

VESZPRÉMI EGYETEM, MŰSZAKI INFORMATIKAI ÉS VILLAMOSMÉRNÖKI ÖNÁLLÓ INTÉZET

Borbély Ákos

A CIE 1931 SZÍNINGERMÉRŐ ÉSZLELŐ VIZSGÁLATA

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető: Dr. Schanda János



Veszprémi Egyetem

Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Veszprém

2003

A CIE 1931 SZÍNINGERMÉRŐ ÉSZLELŐ VIZSGÁLATA

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:

Borbély Ákos

Készült a Veszprémi Egyetem Informatikai Tudományok Doktori Iskolája keretében

Témavezető: **Dr. Schanda János**

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)

Bíráló neve: (igen / nem)

.....

(aláírás)

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

Veszprém,

.....

a Bíráló Bizottság elnöke

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

.....

az EDT elnöke

Tartalomjegyzék

Tartalmi kivonat.....	6
Summary of contents.....	7
Zusammenfassung.....	8
1 CÉLKITŰZÉSEK	10
2 A KORRELÁLT SZÍNHŐMÉRSÉKLET FOGALMÁNAK VIZSGÁLATA.....	12
2.1 BEVEZETÉS	12
2.2 A KORRELÁLT SZÍNHŐMÉRSÉKLET FOGALMA	12
2.3 A KORRELÁLT SZÍNHŐMÉRSÉKLET MEGHATÁROZÁSÁNAK MÓDSZERE.....	14
2.4 A KORRELÁLT SZÍNHŐMÉRSÉKLET VIZUÁLIS MEGHATÁROZÁSA	15
2.5 KÍSÉRLETI ELRENDEZÉS ÉS MÓDSZER	15
2.6 EREDMÉNYEK	18
2.7 ÖSSZEFOGLALÁS	18
3 A CIE SZÍNINGERMÉRŐ ÉSZLELŐKKEL KAPCSOLATBAN FELMERÜLT PROBLÉMÁK ÁTTEKINTÉSE	21
3.1 ELŐZMÉNYEK	21
3.2 THORNTON VIZSGÁLATAI	22
3.2.1 Színínger-megfeleltetési kísérletek különböző alapszínínger-kombinációkkal	22
3.2.2 Az észlelő használhatósága függ az alap-színíngerektől – spektrális régiók.....	23
4 A CIE 1931 SZÍNINGERMÉRŐ ÉSZLELŐ HASZNÁLHATÓSÁGA KATÓDSUGÁR-CSÖVES MONITOROK ESETÉN	27
4.1 BEVEZETÉS	27
4.2 KÍSÉRLETI MÓDSZER	27
4.3 A KÍSÉRLETI ELRENDEZÉS.....	28
4.4 A KÉPMEGJELENÍTŐ VIZSGÁLATA.....	29
4.5 MÉRÉSI MÓDSZER.....	31
4.6 MÉRŐSZEMÉLYEK	31
4.7 EREDMÉNYEK	33
4.8 DISZKUSSZIÓ.....	34
4.8.1 Az eredmények elemzése.....	34
4.8.2 Következtetések.....	37
5 SZÍNINGER - MEGFELELTETÉS KESKENYSÁVÚ ALAP-SZÍNINGEREKKEL	38

5.1	KESKENYSÁVÚ FÉNYFORRÁSOK: VILÁGÍTÓ DIÓDÁK (LED-EK)	38
5.2	THORNTON KÍSÉRLETÉNEK REPRODUKÁLÁSA VILÁGÍTÓ DIÓDÁK FELHASZNÁLÁSÁVAL.....	39
5.3	KÍSÉRLETI ÖSSZEÁLLÍTÁS	40
5.3.1	<i>Előkísérlet</i>	40
5.3.2	<i>Vizuális színingermérő készülék: átalakított Lummer – Brodhun féle fotométer</i>	41
5.4	MÉRŐSZEMÉLYEK	46
5.5	EREDMÉNYEK	48
5.6	ÖSSZEFOGLALÁS	53
6	DISZKUSSZIÓ.....	54
6.1	EREDMÉNYEINK AZ IRODALOM TÜKRÉBEN.....	54
6.2	A SZÍNINGERMÉRŐ ÉSZLELŐK MEGÚJÍTÁSÁNAK LEHETSÉGES SZEMPONTJAI.....	58
7	ÖSSZEFOGLALÁS.....	60
8	TÉZISEK.....	61
9	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	62
I. MELLÉKLET	63	
	<i>Additív színingerkeverés</i>	63
	<i>Színingeregyenlet</i>	63
	<i>Színinger – megfeleltetés</i>	64
	<i>Maxwell módszere</i>	65
	<i>A "maximum telítettség" módszere</i>	65
	<i>A CIE 1931 színingermérő észlelő</i>	66
	<i>Wright és Guild kísérletei</i>	66
	<i>A CIE XYZ színingermérő rendszer megalkotása</i>	67
	<i>Az X, Y, Z színinger-összetevők</i>	68
	<i>A színinger-koordináták és a színességi diagram - az x,y,Y színingermérő rendszer</i>	69
	<i>Judd és Vos módosítása</i>	70
	<i>Stiles és Burch színingermérő függvényei</i>	71
	<i>A CIE 1964 10°-os kiegészítő színingermérő rendszer</i>	71
	<i>A csap receptorok spektrális érzékenységi függvényei</i>	73
	<i>Planck sugárzók</i>	74
II. MELLÉKLET	74	
III. MELLÉKLET	76	
IV. MELLÉKLET	77	
IRODALOMJEGYZÉK	80	

Tartalmi kivonat

A Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) 1931-ben hozta létre az első szabványos trikromatikus színingermérő rendszert, a CIE 1931 színingermérő észlelőt, mely az emberi színlátásnak megfelelően három spektrális érzékenységi függvényen alapul. E pszichofizikai módszerekkel meghatározott súlyfüggvények 17 ép színlátó mérőszemély átlagos színképi érzékenységét modellezzik. Megalkotása óta jelentkeztek problémák a szabványos észlelővel kapcsolatban, ezekre az irodalomban számos elfogadható magyarázatot adtak.

A közelmúltban W.A. Thornton és munkatársai által felvetett problémák meghaladják a korábban tapasztaltakat, közel monokromatikus alap-színingerekkel végzett metamer színinger-megfeleltetési kísérleteikben a szabványos és valódi észlelők ítélete között akár $70 \Delta E^*_{ab}$ számított színingerkülönbség is adódott. Megállapították, hogy a különbség mértéke attól függ, hogy a vizsgált színinger spektrális teljesítménye a színkép mely tartományaiban összpontosul.

Dolgozatom célkitűzése, hogy megvizsgáljam, miként befolyásolják az említett problémák a színingermérést informatikai alkalmazásokban. Két additív színinger-megfeleltetési kísérletsorozatot végeztem mérőszemélyekkel, erősen metamer (eltérő színképű) színinger-párok felhasználásával.

Fentiekhez először tisztáznom kellett a képmegjelenítők és fényforrások „fehér pontjának” meghatározására vonatkozó feltételezések helyességét: a korrelált színhőmérséklet meghatározási módszerének helyességét. Korábban ugyanis a korrelált színhőmérsékletet színészlelet-hasonlóság alapján definiálták, s közelítő számítási módszerként a CIE 1960 u,v diagramot javasolták. Kísérleteimmel kimutattam, hogy a vizuális meghatározás bizonytalan, javaslatunk alapján a CIE az objektív meghatározási módszert elfogadta.

Az első színinger-megfeleltetési kísérlet sorozatban katódsugárcsőves monitor fényporai voltak az alap-színingerek, a Munsell színatlászból választott mintákkal vizuálisan egyező színingert kellett mérőszemélyeinknek beállítani. A metamer színinger-megfeleltetés során nagy eltéréseket találtunk vizuálisan egyező színinger-párok számított színinger-jellemzőiben, ez azonban nem volt szisztematikus. Az eredmények nagy megfigyelők közötti szórása arra figyelmeztet, hogy az eltéréseket színmegjelenési modellek összehasonlításánál, értékelésénél figyelembe kell venni, nem célszerű kisebb színinger-különbségekkel foglalkozni.

Második kísérlet-sorozatban világító diódákat használtam fel, vörös, kék és zöld LED-ekből két csoportot állítottam össze; ezek spektrális teljesítménye két különböző hullámhossz-tartományban koncentráldott. Egy – egy csoport additív keverékének fényét egyeztették a mérőszemélyek egy optikai szűrővel felszerelt izzólámpa fényével Brodhun-féle vizuális fotométerben. Megállapítottam, hogy keskenysávú fényforrások esetén a színingermérő észlelő Judd-Vos által módosított változatának használata pontosabban írja le a színinger-megfeleltetést. A kísérletben tapasztalt eltérések nem felelnek meg a Thornton által definiált spektrális régióknak. Megmutattam, hogy a spektrális régiók definíciója matematikai értelemben is ellentmond a CIE 1931 színingermérő észlelő Judd-Vos-féle korrekciójának.

Summary of contents

The International Commission on Illumination (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) created the first standard trichromatic colorimetric system in 1931: the CIE 1931 standard colorimetric observer, based on three spectral sensitivity curves of human colour vision. These weighting functions were determined in psychophysical experiments, they represent the average of the spectral sensitivity of 17 normal observers.

Since their creation problems were reported on the usability of the standard observer, satisfactory explanations of these errors can be found in the literature.

In the past decade Thornton and co-workers found very large errors that question the usability of the standard observer, they detected a computed colour difference of up to $70 \Delta E^*_{ab}$ between visually matching metameric sample pairs using nearly monochromatic primaries. They concluded that the magnitude of errors depends on the wavelength range where the spectral power of the stimulus is concentrated.

In my thesis the standard observer is tested in visual experiments modelling applications in information technology. Two additive colour-matching experiments were performed using highly metameric sample pairs.

To be able to define the chromaticity of the white point of display devices and light sources correctly, first I had to deal with the concept of correlated colour temperature (CCT). CCT has been defined based on the smallest colour appearance difference between two colour stimuli. I could show that this is an ambiguous definition, and according to our proposal, the CIE accepted an objective definition for the determination of CCT.

In the first colour matching experiment the primaries of a CRT monitor were used, observers had to match incandescent lamp illuminated Munsell samples with samples produced on the display. Considerable differences were found in computed chromaticities of the visually matching stimuli, but these differences were not systematic. Inter-observer variances of the colour matches are to be considered in testing colour appearance models. The accuracy of the matches predicted by the standard observer decreased as the metamerism of the samples increased. Based on this I could formulate a colour difference value below of which it is not meaningful anymore to search for colour equality.

Next light emitting diodes (LEDs) were used as primaries, the additive mixture of red, green, and blue LEDs were matched to a filtered incandescent source in a Brodhun-type visual photometer. Two LED clusters were constructed, their emission power concentrated at different spectral regions. I could show that the Judd-Vos modification of the standard observer models more accurately matches set by real observers with narrowband sources. Disagreement was found between the errors found in my experiments and predicted by Thornton. It is shown that the Judd-Vos modification of the standard observer contradicts Thornton's definition of spectral regions in a mathematical sense.

Zusammenfassung

Die Internationale Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) definierte das erste normgerechte trichromatische Farbvalenzsystem, den CIE 1931 farbmtrischen Normalbeobachter, in 1931. Dieser beruht auf drei, des menschlichen Farbsehens entsprechenden spektralen Empfindlichkeitsfunktionen. Diese mit psychophysikalischen Methoden bestimmten Gewichtsfunktionen modellieren die durchschnittliche spektrale Empfindlichkeit von 17 normalen Trichromaten. Seit der Begründung des Begriffs vom normgerechten farbmtrischen Normalbeobachter wurden einige Probleme gemeldet, die in sämtliche Literatur erklärt sind.

Die Probleme, die durch W. A. Thornton und seine Mitarbeiter jüngstens gemeldet wurden, übersteigen die früher entdeckten Fehler. Bei den mit quasimonochromatischen Farbzeiten durchgeführten metameren Farbarmusterungen wurden sogar $70 \Delta E^*_{ab}$ Farbdifferenzen berechnet. Es wurde behauptet, daß der Grad der Differenz davon abhängt, in welchem Spektralbereich sich die spektrale Verteilung des untersuchten Farbzeizes konzentriert.

Die Zielsetzung der Dissertation ist zu untersuchen, wie die erwähnten Probleme die Farbmessungen bei informationstechnischen Anwendungen beeinflussen. Es wurden zwei Experimentreihen von additiver Farbarmusterung durchgeführt, wobei stark metamere Farbzeizpaare (von unterschiedlichen Spektren) angewandt wurden.

Zuerst mußte ich jedoch das Konzept der ähnlichsten Farbtemperatur (TCC) überprüfen. Laut der offiziellen Festlegung mußte TCC auf Grund der ähnlichsten Farbempfindung zweier Farbzeize bestimmt werden. Meine Untersuchungen zweigten, daß dies eine recht unsichere Methode ist, und daß eine auf der 1960 u,v Farbtabel beruhende objektive Methode (die bisher nur als eine praktische Hilfsmethode vorgeschlagen wurde) gerechtfertigt ist.

Bei der ersten Experimentreihe gaben Leuchtstoffe von einem Kathodenstrahlröhren-bildschirm die Primärvalenzen. Die Beobachter sollten dann solche Farbvalenzen einstellen, die mit den aus dem Munsell-Farbsystem gewählten Mustern visuell übereinstimmten. Im Laufe der meta-meren Farbarmusterung wurden große aber nicht systematische Differenzen zwischen berechneten Farbzeiten und visuell übereinstimmenden Farbvalenzpaaren gefunden. Die große Streuung der Ergebnisse warnt einen, daß diese Abweichungen bei Vergleich oder Wertung von Farberscheinungsmodellen berücksichtigt werden sollten, und kleinere Farbdifferenzen ohne Bedeutung sind.

Bei der zweiten Experimentreihe wurden lichtemittierende Dioden verwendet. Zwei Gruppen wurden von roten, grünen und blauen LEDs zusammengestellt. Die spektrale Verteilung der zwei Gruppen konzentrierte sich in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen. Die Beobachter verglichen dann die Farbvalenz der additiven Mischung von beiden Gruppen mit der Farbvalenz einer mit einem optischen Filter ausgerüsteten Glühlampe durch einen Brodhun-Photometer. Ich konnte feststellen, daß die von Judd und Vos modifizierte Version des Normalbeobachters die Farbarmusterung im Fall von schmalbandigen Lichtquellen besser beschreibt. Die experimentell bestimmten Abweichungen entsprechen den von Thornton definierten spektralen Regionen nicht. Es wurde bewiesen, daß die Definition der von Thornton postulierten spektralen Regionen auch in mathematischer Bedeutung der Judd-Vos Korrektur des CIE 1931 Normalbeobachters widerspricht.

1 Célkitűzések

A színes digitális képrögzítő és képmegjelenítő eszközök az informatika kiemelten fontos bemeneti és kimeneti egységei. Lehetőségünk van a saját digitális kameránk által készített felvételek otthoni szerkesztésére, nyomtatására, vetítésére. Azok a színes képfeldolgozó eljárások, melyekkel egy évtizede még többnyire csak a nyomdaiparban dolgozó szakemberek találkoztak, mára eljutottak a háztartásokba. Személyi számítógépek operációs rendszerei, felhasználói szoftverei tartalmazzák a bemeneti és megjelenítő egységek összehangolására készített összetett színinger-transzformációs eljárásokat [1].

A fény- és színingermérés az iparban is egyre fontosabb szerepet tölt be, e területen a mérési módszerek szabványosítását, a kutatói munka koordinálását a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (Commission Internationale de l'Éclairage: CIE) végzi. A színingermérés első egységes rendszerét 1931-ben fogadták el, mely azóta is érvényben van [2]. A CIE színinger-megfeleltető függvények [3] segítségével színingereket jellemző mérőszámokat; színinger-összetevőket határozhatunk meg. E függvényekkel súlyozzuk a spektrális mérésekkel nyert színeképet, ezeket valószínűsítjük meg tristimulusos színmérő készülékekben szűrők transzmissziós görbéivel torzított detektor érzékenységi görbék.

A CIE színingermetrika a színinger-összetevőkön túl további mennyiségeket tartalmaz, definiáltak színinger-különbséget, színmegjelenési modellel meghatározhatók a színészlelet különböző tulajdonságai [4]. Speciális összefüggéseket határoznak meg kutatólaboratóriumok a CIE közreműködésével a színmérést a gyakorlatban is felhasználó ipar számára, de a teljes rendszer alappillérei a színinger-megfeleltető függvények, melyek a sugárzáseloszlásból származtatják a három színinger-összetevőt; ezek a további számítások kiindulási értékei.

A CIE színinger-megfeleltető függvények használatával kapcsolatban már azok megalkotása óta jelentkeztek kisebb ellentmondások, melyek az ipari alkalmazásokban eddig nem okoztak számottevő problémát. A közelmúltban több közlemény is megjelent, amely a CIE színingermérő észlelők használhatóságát kérdőjelezte meg az erősen metamer minták színinger összehasonlítása esetén. Metamer színingerek színinger-összetevői megegyeznek (a szabványos észlelő azonosnak ítéli őket), spektrális teljesítmény-eloszlásuk azonban különböző. A CIE technikai bizottságot hozott létre a szabványos észlelők felülvizsgálatára (TC 1-56: Improved Color Matching Functions [5]), ha a színingermérő rendszer nem alkalmas a színingerek vizuális egyezésének meghatározására, ez a színingermetrika további számított mennyiségeiben is ellenmondásokat okoz, a rendszeres hiba továbbterjed az alkalmazásokban.

Dolgozatomban a színinger-megfeleltető függvények használhatóságát gyakorlati alkalmazásokat modellező vizuális kísérletekben vizsgálom meg. Két sorozatban végeztem metamer

színinger-megfeleltető vizuális kísérleteket ép színlátó mérőszemélyekkel. A trikromatikus additív színingerkeverés módszerét alkalmaztam, az első sorozatban az alapszíningerek katódsugárcsőves számítógép monitor fényporai (4. fejezet), a másodikban nagy fénysűrűségű világító diódák (LED-ek) voltak (5. fejezet).

Informatikus mérnöki diplomamunkámban azt vizsgáltam, hogyan befolyásolja az adaptációs mező színezete és képi kulcs jelenléte számítógép képernyőjén az észlelt fehérpontot [6, 7, 8]. E kísérletek értékelésében az adaptációs mezőt és a teszt-színingert korrelált színhőmérsékletükkel jellemeztem. A korrelált színhőmérséklet fogalma kapcsolatot teremt a pszihofizikai mennyiségek és a színészlelet között, definíciója matematikai és vizuális egyben. Kísérletben vizsgáltam a vizuális jelentés érvényességét, valamint azt, hogy a számításokat az előírt CIE 1960 u, v vagy az újabb CIE 1976 u', v' egyenletes színinger-diagramban kell elvégezni. Mivel a korrelált színhőmérséklet fogalmát dolgozatomban fent említett két fejezetében több helyen is használom fényforrások, képmegjelenítők fehérpontjának jellemzésére, dolgozatomban az e témában folytatott kutatásom és eredményeim bemutatásával kezdem (3. fejezet).

A kísérletek értékeléséhez a CIE színingermérő rendszert a legtöbb tankönyvben közölt bevezetésnél részletesebben kell ismerni. Ezért az I. mellékletben a CIE színingermérő rendszer munkám szempontjából alapvető kérdéseire térek ki.

2 A korrelált színhőmérséklet fogalmának vizsgálata

2.1 Bevezetés

A korrelált színhőmérséklet a mérnöki gyakorlatban jól alkalmazható egy-dimenziós színingermetrikai mennyiség, közelítőleg fehér színezetű sugárforrások – fényforrások, monitorok, televíziók fehérpontjának jellemzésére használjuk. Meghatározása vizuális megfigyelésen, két észlelt szín hasonlóságán alapul. Ahhoz, hogy objektív formában is meg lehessen határozni a korrelált színhőmérséklet mérőszámát, korábban megegyeztek abban, hogy azt a CIE 1960 u,v diagramon a sugárforrás színességi pontjához legközelebb fekvő, a Planck sugárzók színpontjait magában foglaló görbe távolságának minimális értékéhez tartozó Planck sugárzó hőmérsékletével jellemzik.

