0,4951	0,4989	0,5059
			$\Delta(u'v')$ :	<b>0,0029</b>	<b>0,0020</b>	<b>0,0008</b>

#### 4.6.2. Melegfehér lámpák ellenőrzése

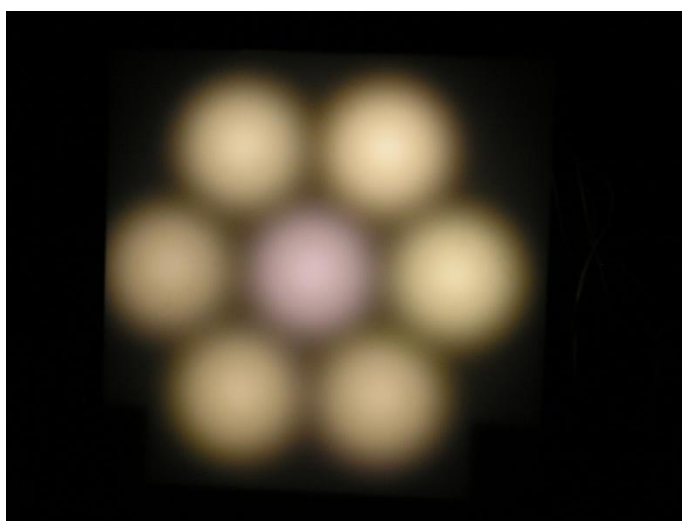
Hogy megértssem a színinger-megfeleltető függvényeim rosszabb eredményét a 3000 K-es lámpák esetében, egy további kísérletet végeztem ilyen fényszínű lámpákkal. Egy jó színvisszaadású ( $R_a = 95$ ) 3000 K-es egységet tekintettem referenciának, majd hat hasonló korrelált színhőmérsékletű, ám gyengébb színvisszaadású lámpát használtam összehasonlító egységekként. A hét lámpa színe látható a 4.18 ábrán. Megfigyelhetjük, hogy a különböző egységeknél a kék teljesítménycsúcsoknál ( $\lambda = \sim 450$  nm) apró eltérések tapasztalhatóak a csúcshullámhosszak tekintetében.



4.18. ábra

*A jó színvisszaadású (X05) referencia lámpa és a hat kismértékben eltérő közepesen jó színvisszaadású összehasonlító lámpa színeképe*

A mintákat egy áttetsző ernyő mögé szereltem fel méhsejt elrendezésben, a referencia lámpát középre helyezve. A 4.19 ábra mutatja a vizuális kísérlet elrendezését.



4.19. ábra

*A 3000 K-es fényeket vizsgáló kísérleti összeállítás látványa*

Megjegyzem, hogy a 4.19 ábrán látható jelentős színelkülönbség a felvételhez használt kamera tulajdonsága által okozott jelenség. Vizuálisan a fényfoltok között csak csekély mértékű színelkülönbség volt látható, amelyet értékelni kellett a megfigyelőknek.

Elsőként a lámpákat úgy állítottam be, hogy azok egyező fénysűrűséget okozzanak az áttetsző ernyőn, majd a megfigyelőknek sorrendet kellett felállítaniuk a hat teszt lámpa között

a jó színvisszaadású referenciához képest megítélhető színelkülönbségük alapján. Minden fényfolt spektrális sugársűrűségét megmértem, majd ez alapján kiszámítottam a referenciához képest számított színességbeli különbségeket és CIELAB színelkülönbségeket. A 4-X. táblázat 2. sorában láthatjuk az átlagos vizuális sorrend értékeit, valamint a  $\Delta(u',v')$  színíngerekülönbségeket a háromféle számítási mód alapján (5-6-7-es sorok) és a  $\Delta E_{ab}^*$  értékeket szintén a háromféle számítási mód használatával származtatva (8-9-10-es sorok).

#### 4-X. táblázat

A hat darab tesztlámpa fényének referenciához viszonyított vizuális és számított színíngerekülönbségei

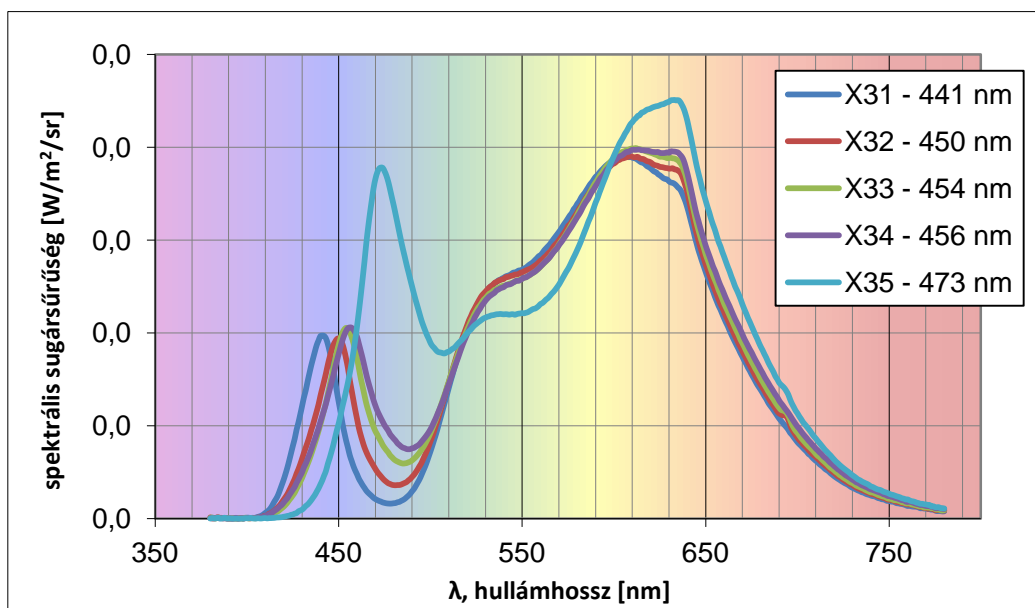
1			7:X11	3:X15	5:X13	2:X16	6:X12	4:X14
2		Viz.különb. X05-höz	28,7	29,3	52,8	61,8	65,5	76,8
3		szórás	1,3	1,3	1,1	1,0	0,8	1,4
4		fénysűrűség, cd/m <sup>2</sup>	1134	1152	1162	1140	1127	1147
5	$\Delta(u',v')$	CIE 1931	0,004	0,0028	0,0025	0,0033	0,0022	0,0035
6		Wold-féle	0,0021	0,0023	0,0016	0,0015	0,0027	0,0022
7		Módosított Wold-féle	0,0021	0,0032	0,0025	0,0026	0,0038	0,0035
8	$\Delta E_{ab}^*$	CIE 1931	7,66	6,52	5,68	5,09	6,65	4,62
9		Wold féle	4,35	3,56	2,79	1,7	3,58	3,23
10		Módosított Wold-féle	1,28	2,02	2,24	4,15	2,52	6,61