Az 1976 CIELUV és CIELAB szabványos színingerterek [9] bevezetése óta megkérdőjeleződik, hogy továbbra is a CIE 1960 u,v [10] diagramban, vagy új, észleletileg egyenletesebb színinger-diagramban célszerű a korrelált színhőmérséklet kiszámítását elvégezni (MacAdam megmutatta, hogy a CIELAB színingertérben számított állandó hőmérsékleti vonalak nem esnek egybe a CIELUV színingertérben számítottakkal [11]).

Kísérletünkben azt vizsgáltuk, hogy az CIE 1960 u,v és CIE 1976 u',v' egyenlőközű színingerdiagramok közül melyik közelíti nagyobb pontossággal valódi megfigyelők vizuális ítéletét.

2.2 A korrelált színhőmérséklet fogalma

A színhőmérséklet definíció szerint a Planck sugárzó hőmérséklet értékével adja meg a sugárzáseloszlás színinger koordinátáit. A korrelált színhőmérséklet definíciója ennél összetettebb: pszichofizikai és a színészleletet jellemző mennyiségek együtt alkotják.

Színhőmérséklet (Colour Temperature, T_c) [12]:

Egy olyan Planck-sugárzónak a hőmérséklete, amely sugárzásának ugyanaz a színessége, mint a kiválasztott színingeré. Egysége: K.

A korrelált színhőmérséklet fogalma kapcsolatot teremt a színészlelet és a színingermetrika között, Magyar Szabvány szerinti definíciója a következő:

Korrelált színhőmérséklet (Correlated Colour Temperature, T_{cp}) [13]:

Annak a Planck-sugárzónak a hőmérséklete, amelynek színészlete a legjobban hasonlít a kiválasztott ugyanolyan világosságú színinger észleletéhez, meghatározott körülmények között. Egysége: K.

A Nemzetközi Világítástechnikai (Szak) Szótár két megjegyzést fűz a fenti definícióhoz:

1. Egy színinger korrelált színhőmérsékletének kiszámításának ajánlott módszere:

Adott színinger-diagramban határozzuk meg a Planck sugárzók görbén az ahhoz a ponthoz tartozó hőmérséklet értéket, mely a görbe és a színingerre jellemző megegyezés szerinti állandó korrelált hőmérsékleti vonal (isotherm line) metszéspontja.

2. Korrelált színhőmérséklet helyett inkább annak reciprokát használjuk.

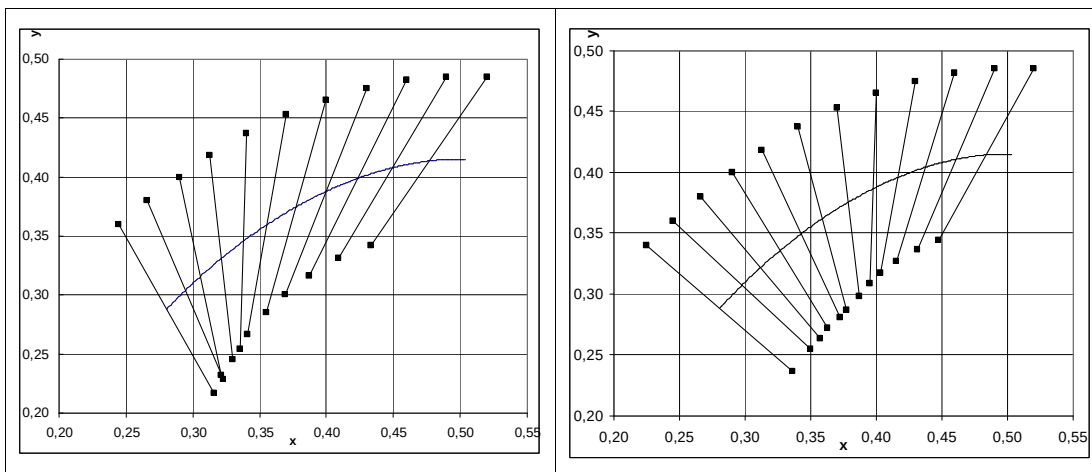
A reciprok színhőmérséklet a színhőmérséklet reciprok értéke, jele T_c^{-1} , reciprok megakelvinben más néven miredben (betűszó, a *micro reciprocal degree* kifejezésből ered) szokták kifejezni $1 \text{ MK}^{-1} = 10^{-6} \text{ K}^{-1} (10^6/T_c)$.

A reciprok színhőmérsékleti skála egyenletesebb mint a hőmérsékleti skála.

Az u,v színingerdiagram a CIE 1931 x,y diagram transzformáltja, ezt MacAdam dolgozta ki [14], az éppen észlelhető színinger-különbségek kutatása során kapott eredményei alapján jutott egyenlőközü diagramot eredményező transzformációhoz. A gyakorlatban azonban az u',v' színdiagramot, mint az u,v színingerdiagram egy módosított változatát a CIE 1976-ban fogadta el.

A két színingerdiagram második koordinátájában eltér egymástól ($v' = 3/2 v$) ugyanazon színponthoz a két színinger-diagramban a Planck görbének más pontja esik a legközelebb, így eltérő a számított korrelált színhőmérséklet.

Egyenlőközü színingerterekben azon pontok, melyeknek korrelált színhőmérséklete megegyezik, egy egyenesen helyezkednek el, ezért ezeket az egyeneseket állandó korrelált hőmérsékleti vonalaknak nevezik. A vonalak merőlegesek a Planck görbe azon pontjának irántangensére, amely ponthoz tartozó hőmérséklet érték az egyenes pontjainak korrelált színhőmérséklete.



1. ábra. Az u, v (bal oldalon) és u', v' (jobb oldalon) színinger-diagramban kiszámított, majd az x, y diagramba transzformált állandó korrelált hőmérsékleti vonalak

2.3 A korrelált színhőmérséklet meghatározásának módszere

Egy színinger korrelált színhőmérsékletét adott hőmérsékletű Planck sugárzó sugárzáseloszlásának (emissziós színeképének) színingerkoordinátáinak felhasználásával számíthatjuk ki.

A Planck sugárzó sugárzáseloszlását a Planck féle sugárzási törvény (megtalálható az I. mellékletben) alapján számítjuk ki. A képletben szereplő c_2 konstans értékét 1968-ban 1.4380 m·K-ről 1.4388 m·K-re korrigálták a nemzetközi hőmérsékleti skála módosításakor, emiatt pl. a szabványos D65 fényforrás korrelált színhőmérséklete 6500 K-ről 6504 K-re változott [15]. Bár a fenti módosításból eredő különbség nem jelentős, régebbi közleményekben szereplő adatok esetén erre ügyelni kell.

Az évek során több módszer született a korrelált színhőmérséklet kiszámítására, személyi számítógéppel egyszerű, közvetlen módon határozhatjuk meg a teszt-színingerhez a Planck sugárzó görbéjének legközelebb eső pontját egyenletes színinger-diagramban. Először a teszt-színinger színinger-koordinátáit határozzuk meg, majd a Planck sugárzó sugárzáseloszlását állapítjuk meg a T hőmérséklet érték (mint szabad paraméter) függvényében és számoljuk ebből a színességi koordinátákat. Mindkét sugárzó (teszt-fényforrás és Planck sugárzó) Y színinger összetevőjét egységnek választhatjuk. A számítógépprogram szélsőérték-kereső algoritmusá ezután úgy változtatja a T paraméter értékét, hogy az adott színinger-diagramban a vizsgált színinger színességi koordinátái és a Planck sugárzó színességi koordinátái közti távolság a minimális legyen. A minimum kereső program egy iterációs program, melynél az iterációs lépések számát, vagy az iteráció során a változás sebességének adott érték alá csökkenését előre megadhatjuk, s az így kapott értéket fogadjuk el mint korrelált színhőmérsékletet. Kísérleteink során ezt az eljárást alkalmaztuk.

2.4 A korrelált színhőmérséklet vizuális meghatározása

A korrelált színhőmérséklet vizuális meghatározásának több kísérlete is fellelhető az irodalomban.

Judd és munkatársai [16] két izzólámpa fényét hasonlították össze mérőszemélyekkel. Az egyik izzó elé zöld áteresztő optikai szűrőt szereltek, így változtatták meg a fényforrás színességét. Harding [17] szintén két izzólámpát alkalmazott, különböző optikai szűrőkkel vizsgálta a Planck görbe környezetét alacsonyabb színhőmérsékleten. Ebben a tartományban a görbe szinte vízszintes, így a kísérlet értékelésénél nem számottevő hogy a számításoknál az u, v vagy u', v' színinger-diagramot használjuk mivel $u' = u$.

Grum és munkatársai [18] szintén izzólámpával és színhőmérséklet-módosító optikai szűrőkkel 6500 K-ig tudták kiterjeszteni a vizsgált színhőmérséklet-tartományt, de csak a Planck sugárzó vonalának bíbor oldalán, kilenc mérőszeméllyel dolgoztak. E kísérletek eredményei alapján nem mondható ki egyértelműen, mely színinger-diagramban célszerű a számításokat elvégezni, közös jellemzőjük a nagy megfigyelők közötti szórás, mely a vizuális jelentés bizonytalanságára utal.

2.5 Kísérleti elrendezés és módszer

A korrelált színhőmérséklet vizsgálatára kísérletet állítottunk össze, melyben a mérőszemélyek feladata a teszt-színingerekhez vizuálisan legjobban hasonló, a Planck sugárzók vonalán elhelyezkedő színingert kellett meghatározniuk.

Számítógép képernyőjén (katódsugárcsöves monitoron) jelenítettük meg a vizsgált színingereket. A Planck sugárzó vonala mentén változtatható (összehasonlító) és a teszt-színingert, két 21 mm x 21 mm nagyságú, egymással érintkező négyzet alakú felületet, ezek 60 cm távolságból nézve 2°-os látószög alatt látszottak.

Először szóban ismertettük mérőszemélyeinkkel a feladatot, majd öt perc adaptációs idő elteltével kezdték meg a kísérleteket. Minden egyes teszt-színingerhez beállították azt a színingert, mely vizuálisan a legkevésbé különbözik az adott teszt-színingertől; a két színminta fénysűrűségét állandó értéken (50 cd/m^2) tartottuk. A mérőszemély a rögzített fénysűrűségű összehasonlító színinger színességét tudta változtatni a Planck sugárzók vonala mentén, a növekvő vagy a csökkenő színhőmérséklet irányában, egy mired lépésközzel.

A vizsgált színingerekhez középészke háttérrel állítottunk be, melynek fénysűrűsége 18 cd/m^2 volt. EIZO FlexScan F784 típusú 21 inch képátmérőjű kalibrált [19] monitort használtunk. A monitort

1024x768 képfelbontással és 24 bites színfelbontással üzemeltettük. E beállítások mellett a monitor fehérpontja 6500 K, maximális fényűrűsége 64,4 cd/m² volt.

A monitor kalibrációs adatait – a fénypormátrix és a nemlinearitás kompenzálására használt függvény együtthatóit – a színingereket megjelenítő programban lehetett megadni (a módszer leírása és az adatok a IV. mellékletben megtalálhatók).

Igyekeztünk a gyakorlati alkalmazásokban (kompakt és hagyományos fénycsövek, képmegjelenítők) és szabványokban előforduló korrelált színhőmérsékletű teszt-színingereket kiválasztani, azonban a vizsgálható színingerek tartományát a kísérletekhez felhasznált monitor színingertere korlátozta (csak nagy fényűrűségű színingereket látunk fehérnek).

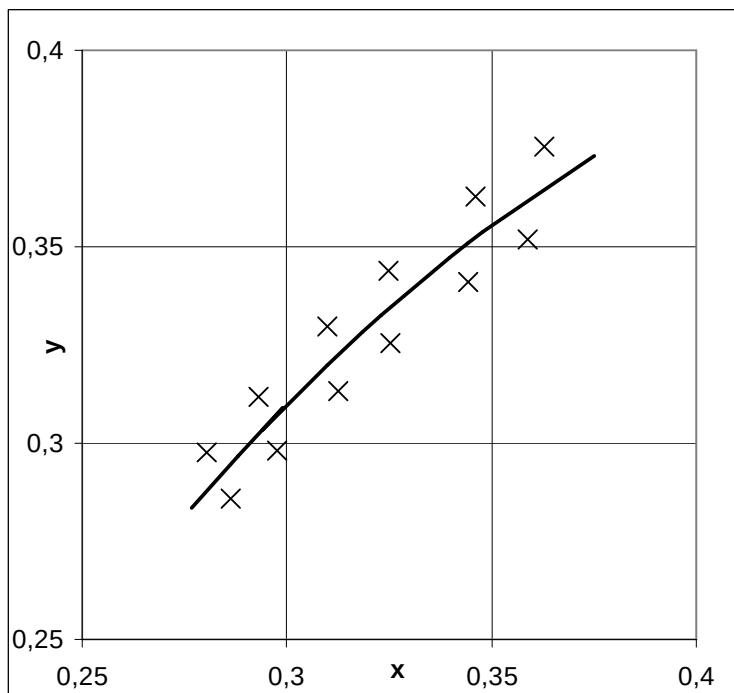
Első lépésben a Planck sugárzó vonalán jelöltünk ki hat színingert (I. táblázat) a 4505 K – 9524 K színhőmérséklet-tartományban (egy monitorok fehérpontja gyári alapértelmezésben 9500 K).

Tizenkét teszt-színingert választottunk ki, hatot a Planck sugárzó vonala felett (attól zöld irányban, $y_{teszt} > y_{Planck}$) hatot pedig alatta (bíbor irányban, $y_{teszt} < y_{Planck}$) az u,v diagramban felvett azonos hőmérsékleti vonalak mentén, a Planck görbétől azonos távolságban (2. ábra és II. táblázat).

I. táblázat. A CIE u,v diagramban kiválasztott hat színinger, melyekhez a Planck sugárzó vonala alatt és felett a teszt színingereket meghatároztuk.

Színhőmérséklet	Mired	u	v
4505 K	222	0,2172	0,3284
5000 K	200	0,2114	0,3231
5848 K	171	0,2043	0,3154
6667 K	150	0,1996	0,3092
8000 K	125	0,1946	0,3014
9524 K	105	0,1911	0,2949

A teszt-színingereket azért választottuk ki így, hogy a kísérlet során megfigyelhessük, vajon a vizuális megfigyelés igazolja-e, hogy az u,v színinger-diagramban felvett azonos állandó korrelált hőmérsékletű vonalon található színingerekhez ugyanaz a korrelált színhőmérséklet érték tartozik.



2. ábra. A tizenkét teszt színinger a Planck sugárzók vonala alatt és felett az x,y színinger-diagramban

II. táblázat. A tizenkét teszt színinger színességi koordinátái és korrelált színhőmérsékletei az u,v és u',v' színinger-diagramban számolva.

#	x	y	u	v	$T_{cp}(u,v)$	$T_{cp}(u',v')$
I.	0,3627	0,3754	0,2140	0,3322	4505	4397
II.	0,3586	0,352	0,2204	0,3246	4505	4629
III.	0,3461	0,3625	0,2079	0,3267	5000	4874
IV.	0,3442	0,3412	0,2149	0,3196	5000	5144
V.	0,3246	0,3439	0,2004	0,3185	5848	5693
VI.	0,3255	0,3254	0,2082	0,3122	5848	6023
VII.	0,3097	0,3295	0,1956	0,3121	6667	6485
VIII.	0,3123	0,3131	0,2037	0,3063	6667	6872
IX.	0,2929	0,3119	0,1903	0,3039	8000	7770
X.	0,2974	0,2979	0,1989	0,2989	8000	8257
XI.	0,2805	0,2978	0,1866	0,2972	9524	9232
XII.	0,2863	0,2856	0,1956	0,2927	9524	9851

Hét fiatal, naiv (mint vizuális kísérleti személy tapasztalatlan), normál trikromát mérőszeméllyel dolgoztunk, mindannyian egyetemi hallgatók (életkoruk 19 - 25 év), színlátásukat anormaloszkóppal ellenőriztük. Sötét szobában, összesen tíz alkalommal végezték el a kísérletet a tizenkét, véletlenszerű sorrendben megjelenített teszt-színingerrel.

2.6 Eredmények

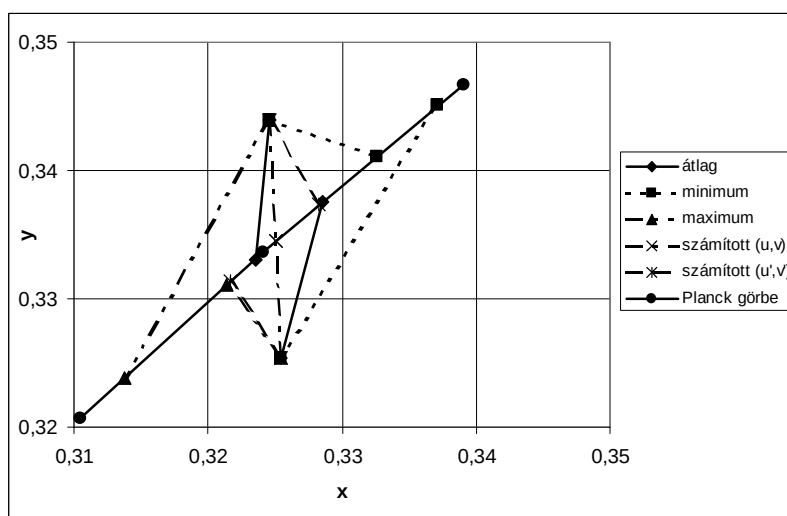
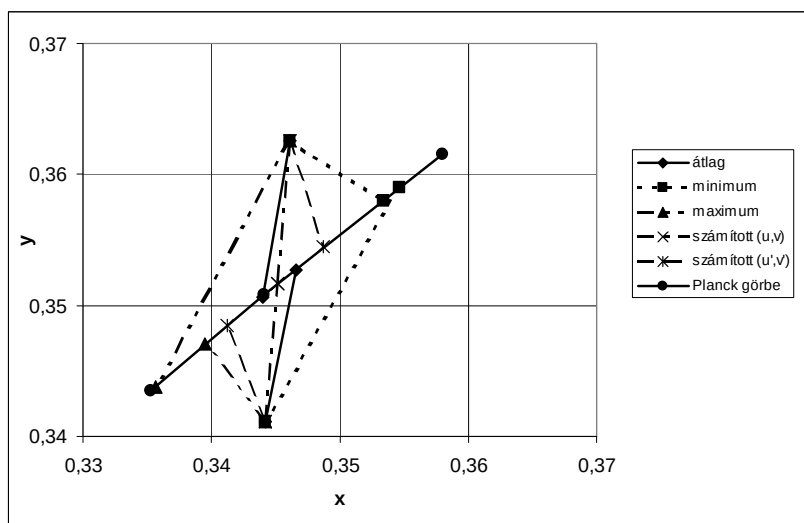
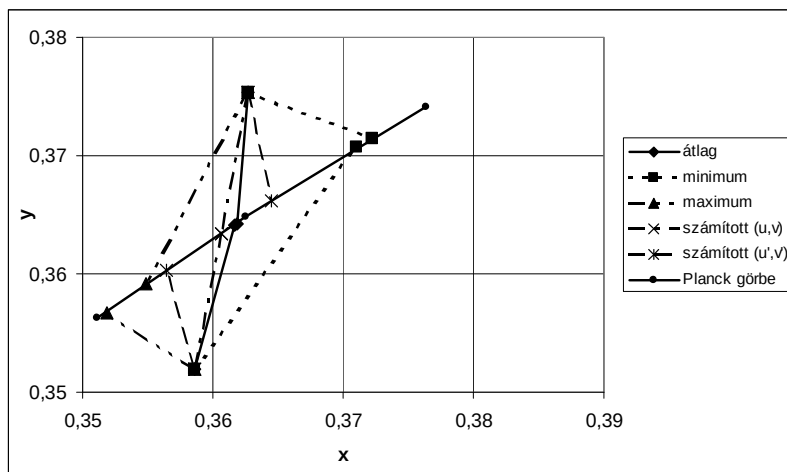
A vizuális kísérlet eredményei a 3. és 4. ábrán láthatók, a 12 teszt-színingert és a hozzájuk tartozó beállításokat páronként ábrázoltuk a CIE x,y diagram részletein. A telt körrel jelölt görbe a Planck sugárzók vonala. A görbe alatti és feletti teszt-színingerektől a diagramok melletti jelölésnek megfelelő vonalak mutatnak a görbén a mérőszemélyek által beállított korrelált színhőmérséklet átlagos, minimum, és maximum értékére, valamint a teszt-színinger u,v és u',v' színinger-diagramokban számított korrelált színhőmérséklet értékére.

A kísérlet eredményeit szemléltető ábrákon jól látszik, hogy a megfigyelők által beállított értékek minimuma és maximuma között nagy eltérések mutatkoznak. A mérőszemélyek átlagos beállításainak értéke közelebb esik az u,v diagramban számított értékekhez. Az alacsonyabb színhőmérsékletű tartományban a beállítások átlaga az u,v és u',v' színinger-diagramokban számított értékek közé esik. Magasabb színhőmérséklet esetén a diagramokban számított értékeknél magasabb az átlagos beállított korrelált színhőmérséklet.

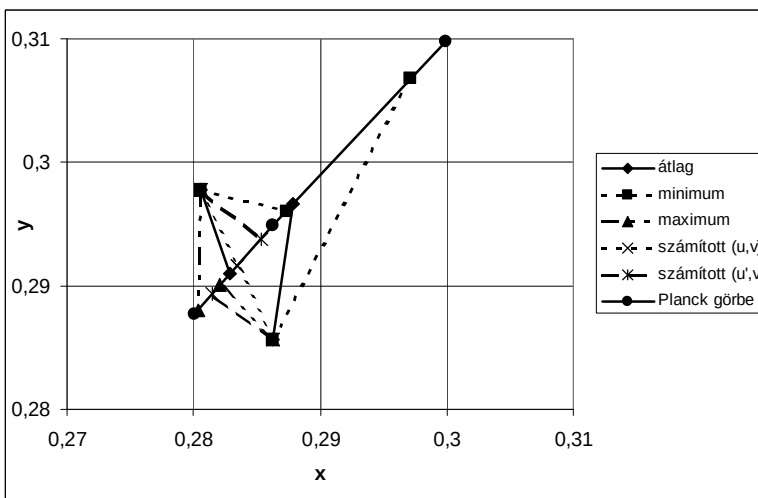
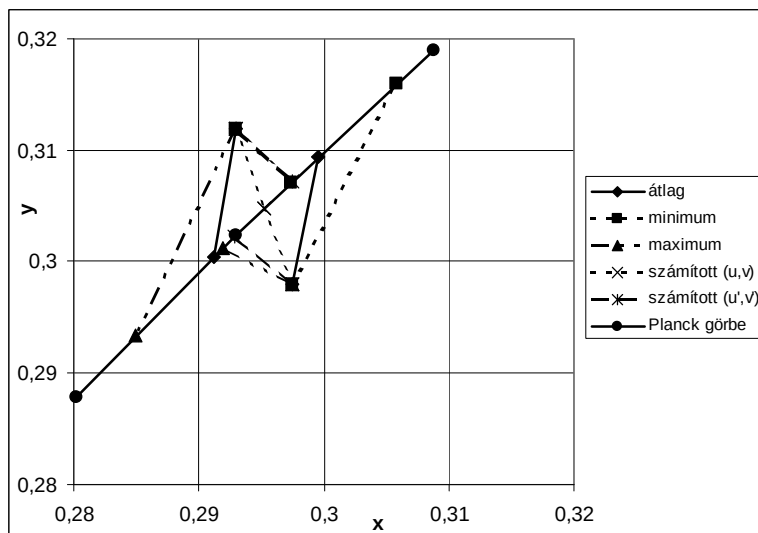
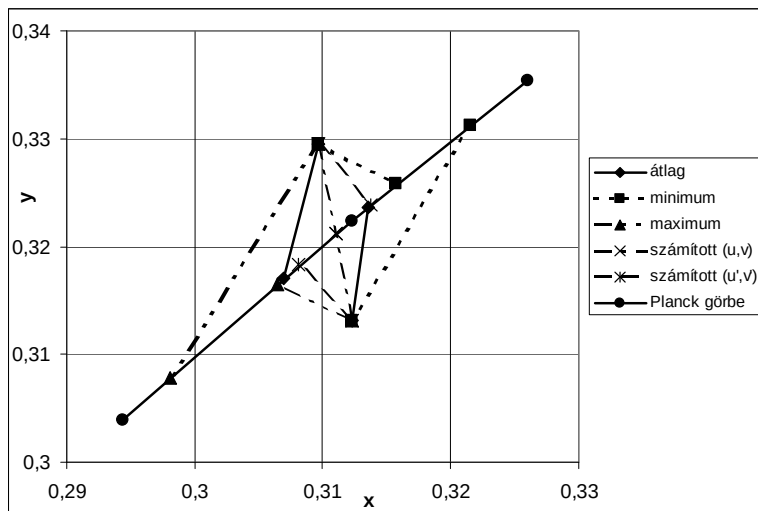
Az eredmények arra engednek következtetni, hogy a korrelált színhőmérséklet fogalmát nem lehet egyértelműen a vizuális definíció szerint értelmezni [20].

2.7 Összefoglalás

A korrelált színhőmérséklet közel fehér fényforrások színességének egydimenziós közelítő értéke. Vizuális kísérletünkben az egyes teszt-színingerek esetében a megfigyelők beállításainak nagy szórása megkérdőjelezi a vizuális definíció egyértelműségét. Mivel a vizuális jelentést nem támasztja alá a gyakorlat, ezért javasoljuk elhagyását a korrelált színhőmérséklet a bevezetésben leírt definíciójából, mivel e fogalomnak csak matematikai jelentése tartható meg. Eredményeink alapján közel fehér színingerek korrelált színhőmérsékletének kiszámítására továbbra is az CIE 1960 u,v színességi diagramot javasoljuk.



3. ábra. A vizuális kísérlet eredményei 3 teszt-színinger párra a CIE x,y színingerdiaqram részletein



4. ábra. A vizuális kísérlet eredményei 3 teszt-színinger párra a CIE x,y színinger diagram részletein

3 A CIE színingermérő észlelőkkel kapcsolatban felmerült problémák áttekintése

3.1 Előzmények

Az I. mellékletben leírtak a színingermérő észlelőnek, annak alkotóelemeinek, a színingermegfeleltető függvényeknek és a $V(\lambda)$ láthatósági függvénynek megalkotására és pontosítására vonatkoztak. Emellett az irodalomban fellelhetők olyan munkák, melyek a CIE színingermérő rendszer, mint modell helyességét, az előfeltételek, a Grassmann törvények érvényességét vizsgálják. E munkák kutatásaim közvetlen előzményeit képezik, ezért ezekkel ebben a fejezetben foglalkozom.

Az 1931 CIE színingermérő rendszer megformálását irányító vezérelvek időszerűségét gyakran megkérdőjelezik. E függvények megalkotásánál figyelembe vett szempontok mára szinte egytől egyig elavultak, napjainkban valószínűleg más követelmények szerint alakítanák ki őket [21].

Számos munka tanulmányozta az additivitás teljesülését a fény- és színingermérésben. A $V(\lambda)$ spektrális fényhatásfok függvény nem jellemzi megfelelően monokromatikus színingerek heterokromatikus világosság-egyeztését, melynél az additivitás nem mindig áll fenn. Az additivitástól való eltérés mértéke, és esetenként annak módja is függ az adott megfigyelőtől [22].

Trezona [23] és Stiles [24] vizuális kísérletekben vizsgálták Grassmann additivitás törvényének érvényességét fotopos fényűrségi szinteken. Eredményeik alapján arra a következtetnek, hogy 2°-os látómező esetén adódhatnak eltérések, de ezek nem haladják meg az éppen észlelhető színingerkülönbség küszöbértékét. Nagyobb látószög esetén [25] az additivitás már nem egyértelműen áll fenn, alacsonyabb fényűrségi szinteken a retina foveán kívül eső részén a csap receptorok működéséhez a pálcika mechanizmusok is hozzáadódnak [26], ez a 10°-os észlelő esetén egy tetrakromatikus rendszerre való áttérés szükségességét veti fel [27].

Nagy fényűrségű látómező esetén a csap elvakulás („photopigment bleaching”, csökken a fotopigmens koncentrációja a csap receptorokban) miatt megváltoznak az észlelő spektrális érzékenységi görbéi, így a színingermegfeleltetés inkonzisztens [28].

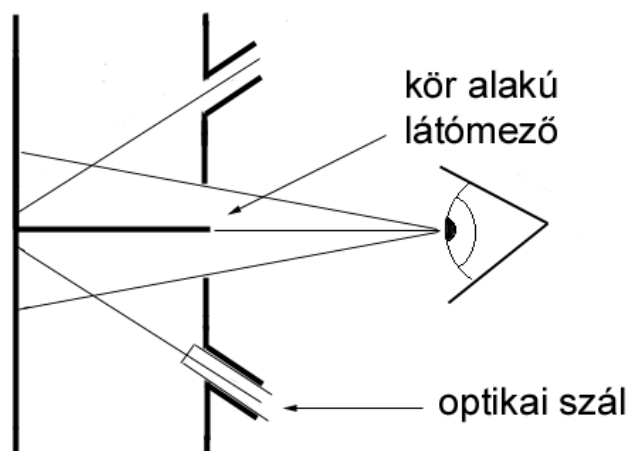
Estévez [29] szerint a $V(\lambda)$ spektrális fényhatásfok függvény nem lehet színingermegfeleltető függvények lineáris kombinációja, következésképpen a $V(\lambda)$ nem lehet a színingermegfeleltető függvények egyike, tehát a CIE színingermérő észlelő hibás értékeket vesz fel, főként a színek 465 nm körüli tartományában. Indoklásul Sperling [30] tanulmányára hivatkozik, melyben a szerző azt vizsgálta, hogy mérőszemélyei pszichofizikai kísérletben meghatározott spektrális fényhatásfok függvénye előállítható-e színingermegfeleltető függvényeik átlagának lineáris kombinációjaként. Estévez a színingermérés és a fotometria modelljeinek különválasztását javasolja. Tudományos célra Stiles és Burch 2°-os látószögű előkísérletéből származó színingermegfeleltető függvényeinek használatát ajánlja.

3.2 Thornton vizsgálatai

William Thornton hosszú időn át a világítástechnika szakterületén dolgozott, szakmai munkássága közleményei és szabadalmi révén vált ismertté. A szabványos észlelőkkel kapcsolatban felmerült problémák mellett fényforrások szín- és fénymérésében szerzett saját tapasztalatai arra ösztönözték, hogy megújítsa a CIE színingermérő észlelőket, egy pontosabb és több feladatra alkalmas színingermérő rendszert hozzon létre. Ezzel a szándékkal kezdte meg vizuális kísérleteit, melyeknek célja a CIE színingermérő észlelő hibáinak felderítése, és az emberi színlátás korai szakaszát jobban reprezentáló, új színínger-megfeleltető függvények meghatározása. Évtizedes kutatómunkájának eredményeit a Color Research and Application folyóiratban megjelent: 'Toward a more accurate and extensible colorimetry' c. közlemény-sorozatában [31-34, 36-38] foglalta össze.

3.2.1 Színínger-megfeleltetési kísérletek különböző alapszínínger-kombinációkkal

Korai munkáiban ép színlátók színínger-megfeleltető függvényeit határozta meg különböző alapszínínger kombinációk segítségével. Vizuális színínger-mérő készüléket használt fel, melyhez egy spektrométer csatlakozott, így a vizuálisan egyező színínger-párok spektrális teljesítmény-eloszlását közvetlenül mérhette. Maxwell és a maximum telítettség módszerével végzett színínger-megfeleltető kísérleteket [31]. A Maxwell módszerrel végzett kísérletekben referencia fényforrásként a



5. ábra. Thornton vizuális színínger-mérő-spektrométer készülékének optikai vázlata. Közvetlenül mérhető a látómező két felének spektrális teljesítményeloszlása

látómező egyik felében különböző korrelált színhőmérsékletű ($T_{cp} = 3000 \text{ K} - 6500 \text{ K}$), szélessávú fluoreszcens fényforrásokat alkalmazott. Nagy teljesítményű kvarc-izzólámpával és keskeny sávban áteresztő interferenciás szűrőkkel alap-színingereket hozott létre, ezek additív keverékével egy diffúzan visszaverő fehér felületet világított meg.

A színingerek abszolút spektrális teljesítményének méréséhez Thornton saját maga épített spektrométert (fő elemei: McPherson 275 monokromátor, Hamamtsu R376 fotoelektron – sokszorozó), a NIST által bemért izzólámpával kalibrált eszközzel 1 nm-es lépésközlépként végzett spektrális méréseket a 250 nm – 750 nm tartományban. A spektrométerbe egy optikai kábelon keresztül jutott a kettéosztott látómező vizsgált feléből a sugárzás (5. ábra).

Három mérőszeméllyel (J (életkora: 35 év), D (59) és T (67), 1 Nő / 2 Ffi, átlagéletkoruk 53,7 év) folytatott vizuális kísérleteket, színlátásukat természetes nappali megvilágítás alatt végzett Farnsworth – Munsell 100 Hue – teszttel ellenőrizte. Később másik három észlelő (L (64), S (58), F (53), 3 Ffi, átlagéletkoruk 58,3 év) lett a vizuális kísérletek alanya.

Első kísérleteiben 10°-os látómezővel, gyenge környezeti megvilágításban (a fénysűrűség a látómezőnek 10 - 20 % -a), binokuláris technikával (mindkét szemmel nézés) végzett színinger-megfeleltető kísérleteket. A megfigyelők adaptációja az egyezés beálltakor stabilizálódott. A látható színek tartomány középső régiójában nagyobb fénysűrűségűek (kb. 30 cd/m²) voltak a vizsgált színingerek, a színek tartomány (ibolya és vörös) végei felé azonban csökkent a fénysűrűség.

3.2.2 Az észlelő használhatósága függ az alap-színingerektől – spektrális régiók

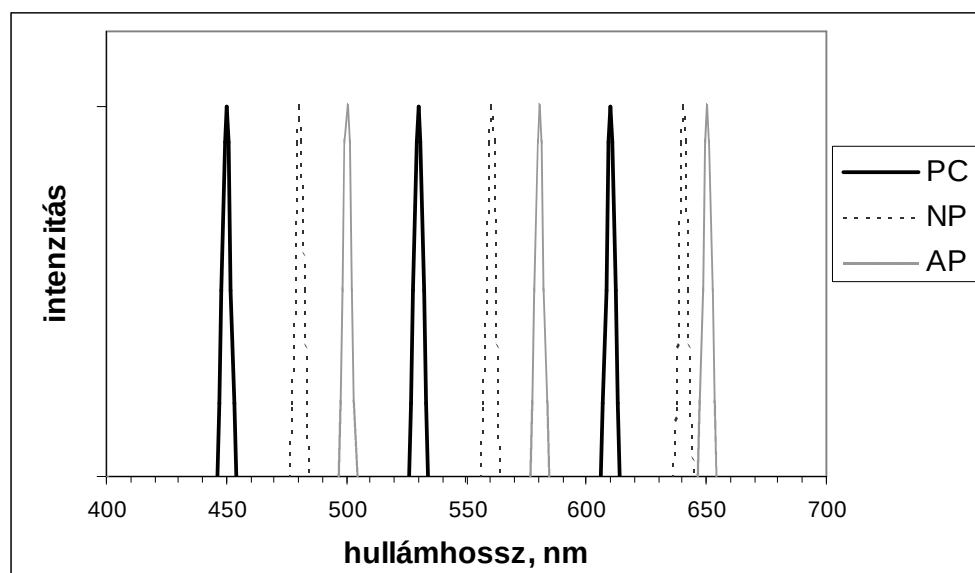
Thornton egyes esetekben nagy eltéréseket talált vizuálisan egyező metamer pároknak a CIE 1964 10°-os színingermérő észlelővel számított színinger-jellemzői között [32]. Két, vizuálisan egyező színinger között akár 70 ΔE^*_{ab} színinger-különbség is adódott, ilyen mértékű eltérést eddig nem tapasztaltak (ha [A] és [B] színingereket a szabványos észlelő látja egyezőnek, [A] és [C] színingereket pedig a valódi észlelő, akkor a két észlelő közötti különbség nagysága jellemezhető a [B] és [C] közötti színinger-különbség értékével, melyet CIELAB ΔE^*_{ab} egységekben adhatunk meg).

A különböző alap-színingerekkel végzett vizuális kísérletek eredményeiből arra következtetett, hogy a CIE színingermérő észlelő különböző pontossággal írja le a színinger-megfelelést, a pontosság pedig attól függ, hogy a színek melyik tartományaiból választották az alap-színingereket. Ennek megfelelően három spektrális régiót definiált (III. táblázat). A PC (Prime Colour) régióból választott alap-színingerek additív keverékeként létrehozott színingerek és a teszt-színinger egyezését pontosan leírják a színingermérő észlelő, a PC hullámhossz-értékekhez rendelhetők a vizuális rendszer érzékenysége maximumai [33]. Az NP (Non-Prime) és AP (Anti-Prime) tartományokban (6. ábra) azonban a vizuálisan egyező színingerek a CIE színinger-megfeleltető függvényekkel számított színinger-jellemzői között egyre nagyobb eltérést talált.

III. táblázat. A PC, NP és AP "spektrális régiók" alap-színingereit jellemző hullámhosszak.

PC alapszíningerek	450 nm	530 nm	610 nm
NP alapszíningerek	480 nm	560 nm	640 nm
AP alapszíningerek	500 nm	580 nm	650 nm

Grassmann törvényei közül az additivás vizsgálatára dolgozott ki egy közvetlen módszert, melyben vizuálisan egyező színinger-párok összegeit használta fel teszt – színingerként. Mivel az összegek között csak kis vizuális különbséget látott a három megfigyelő és szisztematikus eltérések nem mutatkoztak, arra következtetett, hogy az additivás törvénye többé-kevésbé fennáll. Összehasonlítva a CIE 1964 10° színingermérő észlelővel számolt színinger-jellemzőket a vizuális kísérletek eredményeivel, viszont jelentős, szisztematikus ellentmondásokat talált, ebből arra következtetett, hogy ez az észlelő nem képviseli jól a valódi megfigyelőket [34]. Egyedülálló tapasztalatait más szerzők a nagy látószögű, alacsony fénysűrűségű színinger-megfeleltetésben tapasztalt pálcika mechanizmusokkal hozták összefüggésbe [35]. Ezért egy későbbi közleményben kiterjesztette vizsgálatait a nagyobb fénysűrűségű (100 cd/m²) színinger - megfeleltetésre [36]. Nyolc észlelővel végzett kísérleteket 2°-os és nagy látószöggel egyaránt, az eredmények megerősítették a korábban tapasztaltakat. Vizsgálataiból arra következtetett, hogy a 10°-os és a 2°-os színingermérő észlelők közül egyik sem reprezentálja megfelelően a valódi észlelőkkel végzett vizuális kísérletek eredményeit [37].



6. ábra. Szimulált keskenysávú alapszíninger-hármasok a Thornton közleménysorozatában definiált PC (Prime Colour), NP (Non-Prime) és AP (Anti-Prime) "spektrális régiókban"

Ezt követően Thornton új módszert mutatott be színinger-megfeleltető függvények meghatározására, tíz pár erősen metamer akromatikus színingert alkalmazott, nyolc ép színlátó mérőszemély átlagával számolt [38]. Az új, Maxwell és a maximum telítettség módszerével kapott függvényekkel nem sikerült jobb eredményt elérnie, továbbra is nagy különbségek mutatkoztak vizuálisan egyező párok számított színinger-jellemzőiben.