Mint az a fenti adatokból látható a módosított SZMF-kel számított színíngerekülönbség alapján felállított sorrend (lásd 10. sor) jól egyezik a megfigyelők által vizuálisan felállított sorrenddel (lásd 1. sor), legalábbis a referenciához a három legközelebb eső lámpa esetében. A CIE 1931-es SZMF-kel számított sorrend szinte fordított eredményt mutat, de a CIE TC 1-36-os kísérleti függvényekkel számított sorrend is rosszabb a módosított függvények által számított sorrendnél.

Mivel a lámpák színeképeinek kék tartományában láthattunk kisebb eltéréseket és mivel a SZMF-ek ugyanebben a tartományban különböznek a legnagyobb mértékben a konkurens függvényektől, ezért ezt a kérdést is tovább vizsgáltam egy újabb vizuális kísérlettel.

### 4.6.3. Az eltérő kék gerjesztésű fehér LED-ek vizsgálata

A gyakorlatban a fényforrás gyártók összfényáramra és domináns hullámhosszra válogatva (bin-elve) kapják a kék LED-eket. Az utolsó kérdés, amelyre a kísérletsorozatban még választ szerettem volna kapni az volt, hogy a kék gerjesztő LED-ek közötti különbségeknek van-e vizuálisan észlelhető hatása, ha azokat az egyik, vagy másik fajta SZMF-el állították be a kívánt színességre. Öt lámpa készült különböző kék gerjesztő LED-ek segítségével közel azonos végső színességre hangolva, lásd 4.20. ábra és 4-XI. táblázat.



4.20. ábra

*Öt, különböző kék gerjesztő LED-et használó fehér LED színeképe*

### 4-XI. táblázat

Az öt, különböző kék gerjesztő LED-et használó fehér LED fontosabb színtani adatai.

	X31	X32	X33	X34	X35
Rel. fényerősség	100,0	85,7	93,8	84,3	51,8
x (CIE 1931)	0,4438	0,4359	0,4324	0,4275	0,4108
y (CIE 1931)	0,4186	0,4092	0,4008	0,3939	0,3778
CCT [K]	3002,1	3059,3	3050,3	3081,2	3268,2
CRI	76,7	81,0	84,7	86,7	79,5

Mivel a lámpák vizuálisan meglehetősen különböztek, ezért nem úgy döntöttem, hogy egy választott referenciához képest skálázom a többit, mint ahogyan azt az előző kísérletemben tettem, hanem egy vizuális színingeregyeztető kísérletet állítottam össze, amelyben minden lámpát külön kellett vizuálisan egyeztetni egy referencia RGB LED-es rendszerrel. Ennek eredménye látható a 4-XII. táblázatban.

#### 4-XII. táblázat

Az X31-X35-ös fehér LED-ek színineregyeztetés utáni színinkerkülönbségei az  $u',v'$  színességi diagramban számítva.

	CIE 1931	Wold-féle	Módosított Wold-féle
X31	0,0075	0,0055	<b>0,0045</b>
X32	0,0066	0,0057	<b>0,0052</b>
X33	0,0041	0,0038	<b>0,0037</b>
X34	0,0055	0,0051	<b>0,0050</b>
X35	0,0049	<b>0,0037</b>	0,0048

Az öt lámpából négy esetben a PE jelzésű, módosított színinker-megfeleltető függvényei által számított színinkerkülönbség adta az egyeztetés utáni legkisebb eltérést. Az X35 esetében (470 nm-es kék csúccsal rendelkezik) a CIE TC 1-36 kísérleti színinker-megfeleltető függvényei hoztak jobb eredményt. Megjegyzem, hogy az X33 és X34 esetekben a CIE 1931-es oszlophoz viszonyított különbségek nem jelentősek.