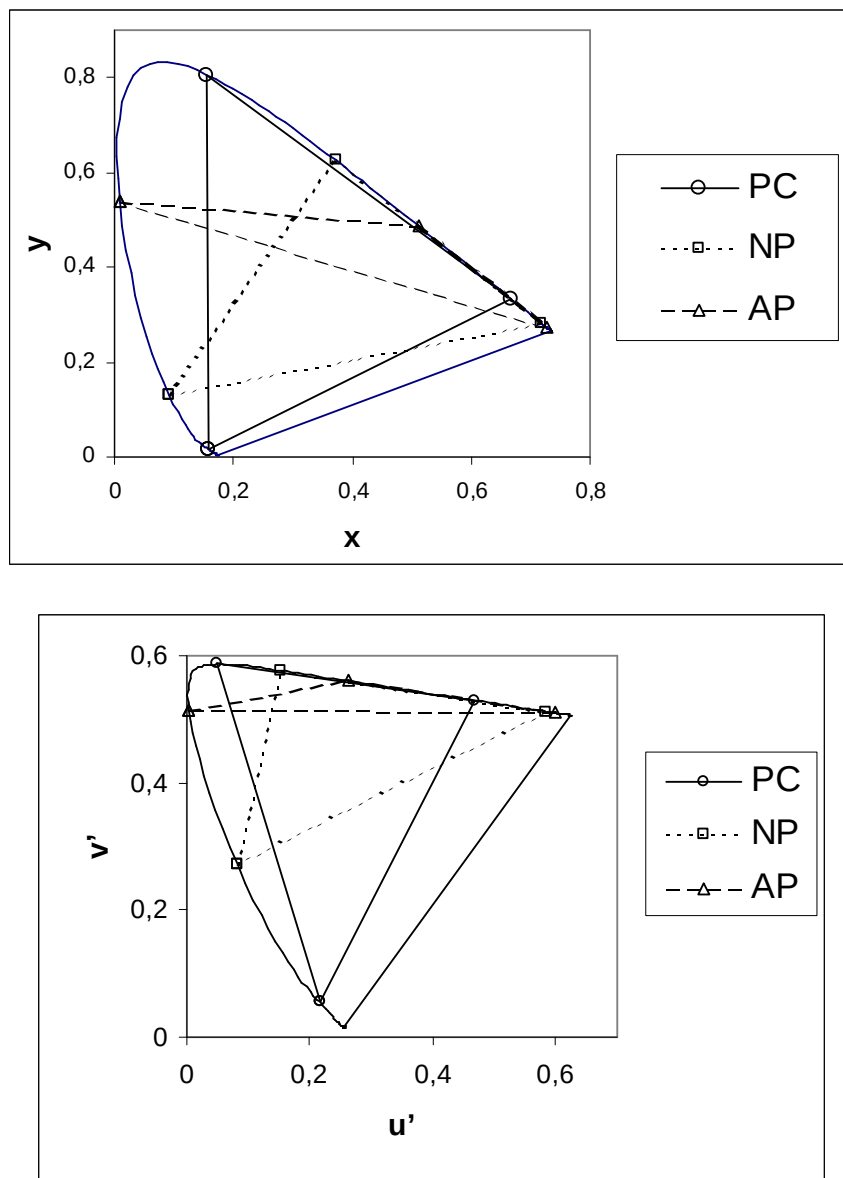
A normál színlátókat nem megfelelően képviselő színinger-megfeleltető függvényeken alapuló színingerterek nem megbízhatóak az erősen metamer mintapárokkal végzett színinger-megfeleltetésben, kockázatmentesnek mondható viszont a meghatározott fényforrás alatt látott festett mintákkal végzett pszichofizikai kísérletekre épülő színrendszerek (pl. Munsell, OSA) használata [39].

Az additív színingerkeverés elvén működő eszközök (monitorok, kamerák, szkennerek) és fényforrások (fluoreszcens fénycsövek, LED "clusterek") fontos paraméterei a színkészlet (colour gamut) és a fényhatásfok [40]. Brill [41] megmutatta, hogy az egységnyi energiájú monokromatikus színingerek közül a PC spektrális régióba tartozók biztosítják a legnagyobb színkészletet; az alapszíninger-vektorok által meghatározott paralelepipedon térfogata akkor maximális, ha a PC spektrális régióhoz tartoznak. A PC alap-színingerekkel érhető el a legnagyobb fényhatásfok is, így képmegjelenítő eszközöknél ezek használata ideális [42]. A 7. ábrán megfigyelhető, hogy a CIE x, y és u', v' színinger-diagramokban, a PC, NP és AP spektrális régiókból vett alap-színingerekkel additív színingerkeveréssel nyerhető színingerek tartományai közül a PC-hez tartozik a legnagyobb.

Thornton a fent említett munkákban megkérdőjelezte az alapszíningerek transzformálhatóságát: szerinte a CIE hibát követett el, amikor ezzel a módszerrel hozták létre Wright és Guild vizuális kísérleteinek eredményeiből az RGB, majd az XYZ színingermérő rendszert. Szerinte korlátozza az észlelők használhatóságát, hogy a CIE színinger-megfeleltető függvények nem valódi észlelők spektrális érzékenységi görbéi – sokkal megfelelőbb lenne egy olyan színingermérő rendszer, melynek súlyfüggvényeinek maximumhelyei a vizuális rendszer legnagyobb érzékenységu régiójába esnének [43].

Thornton munkáját támogatók mellett akadnak szakemberek, akik eredményeit és következtetéseit bizalmatlanul fogadták. MacAdam [44] szerint Thornton tévesen hivatkozik rá, amikor a komplementer színingerek fotometriai kapcsolatát bemutató eredményeit saját tapasztalatai [36] előjelének tekinti, törekvéseinek helyességét is kétségbe vonja. A CIE aktívan foglalkozik a fejezetben röviden ismertetett kérdésekkel, technikai bizottságot hoztak létre a színingermérő függvények fejlesztésére (Improved Color-Matching Functions TC 1-56).

A továbbiakban ismertetendő kísérleteimmel ezen ellentmondások feloldásához kívántam hozzájárulni.



7. ábra. A PC, NP és AP alap-színingerek által meghatározott háromszögek a CIE x, y színinger-diagramban és a CIE u', v' egyenletes színinger-diagramban. Additív színinger-keveréssel a háromszögek belső területére eső színingereket lehet létrehozni. A PC alap-színingerekkel hozható létre a legnagyobb színkészlet

4 A CIE 1931 Színingermérő észlelő használhatósága katódsugárcsőes monitorok esetén

4.1 Bevezetés

Napjaink színreprodukciós alkalmazásaiban a dokumentumot először számítógép képernyőjén tervezik meg (soft-copy), majd a kész nyomtatott anyagot (hard-copy) a képernyőn látottal vetik össze. A soft-copy és hard-copy metamerek, ha ezek összehasonlítása már a színinger-megfeleltetés szintjén problémát okoz, akkor torzulnak a színinger-összetevőkből számított további tulajdonságok értékei is. (A fenti művelet színmegjelenés és színmenedzsment témakörét érintő kérdéseivel ebben a munkában nem foglalkozunk.)

A lapos képernyő (flat panel display) technológiák dinamikus fejlődése ellenére még mindig a katódsugárcsőes monitor a számítógép képmegjelenítők legelterjedtebb fajtája.

4.2 Kísérleti módszer

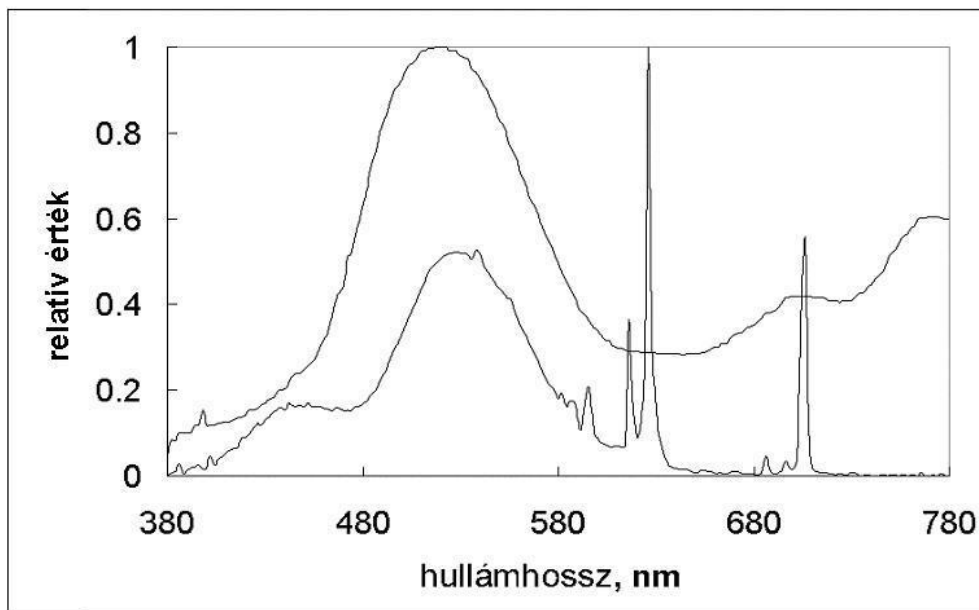
Az CIE 1931 színingermérő észlelő vizsgálatára összeállított kísérletünkben hard-copy - soft-copy színinger-megfeleltetést végeztünk mérőszemélyekkel; a Munsell színtaszból kiválasztott festett színminták és számítógép képernyőjén létrehozott változtatható minta között. A katódsugárcsőes monitor széles és keskenysávú alap-színingereinek additív keverékének spektrális összetétele jelentősen különbözik a vele vizuálisan egyező, izzólámpával megvilágított Munsell színmintáétól (ilyen, vizuálisan egyező metamer pár spektrális teljesítmény-eloszlása látható a 8. ábrán).

A metamer mintapár vizuális egyezését szabványos észlelő esetén az alábbi összefüggések írják le:

$$\begin{aligned} \int_{380}^{780} \beta_{Munsell}(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} (R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{780} \beta_{Munsell}(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} (R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{780} \beta_{Munsell}(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} (R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

ahol $\beta_{Munsell}(\lambda)$ az adott Munsell minta spektrális reflektanciája, $S(\lambda)$ a fényforrás, $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ és $B(\lambda)$ pedig a monitor fényporainak spektrális teljesítmény-eloszlása, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ a CIE 1931 2° színinger-megfeleltető függvények.

Az eredményekben a metamer színinger-megfeleltetés vizsgálata mellett elemezhető a Thornton által definiált spektrális régiók szerepe is.

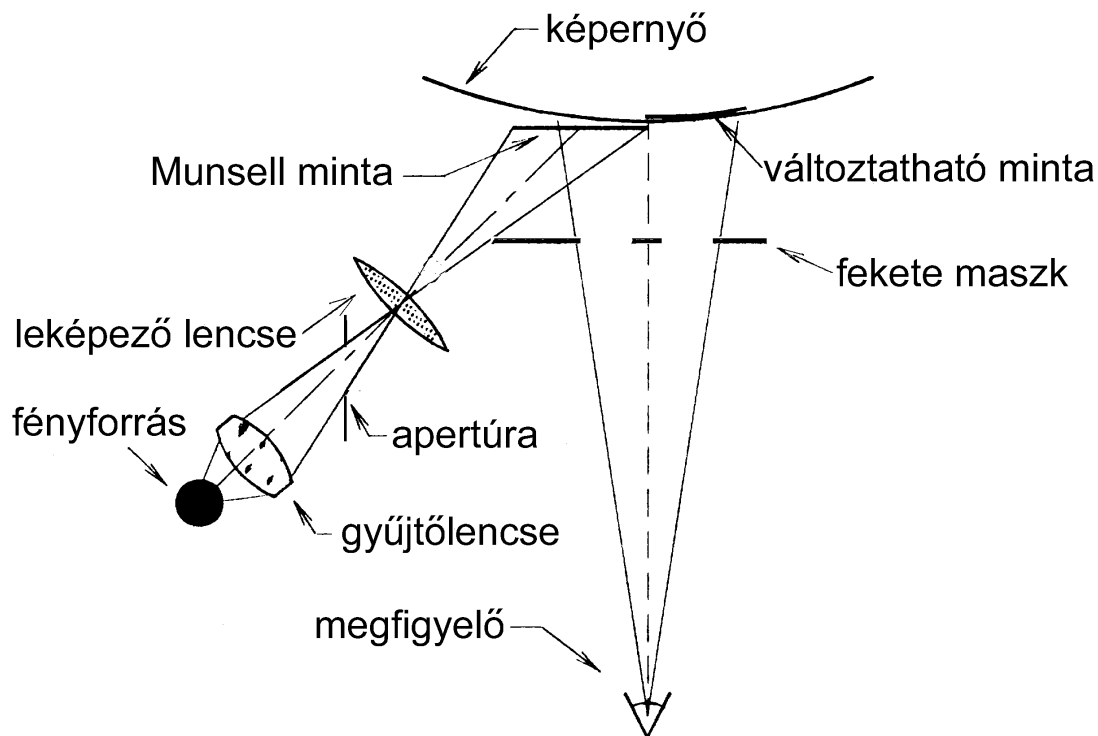


8. ábra. Metamer színinger-pár relatív spektrális teljesítmény-eloszlásai: a fényforrással megvilágított 10 G 3/6 Munsell minta és a képernyőn megjelenített színinger (a monitor vörös, zöld és kék fénypora emissziójának additív keveréke) az adott megfigyelő számára azonosnak látszik

4.3 A kísérleti elrendezés

A CIE színinger-megfeleltető függvények vizsgálatához kísérletet állítottunk össze. Optikai padon halogén izzólámpa és lencserendszer segítségével festett Munsell mintákat világítottunk meg egyenletesen, a szabványos 45/0 geometriát [45] alkalmazva (9. ábra). Számítógép képernyőjén interaktívan változtatható színezetű színmintát hoztunk létre, sötétszürke háttéren, melynek fényűrűsége átlagosan $\sim 1 \text{ cd/m}^2$ volt. A monitor vörös, zöld és kék csatornájának erősítését változtatva tudták beállítani a megfigyelők a színinger fényűrűségét, színességét.

A Munsell mintát közvetlenül a képernyő felületéhez, a monitoron megjelenített minta síkjába illesztettük, és a mintapár elé egy fekete maszkot helyeztünk, amelynek két nyílása $2 \times 1.5^\circ$ -os látószöget biztosított; a képernyőn létrehozott és a Munsell minta nem érintkezett közvetlenül. A megfigyelő a képernyőtől 1 méter távolságban foglalt helyet, ilyen távolságból már nem volt észlelhető a képernyő mintázata, homogén stimulusokat érzékelt.



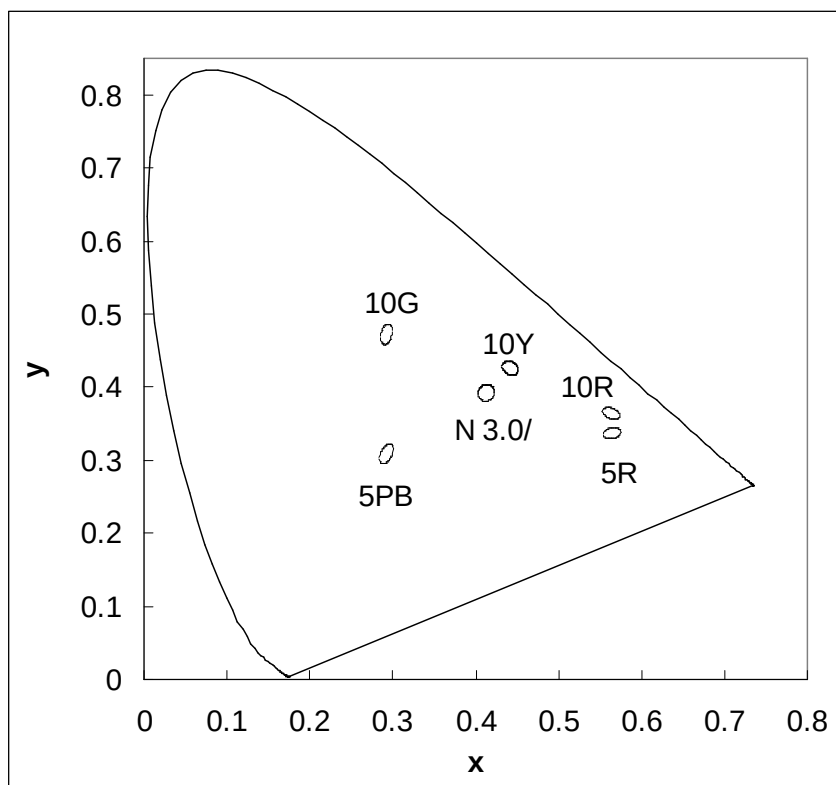
9. ábra. A kísérleti összeállítás optikai vázlata

Egy sötét szobában, EIZO FlexScan F784 típusú monitoron dolgoztunk, 800x600-as képfelbontás és 24 bit/képpont színmélység (csatornánként 256 érték) mellett, 87 Hz képfrekvenciával, a képernyő fehérpontjának korrelált színhőmérséklete 6500 K volt (a második fejezetben megmutattuk, hogy a korrelált színhőmérséklet vizuális meghatározása bizonytalan, ezért csak a matematikai definíciót vesszük figyelembe és 100-ra kerekített értékekkel számolunk). A megfigyelők hat Munsell mintát (N 3.0/, 5 PB 3/6, 10 Y 3/2, 5 R 2/6, 10 R 2/4, 10 G 3/6) láttak, minden alkalommal más sorrendben. A kísérleteket a monitor bemelegedése (kb. 30 perc) után kezdtük meg.

4.4 A képmegjelenítő vizsgálata

A kísérletsorozat előtt meg kellett győződnünk a felhasznált képmegjelenítő színfelbontásának megfelelőségéről. Katódsugárcsöves monitorok alap-színingereinek (fényporainak) spektrális teljesítmény-eloszlásakevössé függ a monitor típusától. A CCIR 709 szabvány írja elő az alapszíningerek színinger-koordinátáit, eltérések adódhatnak az erősítés és a fehérpont beállításából eredően [46,47]. Az általunk használt – és legelterjedtebb – színmélység (24 bit/képpont) több mint 16 millió különböző színinger megjelenítését teszi lehetővé, azonban az *R*, *G*, *B* csatornák erősítésének

1 bites változtatása is a vizuális megkülönböztetési küszöbhez közelítő mértékű változást eredményezhet a képernyőn létrehozott színingerben. A monitor R , G , B színingertere eszközfüggő, nem egyenletes: a színingertérben a küszöbértéknyi (éppen észlelhető) színinger-különbségekhez nem egyforma távolságok tartoznak. Ha katódsugárcsöves monitoron kívánunk vizsgálni egy színingert, meg kell határoznunk a D/A átalakítás kvantálási hibáját e színinger környezetében, mivel ez befolyásolhatja a színinger-megfeleltetés eredményeinek pontosságát és szórását. Ezért megvizsgáltuk a hat teszt-színinger egységnyi sugarú környezetében mekkora színinger-különbségeket találunk. A kivilágított Munsell színminták színinger-összetevőinek megfelelő mintát jelenítettünk meg a képernyőn, majd ennek R , G , B koordinátáit ± 1 értékkel megváltoztatva 6 új színpontot kaptunk a vizsgált színinger körül.



10. ábra. A kísérletben használt monitor színfelbontását jellemző tolerancia-ellipszisek tízszeres nagyításban, a CIE x,y színinger-diagramban

Az így kapott értékekkel MacAdam módszere alapján [48] tolerancia-ellipsziseket számolva szemléltethető a pontok szórásának nagysága és irányultsága a CIE x,y színinger-diagramban (10. ábra). Ha összehasonlítjuk az így kapott ellipsziseket a kísérlet szórásait jellemzőkkel (14. ábra felső része), látható, hogy ezek sokkal kisebbek, tehát a monitor színfelbontása elegendő ahhoz, hogy az eredményeket ne befolyásolja. A teszt-színinger fent definiált egységnyi sugarú környezetében a számított színinger-különbségek nem haladták meg az $1 \Delta E_{ab}^*$ értéket.

4.5 Mérési módszer

A színingerek fizikai mérését közvetlenül az után végeztük, hogy a mérőszemély a kivilágított reflexiós minta és a képernyőn megjelenített között az egyezést beállította. A mérőfejet a megfigyelővel azonos pozícióba helyeztük, így a mérőrendszer bemenetére eső sugárzás megegyezett a megfigyelő szemébe jutó sugárzással.

Számítógéppel vezérelt, CCD detektor-soros Ocean Optics S2000 száloptikás spektrométerrel (specifikációja megtalálható a II. Mellékletben) mértük a látómezők relatív spektrális teljesítményét. A spektrométer bemenetére csatolt optikai kábel szabad vége elé egy diffúzor (szürke optikai szűrőt) helyeztünk, így csökkentettük a spektrométerbe jutó optikai sugárzás intenzitását és irányfüggését [49].

A méréseket a 380 nm - 780 nm hullámhossz-tartományban végeztük, a színinger-koordináták kiszámításakor a mért spektrális eloszlást 1 nm-es lépésközzre interpoláltunk a Lagrange módszerrel (szakaszonként harmadfokú polinomokkal). A spektrométer kalibrációjához az OMH által bemért sztenderd lámpát használtunk. A monitor 87 Hz-es képráfrítási frekvenciájához választott 200 ms integrálási idővel kiküszöbölhető volt a mért érték ingadozása, mely a képmegjelenítő és a mérőeszköz aszinkron működéséből ered [50]; 8 mérés átlagával számoltunk. A fénysűrűség mérését egy InPhoRa gyártmányú tri-stimulusos színingermérő készülékkel végeztük.

Bár a felhasznált monitor időben stabilnak bizonyult és megfelelt a fizikai modellezés követelményeinek [51], kalibrációs modellek vagy a szabványos sRGB színingertér használatánál [52] nagyobb pontosságúnak találtuk, ha mért spektrális teljesítmény-eloszlásokkal dolgoztunk, s ezekből számítottuk a színinger-jellemzőket.

4.6 Mérőszemélyek

Nyolc ép színlátó megfigyelő vett részt kísérletünkben, 5 nő és 3 férfi. Mindannyian egyetemi hallgatók, életkoruk: 20-28 év. Színlátásukat anomalosóppal ellenőriztük. Három mérőszeméllyel kiegészítő méréssorozatot is végeztünk, hogy a megfigyelők közötti szórás mellett a megfigyelőn belüli szórásról is képet kapjunk.

Az egyes tesztek között pihenőidő állt mérőszemélyeink rendelkezésére, így elkerültük szemük túlzott megerőltetését. A tesztorozat előtt legalább 5 percet vártunk a megfigyelők adaptációjának állandósulása végett, a hat mintával végzett színinger-egyeztetés 20-25 percet vett igénybe. A megfigyelők minden alkalommal kevert sorrendben látták a mintákat.

IV. táblázat. (ABCD). A) A kísérletben felhasznált Munsell minták színességi koordinátái és fényssűrűségei. B) A mérőszemélyek által beállított minták színínger-összetevőinek átlagai. C) A képernyőn beállított minták színínger-összetevőinek szórásai. D) A hard-copy és soft-copy minták között számított CIELAB ΔE^*_{ab} színínger-különbségek átlagai és maximumai.

A) MUNSELL MINTÁK	N 3.0/	5 PB 3/6	10 Y 3/2	5R 2/6	10R 2/4	10G 3/6
x	0,4125	0,2926	0,4384	0,5690	0,5564	0,2947
y	0,3943	0,3091	0,4218	0,3392	0,3670	0,4613
Y	35,01	31,4	36,76	20,1	18,75	34,2

B) A MEGFIGYELŐK ÁTLAGAI	N 3.0/	5 PB 3/6	10 Y 3/2	5R 2/6	10R 2/4	10G 3/6
x	0,4122	0,2920	0,4417	0,5640	0,5636	0,2912
y	0,3922	0,3090	0,4261	0,3366	0,3645	0,4708
Y	34,25	30,89	36,22	19,38	18,89	33,48

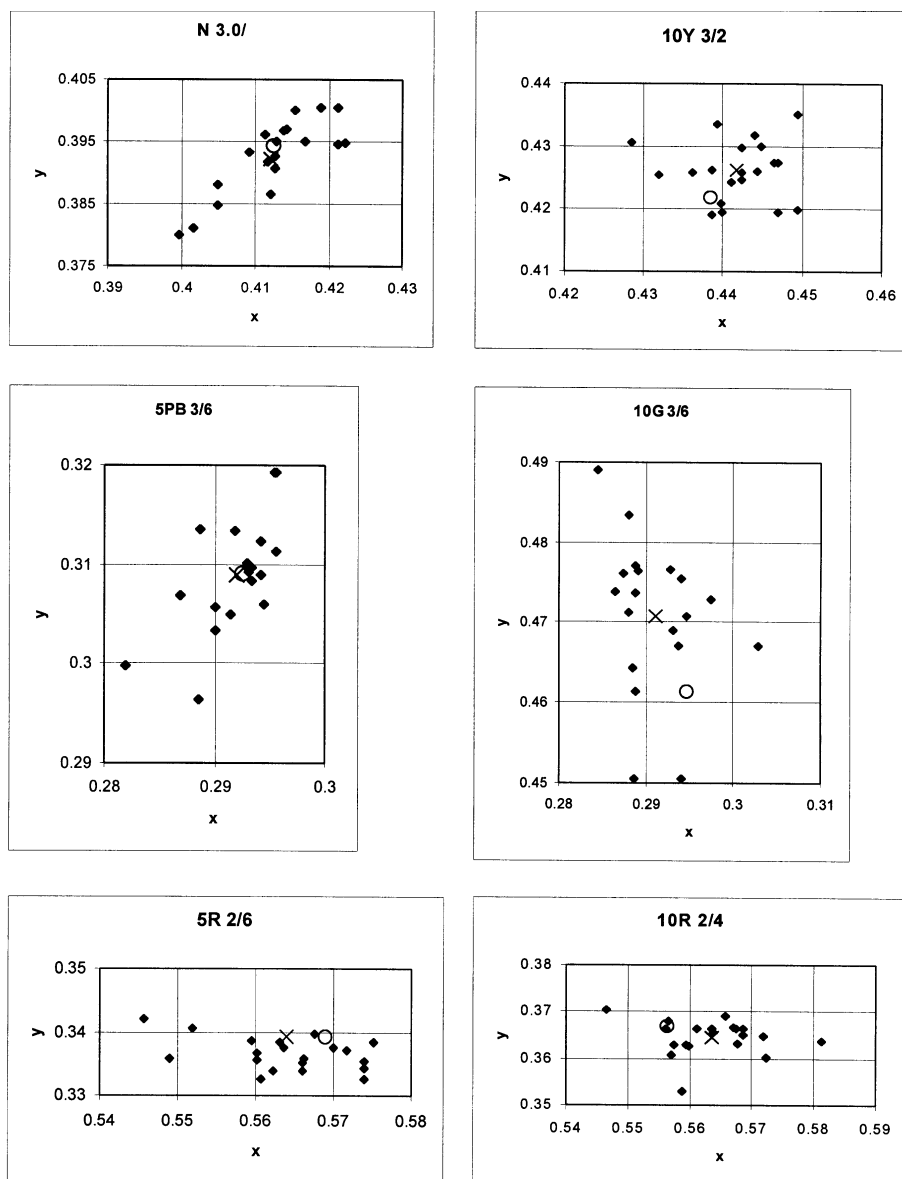
C) A MEGFIGYELŐK SZÓRÁSAI	N 3.0/	5 PB 3/6	10 Y 3/2	5R 2/6	10R 2/4	10G 3/6
x	0,0064	0,0034	0,0054	0,0083	0,0076	0,0043
y	0,0061	0,0056	0,0047	0,0026	0,0037	0,0093
Y	3,29	4,07	3,88	0,99	2,15	5,25

D) KÜLÖNBSÉGEK	N 3.0/	5 PB 3/6	10 Y 3/2	5R 2/6	10R 2/4	10G 3/6
x	0,0003	0,0006	0,0032	0,0050	0,0071	0,0036
y	0,0021	0,0001	0,0043	0,0027	0,0025	0,0094

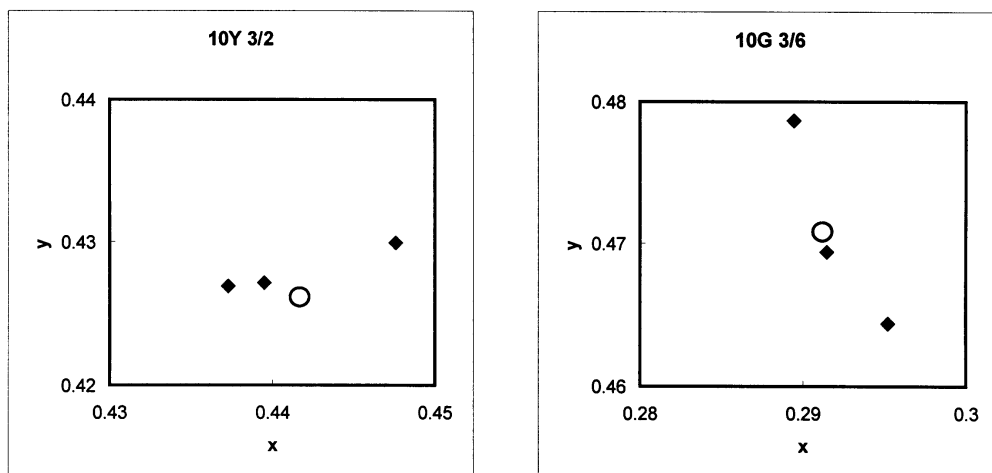
Átlagos ΔE^*_{ab}	5,63	5,72	5,93	4,19	5,61	7,71
Maximum ΔE^*_{ab}	12,12	11,52	10,48	9,00	10,74	14,03

4.7 Eredmények

A képernyőn létrehozott minták átlagos fénysűrűsége $29,4 \text{ cd/m}^2$ ($18,7 - 36,6 \text{ cd/m}^2$) volt, a mintapárok mért és számított színinger-jellemzőit a IV. táblázatban foglaltuk össze. Ebben a látási situációban (apertúra mód, sötét környezet) a szem adaptációs állapota nem egyértelmű, így a számított ΔE_{ab}^* színinger-különbség értékeket csak relatív értékeknek lehet tekinteni. A CIELAB színingertérben végzett számításoknál referencia fehér színingernek a monitor csúcs-fehér pontját (255, 255, 255) vettük.



11. ábra. A CIE x,y diagram részletein a 20 egyedi kísérlet képernyőn beállított színpontjai (rombusz-ok), e színpontok átlagai (kereszt), valamint a referencia Munsell minták színpontjai (kör) láthatók



12. ábra. Három megfigyelő egyéni átlagainak színinger-koordinátái (rombuszok) a 10Y 3/2 és a 10G 6/6 Munsell minták (körök) esetén

A 11. ábrán láthatók az egyes kísérletekben a megfigyelők által beállított színingerek a hat vizsgált színinger körül az x,y színinger-diagramban. E színpontok eloszlásának alakja és mérete egyaránt jól közelíti Rich és Jalili [53] eredményeit, ők szintén katódsugárcsöves monitort használtak egy hasonló kísérleti összeállításban. A megfigyelők közötti szórást (inter – observer variability) szemléltetik a 12. ábra színingerdiagram-részletei, melyen három mérőszemély legalább 4 alkalommal végzett beállításának átlagainak színpontjai láthatók.

4.8 Diszkusszió

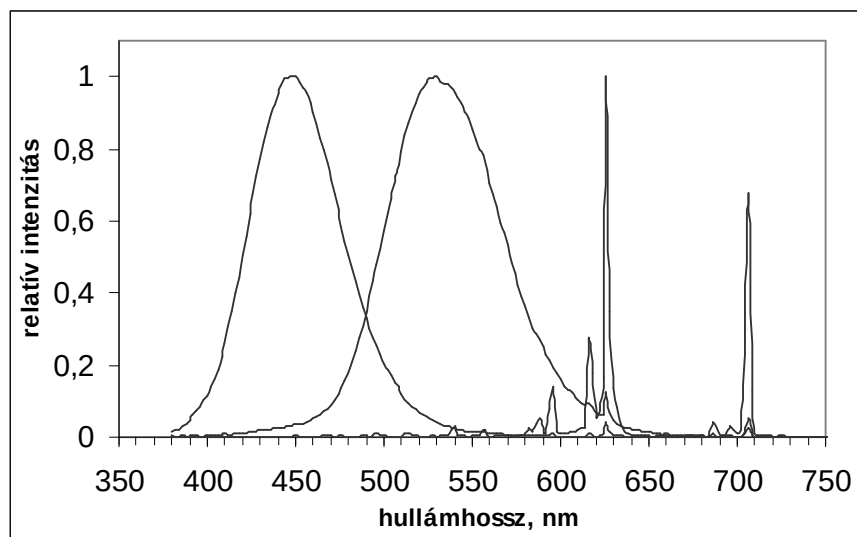
4.8.1 Az eredmények elemzése

Munkám célja, hogy a szabványos észlelőt megalapozó színinger-megfeleltetési kísérletek eredményeit újraértékeljük számítógépes színinger-megfeleltetési kísérletsorozatunk tükrében. Ezért eredményeink értelmezéséhez segítségül felhasználjuk a színinger-megkülönböztetési küszöb vizsgálatára irányuló kísérletek módszereit.

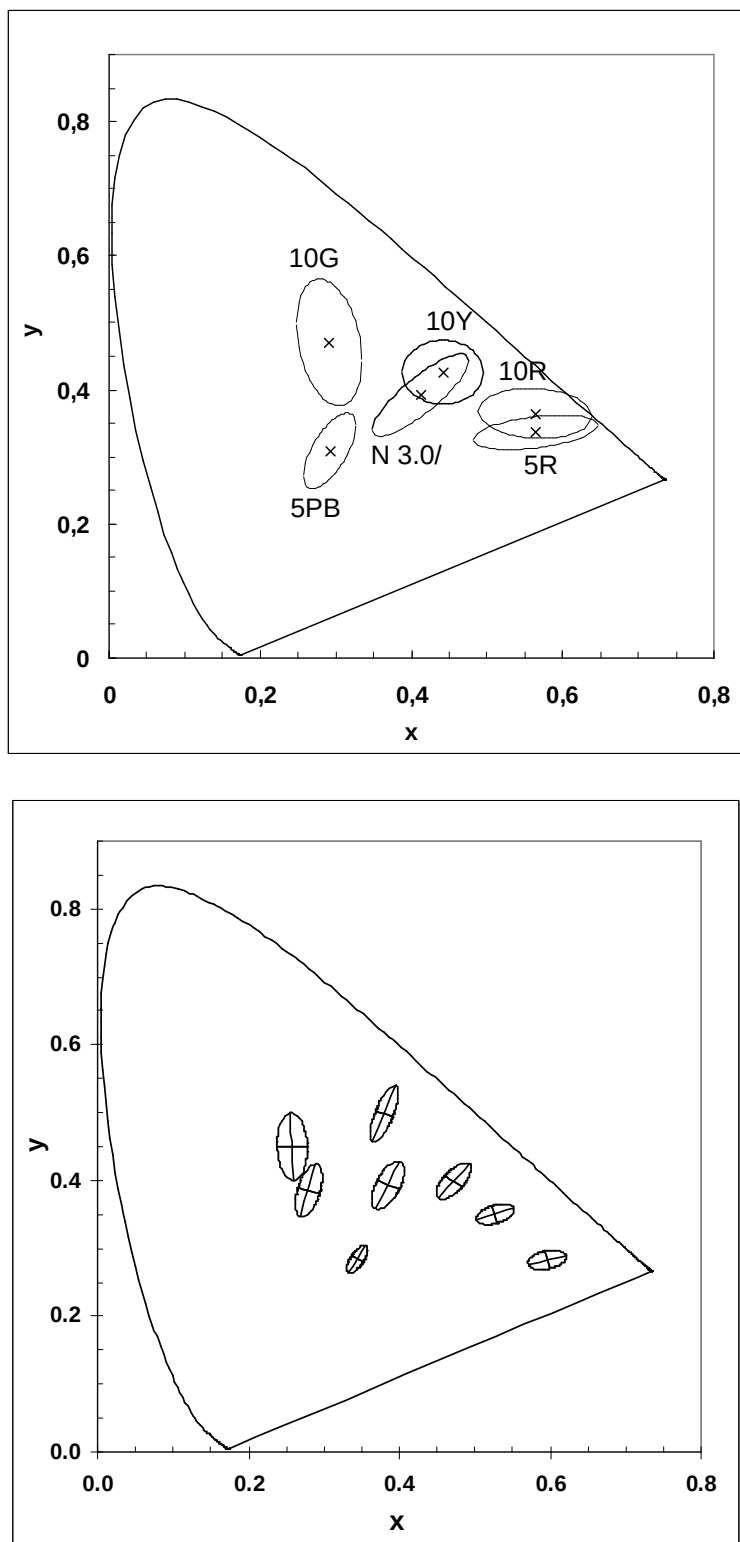
MacAdam [54] és Brown és MacAdam [55] foglalkozott elsőként az éppen észlelhető színinger-különbség meghatározásával a CIE XYZ színingertér különböző tartományaiban, a klasszikus trikromatikus színinger-megfeleltetés módszerével. Érdekes összevetni kísérletünk eredményeit ezekkel a munkákkal, hiszen a szerzők hasonló körülményeket definiáltak: 2°-os osztott látómezővel, sötét környezetben, vizsgált (nem metamer) mintáik is közel azonos fénysűrűségűek voltak ($1 - 34 \text{ cd/m}^2$), ezért eredményeink összehasonlíthatók az x,y színinger-diagramban [56].

A színinger-megfeleltetés színinger-koordinátái normális (Gauss) eloszlásúak a vizsgált színinger színpontjának környezetében [57]. Az éppen észlelhető színingerkülönbségű pontok az x,y színinger-diagramban egy ellipszis, a CIE XYZ színingertérben pedig egy ellipszoid kerületén helyezkednek el. Módszerüknek megfelelően ellipsziseket rajzoltunk az eredmény-pontok köré (14. ábra), ez jól szemlélteti a szórást egy adott színinger körül.

Thornton a metamer színinger-megfeleltetéshez [31] közel monokromatikus alap-színingereket használt. A katódsugárcsöves monitor kék és a zöld fényporának spektrális teljesítmény-eloszlása szélessávú, a maximumhelyeiket tekintve (450 nm és 530 nm) a „PC” régiókba esnek (13. ábra). Az alapszíningerek közül a vörös színeké áll keskeny sávokból, ezek közül a legnagyobb amplitúdójúak (melyekben a spektrális teljesítmény 70 %-a koncentrálódik) maximumai 626 nm-nél ill. 706 nm-nél található. A 706 nm-en sugárzott teljesítmény fényhatásfoka elhanyagolható, a színinger-megfeleltetésben nagyobb szerepet játszanak a vizuális rendszer szempontjából hatékonyabb 595 nm-en és 615 nm-en található kisebb csúcsok. Mivel a hatásos teljesítmény a [610 nm, 640 nm]-es tartományban koncentrálódik, állíthatjuk, hogy a monitor vörös fénypora a PC-NP spektrális régiókba tartozik. Ennek akkor van jelentősége, ha a képernyőn megjelenített, a festett mintával egyező stimulus sok vöröset tartalmaz, ez okozhatna nagyobb eltérést az x,y színinger-koordinátákban. A vizuális egyezésekhez tartozó színingerkoordináta-eltérések nőttek, ha a vörös alapszíningerből többet tartalmazott a keverék. Ez utalhat arra, hogy a vörös alapszíninger nem egyértelműen "Prime Color", de emellett figyelembe kell venni, hogy a megfigyelők színinger-megfeleltető függvényei közötti eltérések a színekép hosszú hullámhosszú (vörös) tartományában a legnagyobbak [58].