#### 4.7.Összefoglalás

A kísérletek eredményei azt mutatták meg, hogy a szabványos CIE 1931-es színinker-megfeleltető függvények keskeny hullámhossz-tartományban sugárzó megvilágítók (pl. LED-ek) esetén bizonyos esetekben nagy hibával írják le a színességeket. A hiba nagysága arányos a kérdéses sugárzás kék tartalmával. Mivel az LMS csapjelekből transzformált színinker-megfeleltetők rendszerében számottevően kisebb a színinkerkülönbség a referencia színessége és a megfigyelők által beállított színességek között, ezért kimondható, hogy ez a rendszer alkalmasabb a keskeny sávú megvilágítók esetén a színekép alapú színinker egyeztetésre. További javulást érhetünk el a színinkerértékek származtatásakor, ha az LMS függvényeket még a transzformáció előtt kis mértékben transzformáljuk. Az így elérhető javulás már a szubjektív színinkeregyeztetés interobszerver bizonytalanságának közelébe csökkenti a színinkerkülönbséget.

## 5. Az új tudományos eredmények összefoglalása

A munkám során keletkezett tudományos eredményeket az alábbi tézisekben foglaltam össze. Az 1. és 2. tézisek a világítódiodák fotometriai jellemzésével kapcsolatosak, míg a 3. és 4. tézisek a világítódiodák színingermetriájával kapcsolatos eredmények alapján fogalmazhatók meg.

1. Tézis: A (3.5) szerinti valós fotometriai hibamutató alkalmas a különböző, ismert  $s(\lambda)_{\text{rel}}$  színképi érzékenyséű fotométerek összehasonlítására. **[P1], [P2], [P3], [P4]**

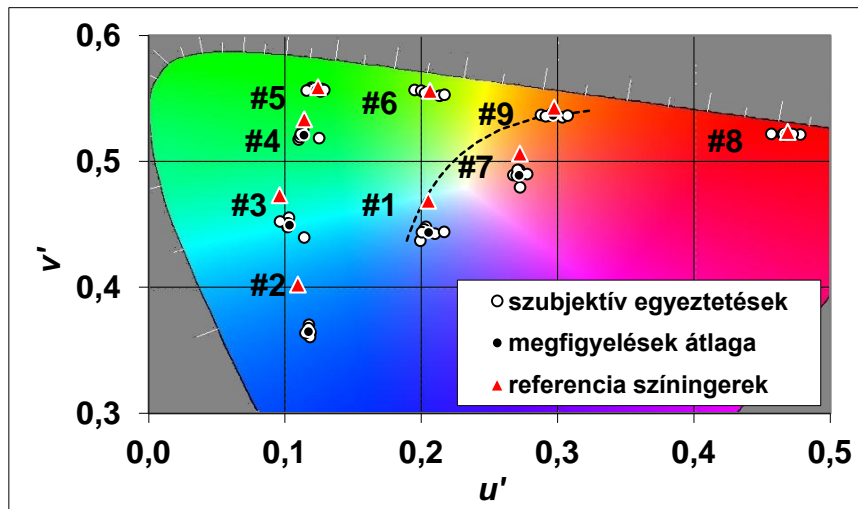
$$PE\{s(\lambda)_{\text{rel}}, S(\lambda)_{\text{LED}}\} = \frac{\left| \int_{380}^{780} s^*(\lambda, \lambda_{\text{STD}}) S(\lambda)_{\text{LED}} d\lambda - \int_{380}^{780} V(\lambda) S(\lambda)_{\text{LED}} d\lambda \right|}{\int_{380}^{780} V(\lambda) S(\lambda)_{\text{LED}} d\lambda} \quad (3.5)$$

2. Tézis: A (3.6) szerinti parciális színképi illesztetlenségi mutatókkal becsülhető a valós fotometriai hiba nagysága. **[P1], [P2], [P3], [P4]**

$$f_{1,\text{PAR}}(\lambda_{\text{STD}}) = \frac{\int_{380}^{780} |s^*(\lambda, \lambda_{\text{STD}})_{\text{rel}} - V(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda}, \quad (3.6)$$

$$\text{amelyben } s^*(\lambda, \lambda_{\text{STD}})_{\text{rel}} = s(\lambda)_{\text{rel}} \cdot \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda)_{\text{STD}} \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda)_{\text{STD}} \cdot s(\lambda)_{\text{rel}} d\lambda}.$$

3. Tézis: A CIE 1931-es szabványos színíngermegfeleltető függvények bizonyos keskeny színekben sugárzó LED-ek és széles sávban sugárzó egyeztető színíngerek esetében nem jól írják le az egyeztetést (4.11. ábra). [P5], [P6], [P7]



4.11. ábra

*Kísérleti színíngerek a CIE 1931 2°-os színínger-megfeleltetővel számítva. Az üres körök jelzik a megfigyelők által beállított egyeztetések színíngereit, a piros háromszögekkel jelölt referencia színíngerekhez*

4. Tézis: A (4.6) szerinti módosított fundamentális színíngermegfeleltető függvények  $\Delta(u'v') = 0,006$ -nél kisebb hibával írják le a megfigyelők által beállított színíngeregyeztetéseket, függetlenül az alapszíníngerek csúcshullámhosszától.

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_{MF}(\lambda) \\ \bar{y}_{MF}(\lambda) \\ \bar{z}_{MF}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,9260000 & -1,3763289 & 0,3904850 \\ 0,6597958 & 0,4111496 & 0,0000000 \\ 0,0000822 & 0,0000000 & 1,9750000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l(\lambda) \\ m(\lambda) \\ s(\lambda)^* \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

ahol  $l(\lambda)$ ,  $m(\lambda)$  és  $s(\lambda)$  a csapérzékenységi függvények és  $s(\lambda_i)^* = s(\lambda_{i+6})$  a függvényértékek eltolása miatt. Az  $\bar{x}_{MF}$ ,  $\bar{y}_{MF}$ ,  $\bar{z}_{MF}$  függvényjelölések indexében a módosított fundamentálist jelöli az  $MF$  rövidítés. [P5], [P6], [P7]

## 5.1. További kutatási lehetőségek

A világítódiodák fotometriai jellemzése még ma is igen népszerű téma a szakmai fórumokon. 2016-ban már számos LED-etalon gyártó kínálja a termékeit a legkülönbözőbb kivitelekben. A termékeket főként az integrálogömbös mérési elrendezésekben használják, amelyek között megtalálhatóak önálló egységként működő etalonok, de létezik többféle etalon-LED-et tartalmazó kompakt rendszer is. A fejlesztési irányok ma már egyre inkább a színekpi



felbontású mérőeszközökre épülnek köszönhetően azok egyre kedvezőbb árának. A kutatási irányok az egyes mérendő LED-ek színképi teljesítményeloszlásának becslésétől a fotométerek  $V(\lambda)$  illesztési jóságának növeléséig terjednek.

A színingermetriai jellemzéssel kapcsolatos további kutatások aktualitását a világítódíóda alapú kijelzők elterjedése bizonyítja, amelyeket speciális alkalmazások során a régebbi technológiájú katódsugárcsöves kijelzőkkel együtt is használnak például a nyomdai előkészítésben, vagy a televíziós stúdiótechnikában. Érdekes kutatási irány egy kijelző alapszíningereinek kiválasztásához az emberi észlelés érzékenységi variancia minimumát megkeresni. Egy másik lehetséges kutatási irány a többcsatornás hangolható világítótestek egyéni beállítása adott fényszínű fehér referencia fényingerhez, amelyre az emberközpontú általános világítás területén mutatkozik igény.

## 5.2.Saját publikációk

- [P1] **Csuti P**, Kránicz B: „Description of a partial  $f_1$ ’ error index recommended for LED photometry”, *Light & Engineering*, 2006. Vol.14, No.1., ISSN 0236-2945 **(1. és 2. tézis)**
- [P2] **Csuti P**, Kránicz B, Schanda J, ”Comparison of the goodness of fit of photometers to the  $V(\lambda)$  function using real LED spectra”, CIE Expert Symp. on LED Light Sources: Physical measurement and visual and photobiological assessment, Tokyo, Japan, June 2004. **(1. és 2. tézis)**
- [P3] **Csuti P**, Schanda Gy, Schanda J, ”Decreasing the uncertainty of LED photometric and colorimetric measurements”, Lighting in the XXI Century CIE Divisional and Technical Committees Meetings, León, Spain, 12-21. May 2005. **(1. és 2. tézis)**
- [P4] **Csuti Péter**, Világítástechnikai évkönyv 2012-2013, „Világítás és ember” című fejezetben a „LED-es fényforrások fotometriai és villamos tulajdonságainak meghatározása” című rész. pp. 76-79., HU ISSN 1416-1079 **(1. és 2. tézis)**
- [P5] **Csuti P.**, N. Vidovszky Á., Schanda J., ”On the Application of Modern Light Sources – with emphasis on home lighting”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol 2008, No. 8, p 84-88, PL ISSN 0033-2097 **(3. és 4. tézis)**, **Impakt faktor: 0,242 (2008)**
- [P6] **Csuti, P**; Schanda, J (2010), ”A Better Description of Metameric Experience of LED-Clusters”, *Light & Engineering*, Vol. 18, No. 1, p 44-50, 2010, ISSN 0236-2945 **(3. és 4. tézis)**, **Impakt faktor: 0,036 (2010)**
- [P7] **Csuti P**, Schanda J: “Colour matching experiments with RGB-LEDs”, *Color Research and Application*, April 2008. Vol.33, Issue 2, p 108-112 **(3. és 4. tézis)**, **Impakt faktor: 1,0 (2008)**

## I. Melléklet: A Wold-féle fundamentális színinger-megfeleltető rendszer

A CIE 1931-es szabványos színingertermő rendszer megalkotásakor az alábbiak voltak a főbb követelmények:

1. Minden színinger nem negatív tristimulusos értékekkel kell, hogy rendelkezzen.
2. A színességi diagramban az alychne vonalnak (nulla fénysűrűségű színingerek helye) egybe kell esnie az abszcissza tengellyel.
3. A szabványos E megvilágító mindkét színességi koordinátája az 1/3-ot kell, hogy felvegye.

Wold, a fentieket szem előtt tartva, továbbá azokat kiegészítve alkotta meg a saját követelményrendszerét, mely az alábbi pontokból áll:

- i. Az  $\bar{x}_F$ ,  $\bar{y}_F$  és  $\bar{z}_F$  mind nem negatívok, vagyis

$$\forall i \in (1, 2, \dots, n): (\bar{x}_F(\lambda_i) \geq 0 \wedge \bar{y}_F(\lambda_i) \geq 0 \wedge \bar{z}_F(\lambda_i) \geq 0),$$

$$(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = (390\text{nm}, 391\text{nm}, \dots, 830\text{nm})$$

- ii. Az  $(x_F, y_F)$  Wold-féle színességi diagramban az alychne az  $Y_F$ -fel arányos melyet az abszcisszával egybeeső vonal jellemez és így  $\bar{y}_F \equiv Y_F$ .