13. ábra. Katódsugárcsöves monitor fényporainak relatív spektrális teljesítmény-eloszlása



14. ábra. Az ábra felső részén a hat Munsell mintához tartozó eredménypontok szórását jellemző ellipszisek, alsó részén MacAdam (1942) egy megfigyelőre vonatkozó ellipszisei láthatók tízszeres nagyításban a CIE x,y színinger-diagramban

A IV. táblázatban olvasható CIELAB színinger-különbség értékek jelentősek, ez nem mond ellent a korábban tapasztaltaknak [53]. A megfigyelők közötti nagy különbségekkel is találkozhatunk közleményekben [59].

Az erős metaméria ellenére nem találtunk nagy ellentmondást a CIE 1931 színingermérő észlelő és a valódi, ép színlátó észlelők között. A CIE színingermetrika tehát az eddigi gyakorlatnak megfelelően alkalmazható a katódsugárcsöves monitoron látott színes dokumentum nyomtatott dokumentummá alakításában – a színreprodukciós folyamatban.

4.8.2 Következtetések

Bár a metamer színinger-megfeleltetés során nagy eltéréseket figyelhettünk meg a színinger-jellemzőkben, nem találtunk rendszeres hibát a CIE 1931 színingermérő észlelőben, amely meghaladta volna az eddig tapasztaltakat [60].

Színmegjelenési modellek összehasonlításánál [61], tesztelésénél [62] a modell alapján színi transzformációt hajtanak végre a nyomtatandó dokumentumon, majd a kész oldalt a képernyőn látottal vetik össze ('cross media direct comparison'). Mivel a modellek bementi értékei a szabványos észlelővel számított színingerösszetevők, az összehasonlítás értékelésénél figyelembe kell venni, hogy ha már a metamer színinger-megfeleltetés is $3-10 \Delta E_{ab}^*$ egységnyi színinger-különbséget eredményez, nem érdemes $1-3 \Delta E_{ab}^*$ egységnyi színinger-különbségek elemzésével foglalkozni.

5 Színinger - megfeleltetés keskenysávú alap-színingerekkel

5.1 Keskenysávú fényforrások: világító diódák (LED-ek)

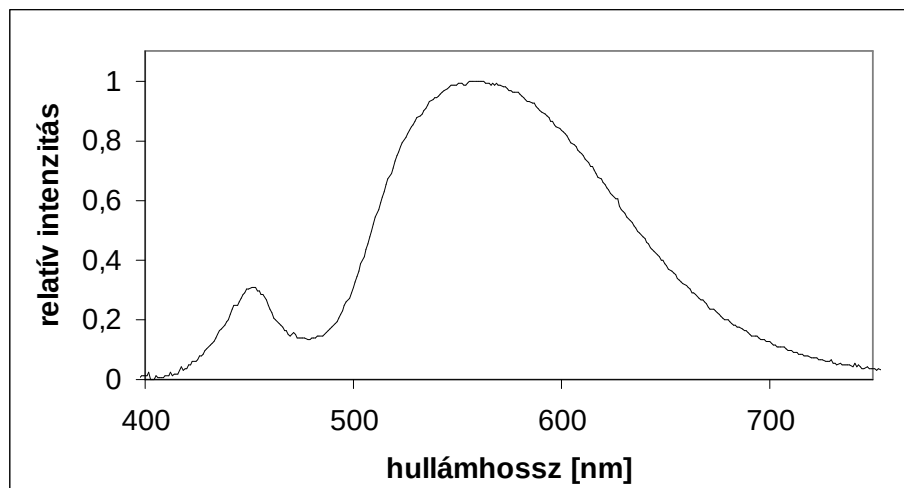
A nagy fénysűrűségű világító diódák (Light Emitting Diode, LED) fejlődésük jelenlegi szakaszában fényforrásként is alkalmazhatók [63, 64], fényhasznosításuk eléri a 20 lm/W értéket (Nichia corp. 2001) élettartamuk jóval meghaladja a hagyományos fényforrásokét (~ 100 000 óra alatt csökken felére intenzitásuk). Nehezen megoldható azonban a kis felületű ($< 1 \text{ mm}^2$) chipek nagy áramsűrűsége miatt a hőelvezetés problémája.

Világító diódákban az elektrolumineszcens réteget a III.-V. főcsoport elemeinek vegyületei alkotják, az arzenidek és foszfidek a színek hosszú hullámú (vörös, narancs) a nitridek a rövid hullámú (kék, zöld) tartományára jellemzőek. A főbb technológiák fejlődéstörténetét [65] mutatja be az V. táblázat. E keskeny sávú sugárforrások mérés technikája nem csak a mérési geometriák terén jelent kihívást; a dolgozat 3. fejezetében ismertetett problémák megkérdőjelezzik a CIE 1931 színingermérő észlelő használhatóságát a színinger-jellemzőik kiszámításában.

V. táblázat. Világító diódák fejlődéstörténete.

Megjelenés éve	Emissziós színtartomány	Összetétel
1968	vörös	GaAs
1973	sárgászöld	GaP + ZnO
1975	sárga	GaAsP
1978	vörös (nagy fénysűrűségű)	GaAlAs
1996	kék	InGaN
1997	fehér	InGaN + YAG fénypor
2001	fehér (UV emisszió + fénypor)	InGaN + fénypor

Fehér fényforrásként először fényporba ágyazott kék LEDet használtak, ezek emissziós színtekén jól elkülöníthető a rövid hullámú és a fényporból származó sugárzás tartománya (15. ábra). Ennél hatékonyabb az ún. 'multichip' technológia: vörös zöld, és kék LED-ek sugárzásának additív keveréke esetén a Stokes-eltolódás okozta veszteséggel nem kell számolni, további előnye az egyszerű elektronikával megoldható hangolható fehérpont. Nehézséget jelent viszont a multichip hosszútávú színi stabilitásának biztosítása az egyes LED-ek öregedésének eltérő karakterisztikája miatt.



15. ábra. Fényporos fehér LED emissziójának relatív spektrális teljesítményeloszlása

Az elmúlt években a LED-ek az informatikai képpalkotó- és megjelenítő valamint színingermérő eszközökben egyre több módon kerültek felhasználásra. LIDE (Led Indirect Exposure) technológiájú kompakt lapolvasókban a dokumentumot három különböző színű LED világítja meg; kis méretű, reflexiós minták mérésére alkalmas spektrométerekben (colour mouse) [66] is megtalálhatók. Lapos képmegjelenítők legújabb technológiája a LED és az OLED (Organic LED, melyben a félvezető kristály helyett szerves molekulák alkotják az elektro-lumineszcens réteget), ezek válthatják fel az LCD képernyőket a közeljövőben [67]. A felsorolt eszközök szintani jellemzéséhez meg kell bizonyosodnunk arról, hogy a CIE 1931 színingermérő észlelő alkalmas e fényforrások színingermérésére.

5.2 Thornton kísérletének reprodukálása világító diódák felhasználásával

Thornton első kísérleteit [31, 32] kis számú, magas átlagéletkorú (53,7 év ill. 58,3 év) észlelő közreműködésével végezte, módszere és tapasztalatai egyedülállóak, hasonló eredményeket és következtetéseket a CIE színingermérő észlelő megfelelőségére vonatkozóan az irodalomban nem találtunk. Ezért a CIE színinger-megfeleltető függvények használhatóságát vizsgáló közvetlen módszert kellett kidolgoznunk, melyben az additív színinger-keveréshez két különböző spektrális régióból választott alap-színingereket használtunk fel.

Thornton kísérleteinek reprodukálásához közel monokromatikus alap-színingerekre volt szükségünk. Világító diódák spektrális teljesítménye szűk intervallumokban koncentrálódik. Segítségükkel megvalósítható, hogy a színinger-megfeleltetéshez használt alap-színingerek spektrális teljesítménye a Thornton által definiált régiók (PC, NP, AP) egyikében összpontosuljon.

Színíngert-megfeleltető kísérleteinkben a megfigyelők egy optikai szűrővel ellátott referencia fényforrás (izzólámpa) fényét egyeztetették változtatható intenzitású vörös, zöld és kék LED-ek fényének additív keverékével vizuális fotométerben.

A vizuális kísérletekben a következő összefüggések fenállását teszteltük:

$$\begin{aligned} \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} (R_i(\lambda) + G_i(\lambda) + B_i(\lambda)) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} (R_i(\lambda) + G_i(\lambda) + B_i(\lambda)) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} (R_i(\lambda) + G_i(\lambda) + B_i(\lambda)) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

ahol $S(\lambda)$ a referencia fényforrás, $R_i(\lambda)$, $G_i(\lambda)$ és $B_i(\lambda)$ pedig az $i = \{\text{PC; NP}\}$ spektrális régióba tartozó vörös, zöld és kék világító diódák spektrális teljesítmény-eloszlása, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ a CIE 1931 2° színíngert-megfeleltető függvények.

Laboratóriumunk nemzetközi munkakapcsolata lehetővé tette, hogy az amerikai LumiLeds vállalat nagy fénysűrűségű, AlInGaP (alumínium indium gallium foszfid) és InGaP (indium gallium nitrid) technológiával készült ún. "Barracuda" szerkezetű világító diódáit használjuk fel kísérleti eszközeinkben [68].

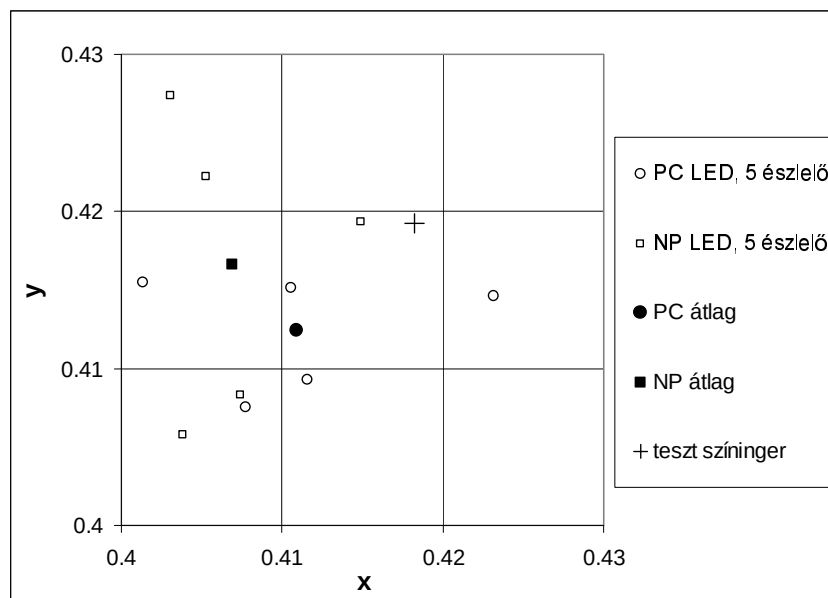
5.3 Kísérleti összeállítás

5.3.1 Előkísérlet

Világító diódák spektrális teljesítmény-eloszlása és fényerőssége hőmérsékletfüggő [69], sugárzásuk térbeli eloszlása nem egyenletes. Ezért előkísérletben [70] megvizsgáltuk, tudunk-e színíngert-megfeleltetés céljára nagy fénysűrűségű LED-eket használni. Hátról megvilágított diffúz ernyőn kör alakú osztott mezőbe vörös, zöld és kék LED-ek, és teszt-színíngerként optikai szűrővel felszerelt kompakt fluoreszcens fényforrás ($T_{cp} = 3300$ K) fényét vetítettük, az optikai szűrő a referencia fényforrás korrelált színhőmérsékletének emelésére szolgált (bár szélessávú teszt-színíngert alkalmazása a LED-ek mellett a metamer jellegét erősíti, egy izzólámpa hőelvezetése az adott kísérleti eszközben nem volt megoldható). A mérőszemélyek a LED alap-színíngerek intenzitását szabályozva állítottak be vizuális egyezést a teszt-színíngerttel. A LED-ek hűtését biztosító ventilátor helyigénye miatt a látómező két fele nem érintkezett közvetlenül, ezért a rövidtávú színemlék [71] torzító hatással lehetett az eredményekre.

Az előkísérletben tapasztaltak alapján megállapítottuk, hogy a rendelkezésre álló LED alap-színíngerekből megfelelő intenzitású, homogén színíngert tudunk additív színíngert-keveréssel

létrehozni, de az eredmények (16. ábra) nagy szórása arra figyelmeztetett, hogy a további vizuális kísérletekhez egy kifinomultabb eszközre lesz szükségünk.

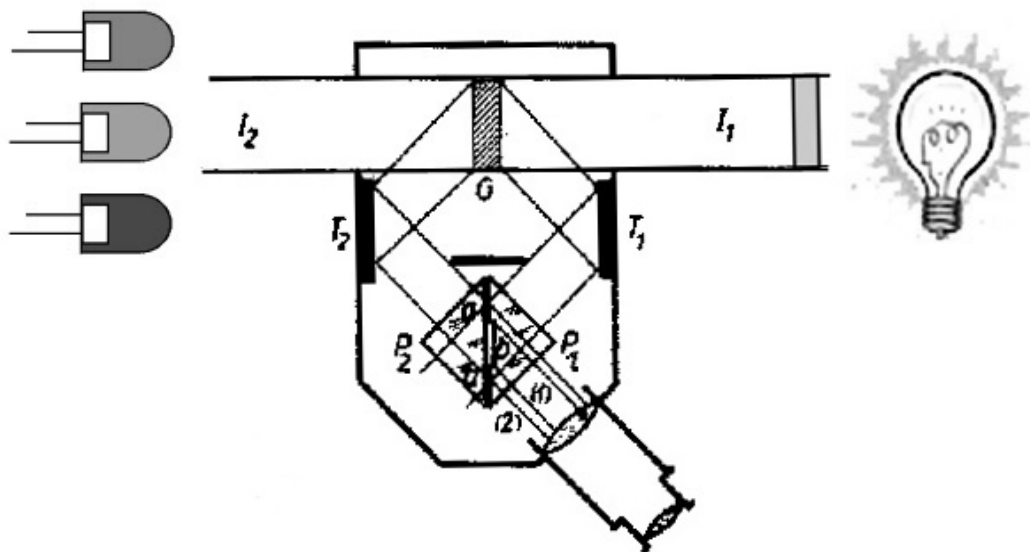


16. ábra. Világító diódákkal végzett előkísérlet eredményei a CIE x,y színinger-diagramban. Az öt mérőszemély által beállított színingerek átlagainak színpontjait a PC alap-színingerekkel kis körök, az NP alap-színingerekkel kis négyzetek jelölik. Az telt kör és telt négyzet a PC és NP alap-színingerekkel végzett összes kísérlet átlagának, a "+" jel a referencia kompakt fluoreszcens fényforrás színpontja

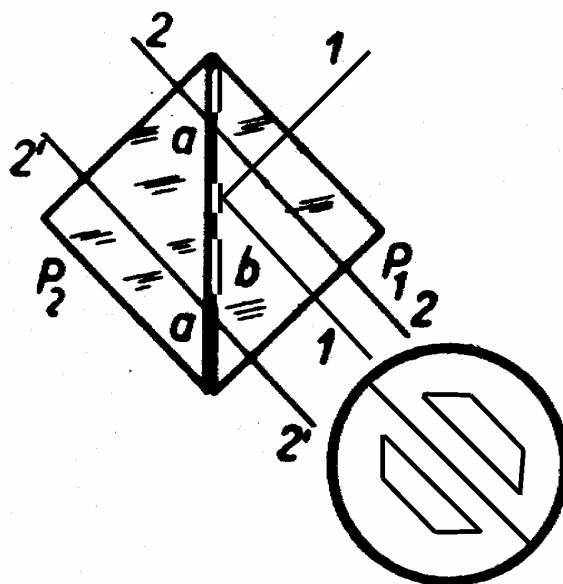
5.3.2 Vizuális színingermérő készülék: átalakított Lummer – Brodhun féle fotométer

A nagyobb megbízhatóság érdekében Lummer – Brodhun féle vizuális fotométert [72] alakítottunk át vizuális színingermérő készülékké (17. ábra). Ebben az összehasonlítható fényforrások (I_1 és I_2) fénye a G gipszlemez két oldaláról diffúz visszaverődés útján a T_1 , T_2 tükrök közvetítésével a fotométer-kockába jut (18. ábra), mely két, átlós felületük mentén szorosan illeszkedő üvegprizmából áll. Ahol a felületek szorosan érintkeznek a sima felületen (a) át a T_2 tükörről érkező sugárzás (2) jut a távcsőbe. Az érintkező felületek között kialakított bemélyedések (b) levegőrétegéről a sugárzás teljesen visszaverődik, így innen a távcsőben kirajzolódó látómezőre (fotométer-mezőre) a T_1 tükörről érkező sugárzás (1) jut.

A fotométer nyílásaihoz két fémtubust illesztettünk, az egyik oldalon halogén izzólámpa ($T_{cp} = 3400$ K) szolgált referencia fényforrásként (a fényútba optikai szűrőt tettünk a színhőmérséklet növelésének céljából) a másik oldalon a három LED-et tartalmazó cserélhető fényforrás kapott helyet (19. -20. ábra). Ez utóbbiból kettőt készítettünk, egyet a PC, másikat az NP spektrális régióhoz tartozó alap-színingerekből. Ezek félérték-szélessége: 20 nm - 40 nm, emissziós maximumhelyei megfeleltek a vizsgálni kívánt spektrális tartományoknak: a PC régióban 470 nm, 536 nm és 601 nm az NP régióban 481 nm, 555 nm és 633 nm (21. ábra).



17. ábra. A vizuális színingermérő készülék optikai vázlata



18. ábra. A Brodhun – féle fotométerkockában a kettős prizma illeszkedő felületei határozzák meg a látómező alakját

Az alap-színingerek (22. ábra) intenzitását – a LED-ek áramát – egy kézi vezérlővel lehetett szabályozni. A LED-ek tápáramát egy többcsatornás digitális, HP 6626A típusú tápegység biztosította áramstabilizált üzemmódban.

A referencia és a LED-ekből összeállított fényforrások emissziós színeképét optikai padon összeállított mérőrendszer segítségével mértük. Az egyes LED-ek radiometriai és fotometriai mérésére a CIE két mérőgeometriát (átlagos LED intenzitás: "A" és "B") dolgozott ki [73]. LED csoportok (clusterek) mérése azonban még csak a szabványosítási törekvések között szerepel [74], a témában a CIE technikai bizottságot (TC 2-50 Measurement of the Optical Properties of LED Clusters and Arrays) [75] állított fel.

A 4. fejezetben és a II. mellékletben bemutatott Ocean Optics S2000 típusú CCD detektoros spektrométerrel végeztünk spektrális méréseket a 380 nm - 780 nm hullámhossz - tartományban, 1 nm lépésköze interpolált értékekkel számítottuk a színinger-összetevőket a CIE 1931 színingermérő észlelő segítségével. Az optikai kábel bemenetéhez illesztett, diffúzorral ellátott tubust optikai padra szereltük. A mérőfejjel szemben foglalatot alakítottunk ki, mely a fotométer oldalához rögzített tubusról lecsatolt LED fényforrás rögzítésére szolgált.