- iii. Az E ekviennergetikus szabványos megvilágító  $x_{F,E}$ ,  $y_{F,E}$  és  $z_{F,E}$  Wold-féle színességi koordináták értéke mind 1/3, amiből következik, hogy

$$\sum_{i=1}^n \bar{x}_F(\lambda_i) = \sum_{i=1}^n \bar{y}_F(\lambda_i) = \sum_{i=1}^n \bar{z}_F(\lambda_i), (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = (390 \text{ nm}, 391 \text{ nm}, \dots, 830 \text{ nm}).$$

- iv. A  $\bar{z}_F$  függvényértékei arányosak az S-csapok érzékenységi függvényéhez, vagyis  $\bar{z}_F(\lambda) \propto \bar{s}(\lambda)$ ,  $\lambda \in \{390 \text{ nm}, 391 \text{ nm}, \dots, 830 \text{ nm}\}$ .

- v. Az  $(r_F, g_F)$  színességi diagramjában – mely a 700,0 nm, 546,1 nm és 435,8 nm hullámhosszakra épül és úgy normált, hogy (1/3, 1/3) pontban legyen az E megvilágító – az  $\bar{y}_F$  és  $\bar{z}_F$  függvényeket megalapozó virtuális alapszíningerek színességeit összekötő egyeneshez Euklideszi értelemben legközelebb eső spektrumszínnek az előzővel analóg, a CIE 1931-es szabványos színingertermő észlelőre épülő,  $(r, g)$  színességi diagramban is a legközelebb lévők lesznek.

vi. Az i-v követelmények megszorításainak köszönhetően, a spektrumszínek helyei között a különbség az  $(x_F, y_F)$  fundamentális és a  $(x, y)$  CIE 1931-es szabványos színinermérő észlelő színességi diagramjában a lehető legkisebb az alábbi négyzetes

$$\text{közép szerint } \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{F_{\lambda_i}} - x_{\lambda_i})^2 + (y_{F_{\lambda_i}} - y_{\lambda_i})^2} = \min \left[ \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{F_{\lambda_i}} - x_{\lambda_i})^2 + (y_{F_{\lambda_i}} - y_{\lambda_i})^2} \right]$$

, ahol  $x_{F_{\lambda_i}}$  és  $y_{F_{\lambda_i}}$  a spektrumszínhelyek fundamentális színességi koordinátái az alábbi egyenletek szerint

$$x_{F_{\lambda_i}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\bar{x}_F(\lambda_i)}{\bar{x}_F(\lambda_i) + \bar{y}_F(\lambda_i) + \bar{z}_F(\lambda_i)}, \quad y_{F_{\lambda_i}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\bar{y}_F(\lambda_i)}{\bar{x}_F(\lambda_i) + \bar{y}_F(\lambda_i) + \bar{z}_F(\lambda_i)},$$

$$(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = (390\text{nm}, 391\text{nm}, \dots, 830\text{nm}),$$

és  $x_{\lambda_i}$  és  $y_{\lambda_i}$  a megfelelő spektrumszínhelyek a CIE 1931-es XYZ rendszerben.

Az  $\bar{l}$ ,  $\bar{m}$  és  $\bar{s}$  fundamentális csapérzékenységi függvényekből az alábbi egyenletrendszer alapján származtathatóak az  $\bar{x}_F$ ,  $\bar{y}_F$  és  $\bar{z}_F$  színinermérő-megfeleltető függvények

$$\bar{x}_F(\lambda) = 1,910988 \bar{l}(\lambda) - 1,394658 \bar{m}(\lambda) + 0,389317 \bar{s}(\lambda),$$

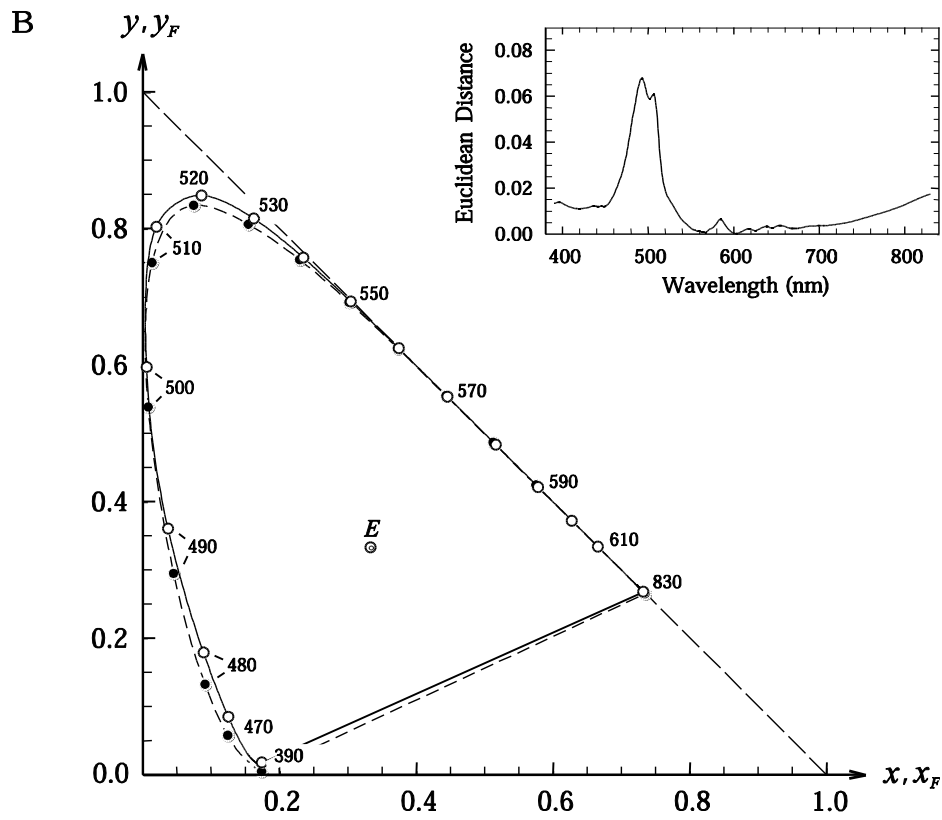
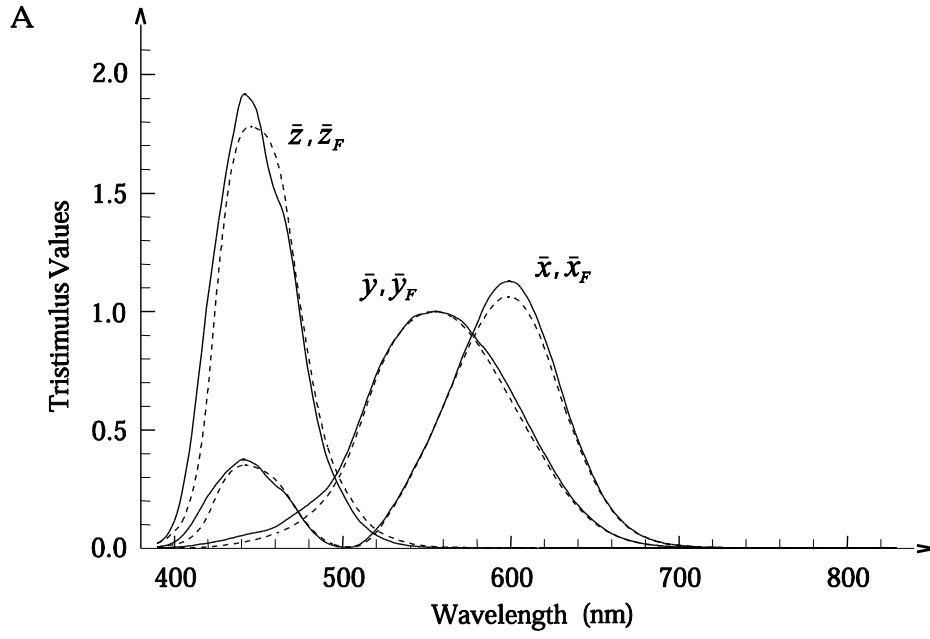
$$\bar{y}_F(\lambda) = 0,643151 \bar{l}(\lambda) + 0,395946 \bar{m}(\lambda) + 0,000000 \bar{s}(\lambda),$$

$$\bar{z}_F(\lambda) = 0,000000 \bar{l}(\lambda) + 0,000000 \bar{m}(\lambda) + 1,919339 \bar{s}(\lambda).$$

Ennek megfelelően az  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$  és  $\bar{s}(\lambda)$  relatív fundamentális csapérzékenységi függvényekhez tartozó  $x_{F_{\lambda}}$  és  $y_{F_{\lambda}}$  színességi koordinátákat az alábbi egyenletekkel számolhajtuk:

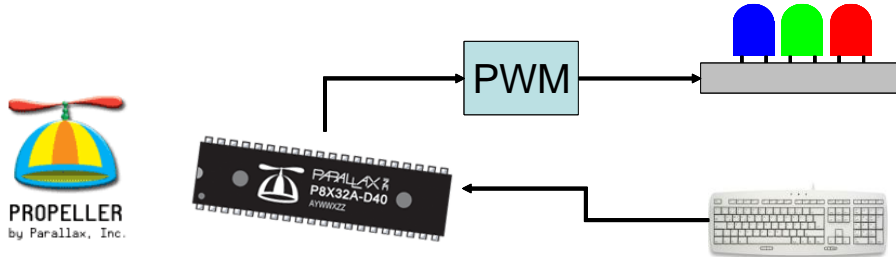
$$x_{F_{\lambda}} = \frac{1,910988 \bar{l}(\lambda) - 1,394658 \bar{m}(\lambda) + 0,389317 \bar{s}(\lambda)}{2,554139 \bar{l}(\lambda) - 0,998712 \bar{m}(\lambda) + 2,308656 \bar{s}(\lambda)}$$

$$y_{F_{\lambda}} = \frac{0,643151 \bar{l}(\lambda) + 0,395946 \bar{m}(\lambda) + 0,000000 \bar{s}(\lambda)}{2,554139 \bar{l}(\lambda) - 0,998712 \bar{m}(\lambda) + 2,308656 \bar{s}(\lambda)}.$$



## II. Melléklet: Az RGB LED-ek vezérlése

A megfigyelők beviteli eszközét – a billentyűzetet – és a PWM tápegységeket egy *Propeller* fantázianevű többmagos mikrovezérlő kapcsolta össze. Ennek a vezérlőnek a memóriájában futott az a program, amely konvertálta a megfigyelők észleleti paramétereit a valós vörös, zöld, és kék csatornaáramokká. A felépítés sematikus ábrája látható a II.1. ábrán. A mikrovezérlőhöz két egység csatlakozik, a beviteli egység, ami egy számítógép billentyűzet és a kimeneti egység, ami a LED-eket meghajtó áramgenerátorok PWM bemenete.