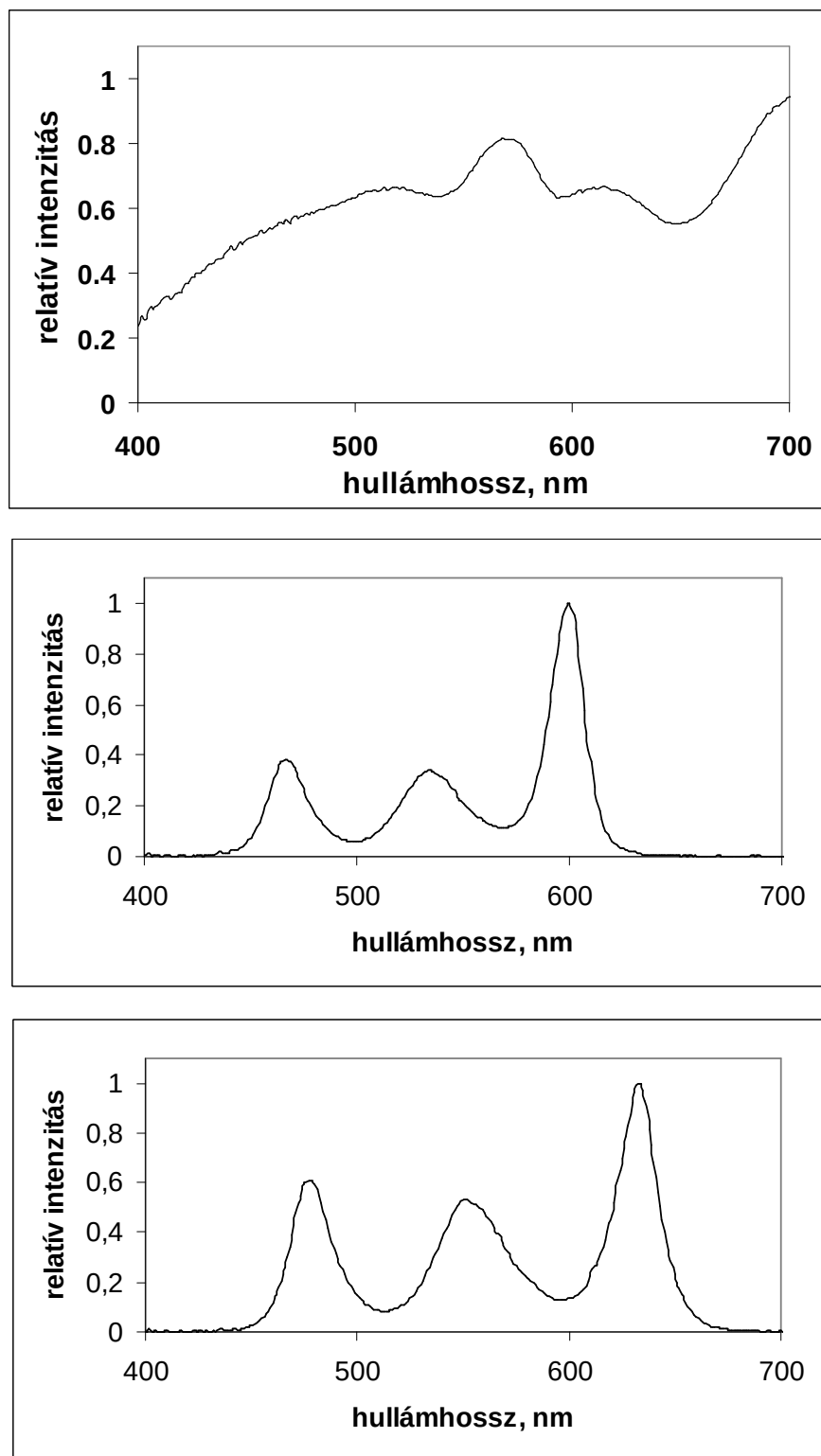


19. ábra. A felhasznált Brodhun-féle vizuális fotométer fényképe, a két fényforrás a készülék jobb és bal oldalához csatlakozó tubusokban kapott helyet

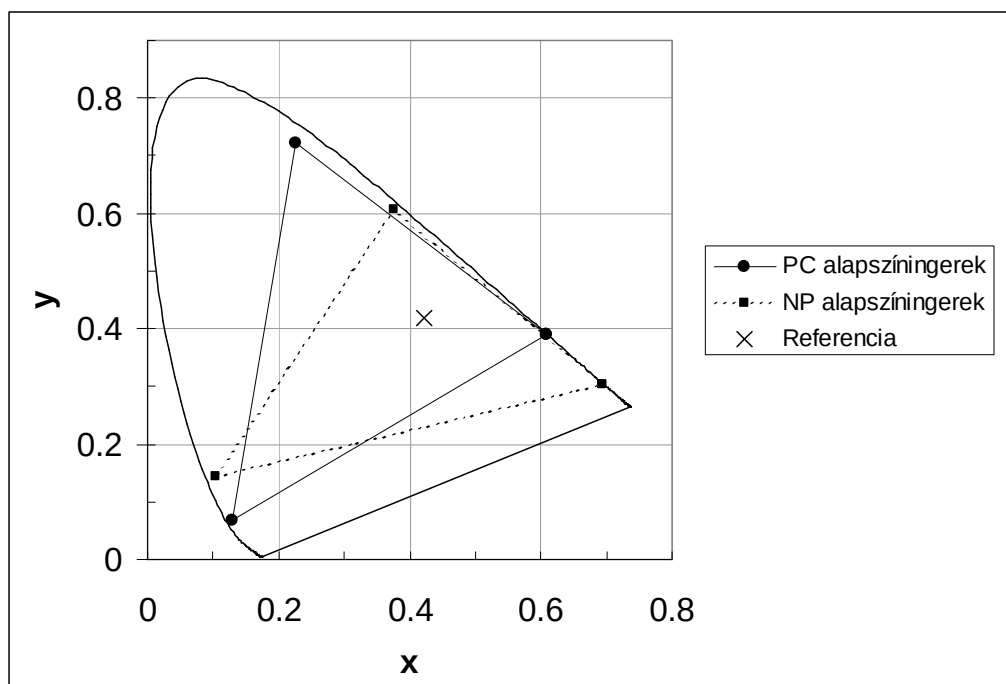


20. ábra. A készülék okulárjába fél szemmel nézve a mérőszemély összetett látómezőt figyel (csak a teszt-fényforrást kapcsoltuk be, így a kör alakú látómezőben az összehasonlítható területek egymás inverzei: a félkörben lévő trapéz a másik félkörrel egyező színű). A mérőszemély feladata az alapszíningerek intenzitásának beállítása, úgy, hogy a látómező részei közötti vizuális különbséget minimálisra csökkentse, ekkor egyenletesen fehér körlapot lát

Amint a mérőszemély beállította a vizuális egyezést, a LED fényforrást lecsatoltuk a fotométerhez szerelt tubusról, és a foglalatba helyeztük, így azonnal lemérhettük a beállított színinger emissziós színeképét. A teszt – fényforrás emissziós spektrumát is így határoztuk meg. Ez a mérési módszer megfelelő, mivel a fotométerkockában a sugárzás intenzitása és spektrális eloszlása elhanyagolható mértékben változik meg. A fém tubusokat belülről matt fekete bársonyfóliával béleltük, mely elnyeli a nem kívánt reflexiókból származó sugárzást.



21. ábra. A referencia (fent) és a vörös, zöld, kék LED alap-színingerekből összeállított fényforrások emissziós színképei. A LED-ek spektrális teljesítménye a PC (középen) és NP (lent) spektrális régiókban koncentrálódik



22. ábra. A PC (telt kör) és NP (telt négyzet) LED alap-színingerek, valamint a teszt-fényforrás színességi koordinátái az x,y színinger-diagramban

Ha az optikai elemek tulajdonságai a két oldalon megegyeznek, akkor a vizuális fotométer „szimmetrikus”: a gipszlemez, a síktükrök, és a prizmák mindkét fényútban egyformán módosítják a tubusokból érkező optikai sugárzást. Ebben az esetben két színinger vizuális egyezése akkor is fennáll, ha a két oldalon megcseréljük a színingereket létrehozó fényforrásokat. Így ellenőriztük a készülékben a fényutak optikai szimmetriáját: mérőszemélyekkel elvégeztünk egy kísérletet, majd az általuk vizuálisan egyezőnek ítélt fényforrásokat kicseréltük, a műveletet követően ítéletük nem változott. A látómező átlagos fénysűrűsége $16 \text{ cd/m}^2 (\pm 4\%)$ volt [76].

5.4 Mérőszemélyek

Tíz ép színlátó (3 Nő / 7 Ffi, életkoruk: 20 – 30 év, mindannyian egyetemi diákok, munkatársak) vett részt kísérletünkben, színlátásukat az Ishihara könyv ábráival és Nagel-anomaloscoppal ellenőriztük. A vizuális színingermérő készüléket sötét környezetben (sötét szobában) használták mérőszemélyeink, a háttér fénysűrűsége kb. 1 cd/m^2 volt. Megfigyelőink egyenként legalább 3 beállítást végeztek a PC, és az NP LED alap-színingerekkel. Az egyes beállítások közt tetszőleges mennyiségű pihenőidő állt rendelkezésükre.

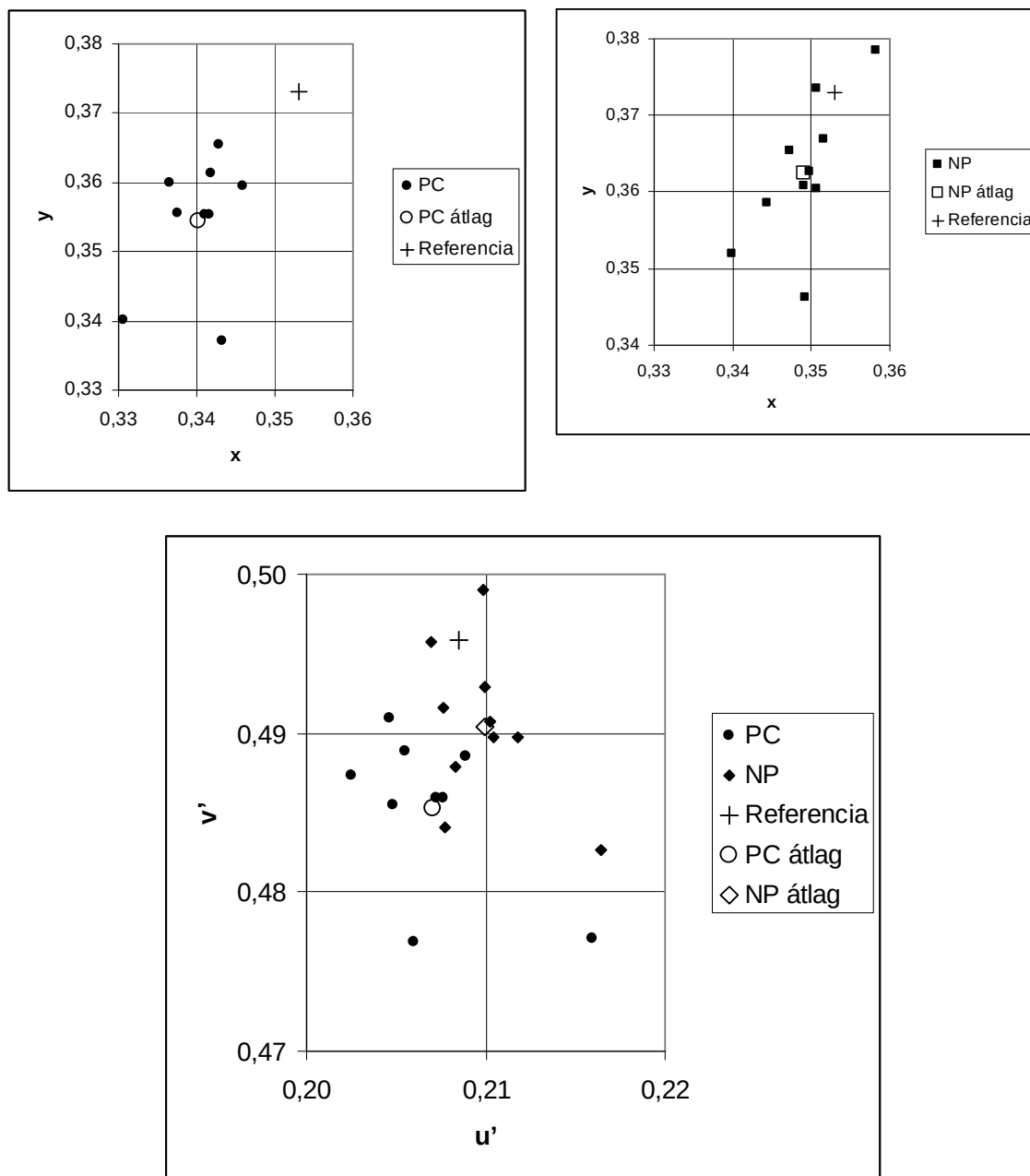
VI. táblázat. A színinger-megfeleltető vizuális kísérlet eredményei a PC és az NP alapszíninger-kombinációkkal. A tíz megfigyelő által a teszt-színingerrel vizuálisan egyezőnek beállított színingerek átlagai ($Y = 16 \text{ cd/m}^2 \pm 4\%$).

Megfigyelők	KB	KI	BP	OT	TD	GN	CS	CZ	TT	NA	ÁTLAG	SZÓRÁS
PC												
<i>x</i>	0,3306	0,3418	0,3376	-	0,3428	0,3364	0,3432	0,3411	0,3416	0,3458	0,3401	0,0046
<i>y</i>	0,3402	0,3613	0,3556	-	0,3655	0,3599	0,3370	0,3554	0,3553	0,3594	0,3544	0,0096
<i>u'</i>	0,2059	0,2056	0,2048	-	0,2046	0,2025	0,2159	0,2073	0,2077	0,2089	0,2070	0,0038
<i>v'</i>	0,4768	0,4888	0,4855	-	0,4909	0,4874	0,4771	0,4859	0,4860	0,4885	0,4852	0,0050

Megfigyelők	KB	KI	BP	OT	TD	GN	CS	CZ	TT	NA	ÁTLAG	SZÓRÁS
NP												
<i>x</i>	0,3490	0,3581	0,3472	0,3399	0,3497	0,3516	0,3493	0,3507	0,3444	0,3507	0,3491	0,0051
<i>y</i>	0,3609	0,3784	0,3654	0,3520	0,3628	0,3670	0,3462	0,3605	0,3586	0,3735	0,3625	0,0097
<i>u'</i>	0,2105	0,2099	0,2076	0,2077	0,2102	0,2099	0,2164	0,2118	0,2083	0,2069	0,2099	0,0028
<i>v'</i>	0,4897	0,4990	0,4916	0,4841	0,4907	0,4929	0,4826	0,4898	0,4879	0,4958	0,4904	0,0051

5.5 Eredmények

Világító diódák fény- és színingermérésénél gondot okozhat a spektrális teljesítmény-eloszlás hőmérsékletfüggése. Mivel a mérőszemély általában nem véletlenszerűen állítja be a vizuális



23. ábra. A színingermegfeleltető kísérlet eredményei a CIE x,y (felső két diagram) és a CIE u',v' (lent) színingerm-diagramokban. Az egyes mérőszemélyek által beállított színingerek átlagának színpontjait a PC alap-színingerekkel telt körök, az NP alap-színingerekkel telt négyzetek jelölik. Az üres kör és üres négyzet a PC és NP alap-színingerekkel végzett összes kísérlet átlagának, a "+" jel a teszt fényforrás színpontja

egyezt, hanem az egyre kisebb színínger-különbséget próbálja az észlelhetőség küszöbe alá csökkenteni, ezért a diódákon átfolyó áramot egyre kisebb mértékben változtatja. Miután a mérőszemély bejelentette a vizuális egyezést, a LED fényforrás színeképét 30 s-on belül lemértük, ilyen nagyságrendű időintervallumban a beállított színínger stabilnak bizonyult, a LED-összeállítás (cluster) foglalatának hőelvezetése megfelelő volt.

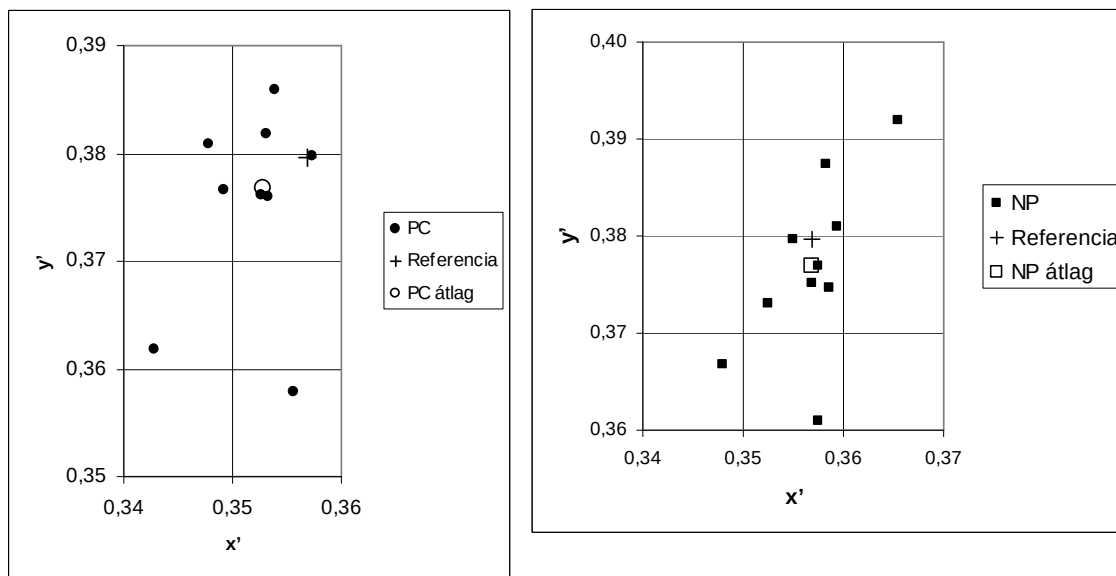
A LED-ek kis félérték-szélessége miatt nagy pontosságú spektrális mérésekre van szükség, e mérések hibája nagy eltérést eredményezhet a színínger-jellemzőkben. Muray és munkatársai [77] egy "körmérésben" hőmérséklet – stabilizált világító diódákat jutattak el nemzeti laboratóriumokba (pl. NIST, NPL), ahol nagy pontossággal kalibrált mérőeszközökkel határozták meg ezek spektrális teljesítmény-eloszlásait. A számított színínger-jellemzők eltérései esetenként meghaladták az észlelhető színekülönbség értékét.

A tíz mérőszeméllyel végzett kísérlet eredményei a 23. ábrán tekinthetők meg a CIE x,y ill. a CIE u',v' egyenletes színínger-diagramban. A referencia színpontja a CIE x,y diagramban (0,353; 0,373) a megfigyelők által beállított színínger színínger-koordinátáinak átlagai: PC (0,3401 ± 0,0046; 0,3544 ± 0,0096), NP (0,3491 ± 0,0051; 0,3625 ± 0,0097), az CIE u',v' színíngerdigaramban: PC (0,2070 ± 0,0038; 0,4852 ± 0,0050), NP (0,2099 ± 0,0028; 0,4904 ± 0,0051), a referencia színpontja (0,2085; 0,4958).