II.1. ábra

*A LED-ek meghajtása PWM tápegységgel*

A konverziós program pszeudo kódja a következő [53]:

```
HSV2RGB
if ( S == 0 )                               //HSV values = 0 ÷ 1
{
  R = V * 255
  G = V * 255
  B = V * 255
}
else
{
  var_h = H * 6
  if ( var_h == 6 ) var_h = 0                 //H must be < 1
  var_i = int( var_h )                       //Or ... var_i = floor( var_h )
  var_1 = V * ( 1 - S )
  var_2 = V * ( 1 - S * ( var_h - var_i ) )
  var_3 = V * ( 1 - S * ( 1 - ( var_h - var_i ) ) )

  if ( var_i == 0 ) { var_r = V ; var_g = var_3; var_b = var_1 }
  else if ( var_i == 1 ) { var_r = var_2; var_g = V; var_b = var_1 }
  else if ( var_i == 2 ) { var_r = var_1; var_g = V; var_b = var_3 }
  else if ( var_i == 3 ) { var_r = var_1; var_g = var_2; var_b = V }
  else if ( var_i == 4 ) { var_r = var_3; var_g = var_1; var_b = V }
  else { var_r = V ; var_g = var_1; var_b = var_2 }

  R = var_r * 255                             //RGB results = 0 ÷ 255
  G = var_g * 255
  B = var_b * 255
}
```

...és a DAC-értéket észleleti paraméterekké konvertáló kód:

```
RGB2HSV
var_R = ( R / 255 )                          //RGB values = 0 ÷ 255
var_G = ( G / 255 )
var_B = ( B / 255 )

var_Min = min( var_R, var_G, var_B )         //Min. value of RGB
var_Max = max( var_R, var_G, var_B )         //Max. value of RGB
del_Max = var_Max - var_Min                  //Delta RGB value
```

```

V = var_Max

if ( del_Max == 0 ) //This is a gray, no chroma...
{
  H = 0 //HSV results = 0 ÷ 1
  S = 0
}
else //Chromatic data...
{
  S = del_Max / var_Max
  del_R = ( ( var_Max - var_R ) / 6 ) + ( del_Max / 2 ) / del_Max
  del_G = ( ( var_Max - var_G ) / 6 ) + ( del_Max / 2 ) / del_Max
  del_B = ( ( var_Max - var_B ) / 6 ) + ( del_Max / 2 ) / del_Max

  if ( var_R == var_Max ) H = del_B - del_G
  else if ( var_G == var_Max ) H = ( 1 / 3 ) + del_R - del_B
  else if ( var_B == var_Max ) H = ( 2 / 3 ) + del_G - del_R

  if ( H < 0 ) ; H += 1
  if ( H > 1 ) ; H -= 1
}

```

## Irodalomjegyzék

---

- 1 Tömösközi, P., *Digitális szövegfeldolgozás*. Eszterházy Károly Főiskola, Eger, 2011. ISBN 978-615-5221-12-5
- 2 Commission Internationale de l'Eclairage, *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*, Publication CIE 13.3-1995, ISBN 978 3 900 734 57 2
- 3 Photo Research, PR-1980A Pritchard Photometer, Kollmorgen Div (1991)
- 4 Gibson, K.S., *The relative Visibility Function*, Recueil des Travaux, 6th Session 1924, Commission internationale de l'Eclairage proceedings, 1926. Cambridge University Press, Cambridge. pp 232-238.
- 5 Crawford, B., The scotopic visibility function, *Proceedings of the Physical Society*, B 62, 321—34 (1949)
- 6 Commission Internationale de l'Eclairage, *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*, Technical Report, CIE 191:2010, ISBN 978 3 901906 88 6
- 7 Commission Internationale de l'Eclairage, *The Basis of Physical Photometry*, Publication CIE 18.2-1983, ISBN 978 92 9034 018 8
- 8 Commission Internationale de l'Eclairage, *Measurement of LEDs*, Publ. CIE127:2007, ISBN 978 3 901 906 58 9
- 9 ISO/CIE *Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters*, ISO/CIE 19476:2014
- 10 Commission Internationale de l'Eclairage, *Methods of characterizing the performance of radiometers and photometers*. Publication CIE 53-1982.
- 11 Commission Internationale de l'Eclairage, *Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters: Performance, characteristics and specifications*. Publication CIE Publication CIE 69-1987.
- 12 Dartnall, H.J.A., Bowmaker, J.K., & Mollon, J.D. (1983). Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons. *Proceedings of the Royal Society of London*, B 220, 115-130.
- 13 Roorda, A., Metha, A.B., Lennie, P., Williams, D. R., Packing arrangement of the three cone classes in primate retina, *Vision Research*, Volume 41, Issues 10–11, May 2001, Pages 1291–1306
- 14 Wandell, B.A., *Foundations of Vision*, Sinauer Associates, Inc., 1995 ISBN13: 9780878938537, <https://foundationsofvision.stanford.edu/>
- 15 MacAdam, D.L., Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight, *J. Opt. Soc. Am.* 32, 247-274 (1942)

- 
- 16 Commission Internationale de l'Eclairage, *Colorimetry*, Publication CIE 15:2004, ISBN 978-3901906336
- 17 Commission Internationale de l'Eclairage, *Proc. of the 8th Session of CIE*, Cambridge, 19-29, (1931)
- 18 Wright, W.D., A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours, *Trans. Opt. Soc. London* 30, 141-164 (1928-29)
- 19 Wright, W.D., A re-determination of the mixture curves of the spectrum, *Trans. Opt. Soc. London* 31, 201-211 (1929-30)
- 20 Guild, J., The colorimetric properties of the spectrum. *Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A* 230, 149-187 (1931)
- 21 Wright, W.D., The historical and experimental background to the 1931 CIE system of colorimetry, in Golden Jubilee of Colour in the CIE, *Proceedings of a symposium held at Imperial College*, London, Society of Dyers and Colourists, 1981
- 22 Judd, D.B., Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight. In *Proceedings of the Twelfth Session of the CIE*, Stockholm (vol. 1, pp. 11). Paris: Bureau Central de la CIE. (1951)
- 23 Smith, V.C., Pokorny, J. (1975) Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 nm and 500 nm, *Vision Research*, 15, pp. 161-171
- 24 Vos, J.J., (1978) 'Colorimetric and Photometric Properties of a 2° Fundamental Observer', *Col. Res. and Appl.*, 3, No. 3, pp. 125-128
- 25 Stiles, W.S., Burch, J.M. (1955), Interim report to the Commission Internationale de l'Éclairage Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory's investigation of colour-matching (1955) with an appendix by W.S. Stiles & J.M. Burch. *Optica Acta*, 2, 168-181.
- 26 Stiles, W.S., Burch, J.M. (1959), NPL colour-matching investigation: Final report. *Optica Acta*, 6, 1-26.
- 27 Commission Internationale de l'Eclairage *Proceedings (1964) Vienna Session*, 1963, Vol. B, pp. 209-220 (Committee Report E-1.4.1), Bureau Central de la CIE, Paris
- 28 Viénot, F., Commission Internationale de l'Eclairage 170-1 (2006) *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1*, ISBN 978 3 901906 46 6
- 29 Stockman, A., Sharpe, L.T., Fach, C.C. (1999), The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones. *Vision Research*, 39, 2901-2927.
- 30 Stockman, A., Sharpe, L.T. (2000), Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, 40, 1711-1737.



- 
- 31 Sarkar, A., Blondé, L. (2013), Colorimetric Observer Categories and Their Applications in Color and Vision Sciences, *Proceedings of the CIE Centenary Conference*, April 2013, Paris
- 32 Neitz, M., Neitz, J., Molecular genetics of color vision and color vision defects, *Arch. Ophthalmol.* 118, 691–700 (2000).
- 33 *Light Emitting Diodes* 2001, San Diego, California, <http://www.lumileds.com>
- 34 <http://1.bp.blogspot.com/-hf80GTUhdII/UNAmrFbMCFI/AAAAAAAAABMY/KTfBJZy7qzw/s1600/Luminous+Efficacy.jpg>
- 35 Round, H.J., A Note on Carborundum, *Electrical World* Vol. 49, p. 309, 1907
- 36 Loszev, O.V., *Telegrafia I Telefonía*, No. 18 pp. 61 1923.
- 37 Destriaux, G.J., *Chim. Phys.* 33 587 1936.
- 38 Holonyak, N., Bevacqua, S.F., *Appl. Photonics Letters*, Vol. 1, No. 4, pp. 82-83, 1962.
- 39 G. Craford, Philips Lumileds Lighting Company, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/nakamura-lectureslides.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/nakamura-lectureslides.pdf)
- 40 I. Akasaki, H. Amano, S. Sota, H. Sakai, T. Tanaka & M. Koike, *Jpn. J. Appl. Phys.* 34, L1517 (1995)
- 41 S. Nakamura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 35, L74 (1996).
- 42 C.J.M. Lasance, A. Poppe: *Thermal Management for LED Applications*, Volume 2 2014, ISBN: 978-1-4614-5090-0
- 43 Krames, M.R., *J. Display Technology*, 3 (2), (2007)
- 44 ANSI/IESNA LM-79-08 Standard, “*Approved method: electrical and photometric measurements of solid-state lighting products*”. ISBN: 978-0-87995-226-6
- 45 ANSI/IESNA IES-LM-80-08 Standard (2009) “*Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources*”. ISBN 978-0-87995-227-3
- 46 Suzuki, K., Kohmoto, K., Nakagawa, Y., Kondoh, H., Bandou, K., Oba, H., Yagi, T., Okazaki, J., Yamada, K.: Round robin LED photometry test in Japan. *CIE Symp.* 2001 “LED Measurement” CIE x022-2001 pp. 11-
- 47 Young, R., Muray, K., Jones, C.F., Quantifying Photometric Spectral Mismatch Uncertainties in LED Measurements, *Proc 2<sup>nd</sup> CIE Expert Symp. on LED Measurement*, Standard methods for specifying and measuring LED and LED cluster characteristics, Gaithersburg, USA, May 2001. pp. 39 – 44. CIE x022-2001.
- 48 Csuti, P., Kránicz, B., Schanda, J., Comparison of the goodness of fit of photometers to the  $v(\lambda)$  function using real LED spectra. *CIE Expert Symp. on LED Light Sources: Physical measurement and visual and photobiological assessment*, Tokyo, Japan, June 2004.

- 
- 49 Sándor, N., Csuti, P., Bodrogi, P., Schanda, J.: Visual observation of colour rendering. CIE Proceedings of LED Conference, Tokyo (2004)
- 50 Commission Internationale de l'Eclairage *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiologically Significant Axes*, TC 1-36, Report (2006)
- 51 Crawford, B.H. (1965), Color matching and adaptation. *Vision Research*, 5, 71-78.
- 52 Foley et al: *Computer Graphics - Principles and Practice*, 1996, p. 593., ISBN 0-201-84840-6
- 54 Thornton WA (1992) Towards a more accurate and extensible colorimetry. Part 1. *Color Res. & Appl.* 17 79-122; Part 2. *Color Res. & Appl.* 17 162-186; Part 3. *Color Res. & Appl.* 17 240-262.
- 55 Borbély Ákos, *A CIE 1931 színingermérő észlelő vizsgálata*, PhD értekezés, Veszprémi Egyetem, Informatikai Tudományok Doktori Iskola, 2003.
- 56 Stockman, A., & Sharpe, L. T: Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, 40, 1711-1737. (2000)