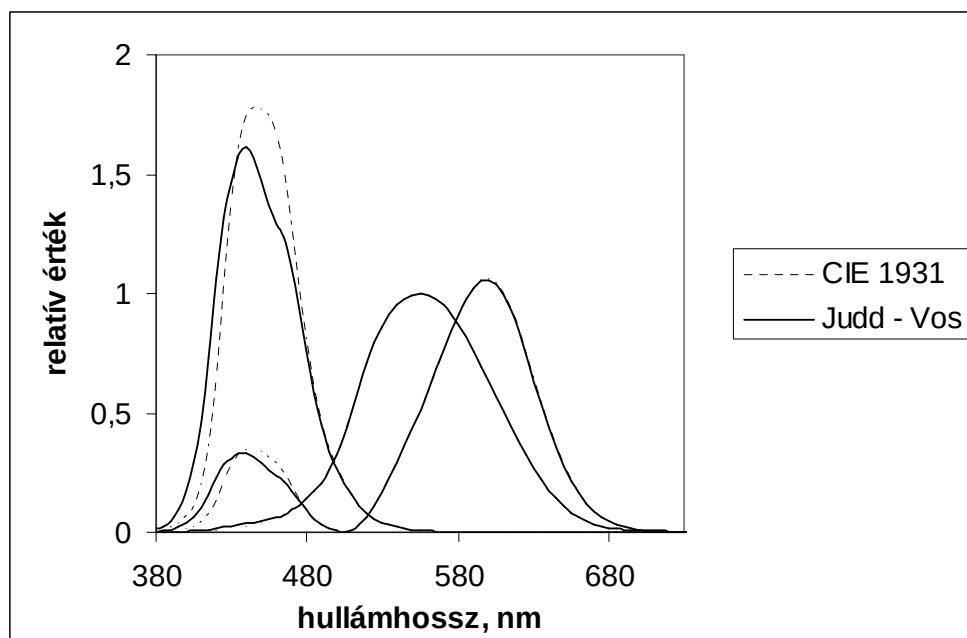
Mivel az NP és a PC alap-színíngerekkel végzett kísérletben nagy eltérést találtunk a referencia és a megfigyelők átlagos beállításának színességi koordinátái között, ezért megvizsgáltuk, jobb egyezést kapunk-e a színínger-diagramban, ha a színínger-jellemzőket a színíngermérő észlelő Judd-Vos féle módosításával számítjuk ki. Judd és Vos súlyfüggvényeivel [112] számolva a referencia x',y' színínger-koordinátái (0,3568; 0,3796), az egyes megfigyelők által beállított egyezések átlaga a PC alap-színíngerekkel: (0,3529 ± 0,0046; 0,3768 ± 0,0094) az NP alap-színíngerekkel: (0,3569 ± 0,0046; 0,3770 ± 0,0091). Az 24. ábrán látható, hogy az egyes megfigyelők átlagos beállításai és a teszt-színínger (referencia) színességi koordinátái közötti különbség kisebb, mint a CIE 1931 súlyfüggvényekkel számolva.

Az I. mellékletben tárgyalt Judd-Vos féle módosítások a CIE 2°-os színíngermérő függvények 500 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú tartományát érintik. Additív színínger-keverésnél világító diódák kék alap-színíngerének keskenysávú spektrális teljesítménye abban a szűk színeképtartományban koncentrálódik, amelyben nagy a szabványos észlelő és a módosított észlelő közötti különbség (25. ábra).

A színínger-összetevők kiszámításakor a fényforrások Y értékét 100-nak választottuk ($Y_{PC\ LED} = Y_{NP\ LED} = Y_{ref} = 100$), mivel a vizuális fotométerben a gipszlemez spektrális reflektanciája közel egységnyi, a mérőszemélyek fehér színíngereket észleltek [78]. Eredményeinket a CIELAB egyenlő közötti színíngertérben is megvizsgáltuk.



24. ábra. Tíz megfigyelő átlagos beállításának és a referencia színinger színességi koordinátái a Judd-Vos x',y' színinger-diagramban, a PC (bal oldalon) és az NP (jobb oldalon) alap-színingerekkel. A LED-ek additív színinger-keverékének spektrális teljesítmény-eloszlásait a Judd-Vos színinger-megfeleltető függvényekkel súlyoztuk



25. ábra. A CIE 1931 színinger-megfeleltető függvények és azok Judd-Vos által létrehozott módosítása

A CIELAB 1976 ($L^*a^*b^*$) színinger-különbségi formulát az ipari alkalmazások számára, reflexiós minták színinger-különbségének meghatározására dolgozták ki. A formula a referencia látási situációban érvényes, melyben a színmintákat szabványos D_{65} fényforrás világítja meg $L^* = 50$ szürke háttéren, a megvilágítás erőssége ≥ 1000 Lux [79], ezért az eredmények értékelésénél az VII. táblázatban ΔE^*_{ab} egységekben megadott színinger-különbségek csak közelítő értékeknek tekinthetők. Kísérleti jelleggel a Judd-Vos színinger megfeleltető függvényekkel kapott színinger összetevőkre is kiszámítottuk a CIELAB színinger-különbség értékeit. A 26. ábra a mérőszemélyek által beállított színingerek koordinátáinak eloszlását szemlélteti az a^* , b^* színességi diagramban és a Judd-Vos színinger-megfeleltető függvényekkel számított színinger-összetevőkkel kapott ($a_{\text{Judd-Vos}}^*$, $b_{\text{Judd-Vos}}^*$) diagramban.

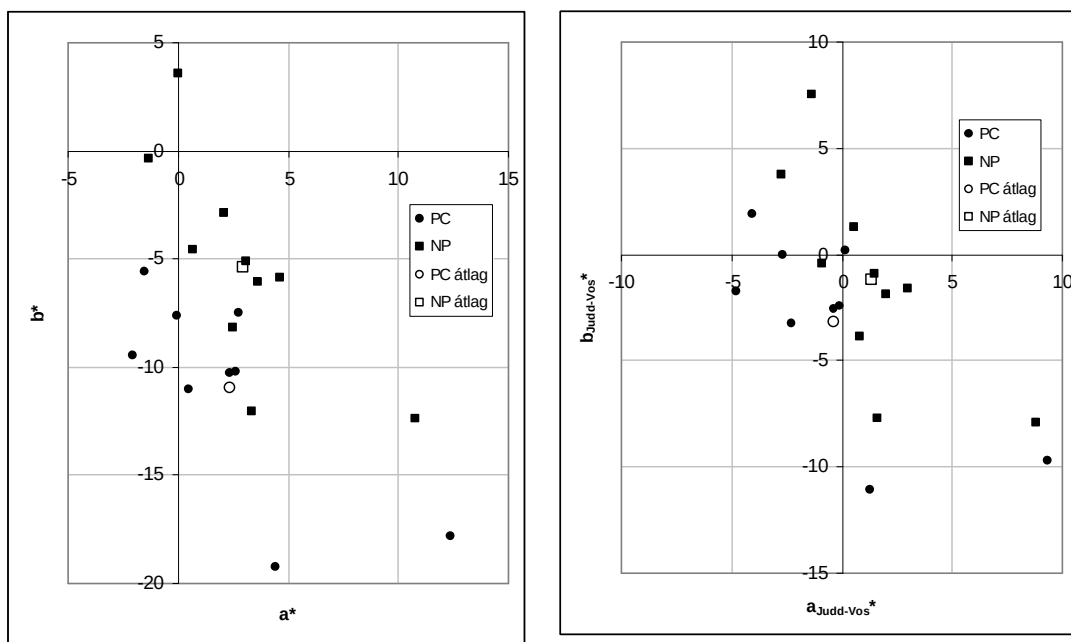
VII. táblázat. A mérőszemélyek által a PC és NP alap-színingerekkel beállított színingerek és a teszt fényforrás között számított CIELAB színinger-különbségek ΔE^*_{ab} egységekben. Az utolsó sorban az egyes megfigyelők PC és NP alap-színingerekkel végzett beállításai közti különbségek átlaga látható.

	PC	NP	PC _{Judd-Vos}	NP _{Judd-Vos}
Átlagos ΔE^*_{ab}	11.6	7.1	5.1	4.6
ΔE^*_{ab} szórása	5.4	4.5	4.4	3.5
Maximum ΔE^*_{ab}	21.7	16.4	13.5	11.8
A PC és NP beállítások különbségeinek átlaga	7.1		4.9	

A fenti táblázat adataiból látható, hogy előnyösebb a CIE 2° színinger-megfeleltető függvények Judd-Vos által módosított változatával kiszámítani a színinger-jellemzőket, ekkor a mérőszemélyek beállításai és a referencia színinger számított színinger-különbségének csökkenése mellett az eltérések mértéke azonos a PC és NP LED-ek használata esetén. A további elemzéshez a vizuális kísérletek eredményeinek kétszeres szórásával 95%-os konfidencia-ellipsziseket (2-dimenziós

VIII. táblázat. A táblázatban azt jelöltük, hogy a PC és NP alap-színingerekkel kapott eredményekhez tartozó 95%-os konfidencia-ellipszisek mely színinger diagramokban tartalmazzák (+) a teszt-színinger színpontját. Negatív esetben (-) a szabványos színingermérő észlelő és a valódi észlelők között szignifikáns az eltérés.

	CIE x,y	Judd-Vos x,y	CIE u^*, v^*	CIELAB a^*, b^*	Judd-Vos a^*, b^*
PC	-	+	-	-	+
NP	-	+	+	-	+



27. ábra. A PC és NP LED-ekkel végzett kísérlet eredményei az a^* , b^* (bal oldal) és a Judd-Vos színinger-megfeleltető függvényekkel számított színinger-összetevőkkel kapott $a_{Judd-Vos}^*$, $b_{Judd-Vos}^*$ szinességi diagramban (jobb oldal). A mérőszemélyek által beállított színingerek átlagának színpontjait a PC alap-színingerekkel kis körök, az NP alap-színingerekkel kis négyzetek jelölik. Az üres kör és négyzet a PC és NP alap-színingerekkel végzett összes kísérlet átlagának koordinátáit, az origó a referencia fényforrást jelöli

konfidencia intervallumokat) generáltunk az eredmények jellemzéséhez felhasznált színinger-diagramokban. Azt vizsgáltuk, hogy a konfidencia-tartomány tartalmazza-e a teszt-színinger színpontját az adott diagramban (ezt a VIII. táblázat foglalja össze a PC és NP alap-színingerekkel végzett kísérletekre vonatkozólag). Ellenkező esetben a szabványos észlelő és a valódi észlelők közötti eltérés szignifikáns.

A PC hullámhosszú alap-színingerekkel beállított vizuális egyezések nagyobb számított színinger-különbséget eredményeznek mint az NP régióba tartozó LED-ekkel végzett kísérletek. Ez ellentmond Thornton spektrális régiókra vonatkozó definíciójának.

Szignifikáns eltérés mutatkozott vizuálisan egyező metamer mintapárok a CIE 1931 2° színingermérő észlelővel számított színinger-jellemzői között. A Judd és Vos által módosított színinger-megfeleltető függvények használata esetén az eltérés nem szignifikáns.

5.6 Összefoglalás

Metamer színinger-megfeleltető kísérletünkben világító diódák (LED-ek) voltak az alapszíningerek, e keskenysávú fényforrások sugárzásának additív keverékét egy optikai szűrővel felszerelt izzólámpáéval egyeztették a megfigyelők. Két LED csoportot (fényforrást) használtunk, ezek spektrális teljesítménye a W. A. Thornton által definiált PC és NP hullámhosszakon koncentrált.

Eredményeinkből látható, hogy a CIE 1931 színingermérő észlelő eltérő pontossággal írja le a PC és NP alap-színingerekkel beállított vizuális egyezést. Az eltérések a színességi diagramban nem a Thornton által előre jelzett módon függnek az alapszíningerek spektrális teljesítmény-eloszlásától. Kísérleteinkben az PC alap-színingerekkel kapott eltérések meghaladták az NP alap-színingerekkel tapasztaltakat. Az eltérések a megfigyelők közötti szórás nagyságrendjébe esnek. A referencia színpontja a CIE u^* , v^* színinger-diagramban az NP alap-színingerekkel kapott színpontok tartományába, de a PC-vel kapottakon kívül esik.

Az CIE 1931 színingermérő észlelő Judd-Vos féle módosításával számolva kisebb különbségeket kaptunk metamer párok színingerjellemzői között. Eredményeink arra engednek következtetni, hogy a szabványos észlelő Judd-Vos féle módosítása világító diódák színingermérésében jobban képviseli a valódi észlelőket, mint az eredeti 1931-es színinger-megfeleltető függvények. A metamer színinger-megfeleltetésben nagy megfigyelők közötti szórás volt tapasztalható.

6 Diszkusszió

6.1 Eredményeink az irodalom tükrében

A két kísérletsorozatban szignifikáns eltéréseket figyelhettünk meg a CIE 1931 színingermérő észlelővel számított színinger-jellemzőkben, nagy megfigyelők közötti szórást tapasztaltunk. Az eltérések egyik oka, hogy ép színlátók színinger - egyeztetési tulajdonságai személyenként kis mértékben eltérőek lehetnek. A színinger-megfeleltetés pontosságát az észlelő egyéni sajátosságai és vizuális rendszerének állapota is befolyásolják. A főbb módosulatok kialakulásának mikrobiológiai okai vannak, ezek előfordulása genetikai módszerekkel megjósolható [80].

Kuehni [81] szerint Thornton nyolc mérőszemélye [36] között a különbségeket felnagyítja, hogy a metamer színinger-megfeleltetésben közel monokromatikus alap-színingereket használt. Elméleti kísérletben igazolta, hogy ha a vizsgált monokromatikus színinger spektrális teljesítménye a színinger-megfeleltető függvény maximumhelyének közelében koncentrálódik, akkor annak az ordinátatengellyel párhuzamos kis mértékű eltolására keveset változik a súlyozott érték. Ha azonban a függvény deriváltja a színinger hullámhossz-értékén nagy, akkor a súlyozott érték is jobban eltér, erősebb metameria esetén a hatás is felerősödik.

Az additivitás teljesülése mellett is okozhatnak az észlelők színinger-megfeleltető függvényei közti különbségek számottevő eltéréseket a színinger-jellemzőkben. Ezquerro és munkatársai [82] olyan spektrális teljesítmény-eloszlásokat generáltak, melyek metamerek a CIE 1931 színingermérő észlelő számára, a kapott színességi koordinátákat egy referencia koordináta-rendszerben vetették össze több kísérletben meghatározott észlelő színinger-koordinátaival, nagy különbségeket találtak.

Viénot [83] tíz mérőszeméllyel végzett színinger-megfeleltetési kísérletet PC hullámhosszú alap-színingerekkel (466 nm, 525 nm, 627 nm) fotopos fénysűrűségi szinten, 10°-os látómezővel, a rövid hullámhosszúságú tartományban a Stiles-Burch függvények meghatározásakor tapasztaltaknál nagyobb megfigyelők közötti szórást kapott.

Ábrahám és munkatársai [84] Maxwell módszerével végeztek nagy látószögű vizuális kísérleteket a PC és AP spektrális régióba tartozó alap-színingerekkel (melyeket halogén töltésű izzók és 10-15 nm sáv szélességű interferenciás optikai szűrők segítségével állítottak elő). A CIE x,y színességi diagramban a referencia színpontja az AP alap-színingerekkel kapott eredmények tartományán belül, de a PC-vel kapottakon kívül esett. A 32 mérőszemély fiatal és az idősebb korcsoportjának átlagos színinger-koordinátái között különbséget találtak az AP alap-színingerekkel végzett kísérletekben, a PC alap-színingerekkel ezt nem tapasztalták. Az eltérést okozhatja, hogy a

szemlencse az életkor előrehaladtával egyre több fényt nyel el a színek rövid hullámhosszúságú tartományában ("sárgul") [85].

Oleari [86] megállapította, hogy a 2°-os és 10°-os szabványos észlelők között a pre-retinális réteg felelős az eltérésért. Vos színinger-megfeleltető függvényeinek optikai szűrővel vett korrekciója ekvivalens a 10°-os CIE észlelővel, ha az optikai szűrő transzmissziója megfelel a macula lutea pigmentrétegének. Módszerével modellezhetők az észlelők közti spektrális eltérések.

A 2°-nál nagyobb látószög esetén a pálcikák működésbe lépése torzító hatással van a színinger-egyeztetésre. Shapiro és munkatársai [87] szerint bár metamer párok fotopos színingerjellemzői megegyeznek, általában különböző a scotopos fénysűrűségük. Az állandó scotopos fénysűrűségi vonalak segítségével megmutatható, hogy a színességi diagram mely tartományaiban kell számolni a pálcikák okozta mellékhatással, ha világító diódákat vagy katódsugár-csöves monitor fényporait használják alap-színingereként a trikromatikus additív színinger-keverésben.

Thornton kis számú észlelővel folytatott vizuális kísérleteiben a tapasztalt eltérések (esetenként $\Delta E_{ab}^* > 50$) jóval meghaladják az irodalomban korábban közöltekét; nem tűnik elégséges magyarázatnak alacsony fénysűrűségi szinten a pálcikák közreműködése, vagy hogy az öregedéssel együtt jár a szemlencse spektrális transzmissziós tulajdonságainak megváltozása.

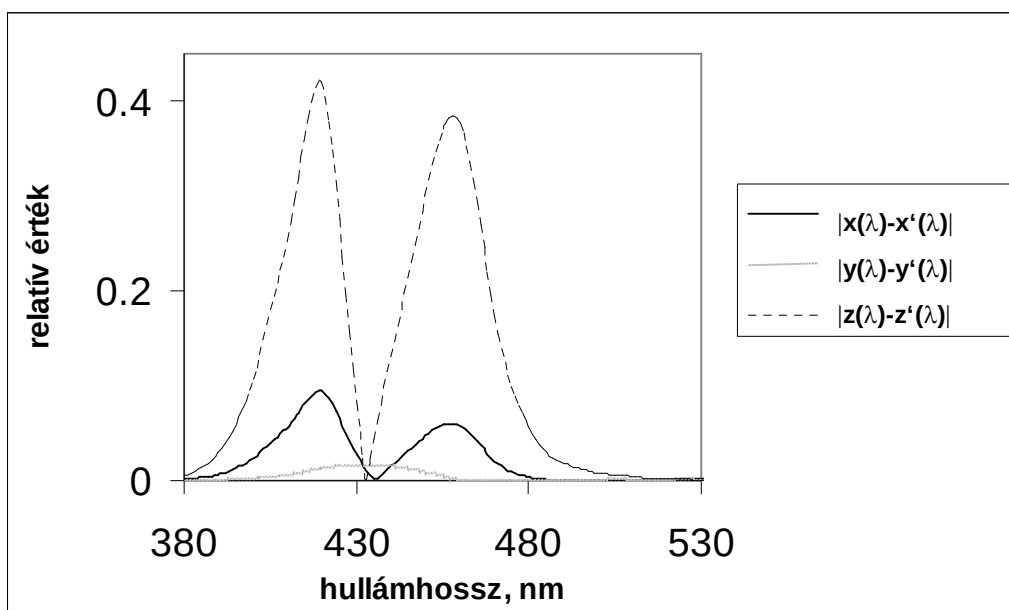
IX. táblázat. Színinger-megfeleltető kísérletek és függvények jellemző hullámhossz-értékei.

Wright alap-színingerek	460 nm	530 nm	650 nm
Guild alap-színingerek	460 nm	548 nm	630 nm
CIE RGB alap-színingerek	435,8 nm	546,1 nm	700 nm
CIE 1931 színinger-megfeleltető függvények maximumhelyei	446 nm	555 nm	599 nm
CIE 1964 színinger-megfeleltető függvények maximumhelyei	445 nm	557 nm	596 nm
Stiles és Burch (1955) alap-színingerek	444,44 nm	526,32 nm	645,16 nm
Receptorok érzékenységeinek maximumhelyei (Stockman-Sharpe)	442 nm	543 nm	570 nm

"Klasszikus" színinger-megfeleltető kísérletek alap-színingereinek jellemző hullámhossz-értékeit mutatja be a IX. táblázat. Egyik alap-színinger hármas sem tartozik egyértelműen a PC régióba, még a kutatási célokra is alkalmasnak tartott Stiles-Burch színingermérő függvényekhez tartozó sem. A CIE RGB színingermérő rendszer kék alap-színingerének hullámhossza lényegesen eltér Wright és Guild rövid hullámhosszú alap-színingereitől.

Shaw és Fairchild [88] metamer színinger megfeleltetési kísérletek adatbázisát felhasználva különböző súlyfüggvényekkel (színinger-megfeleltető függvények és receptor érzékenységi görbék) számolták vizuálisan egyező mintapárok színingerjellemzőit. Optimális súlyfüggvényekkel minimális a tri-situlusos értékek átlagos eltérése, a közös koordináta-rendszerbe transzformált súlyfüggvények értékeléséhez a CIELAB ΔE_{ab}^* színinger-különbségi formulát használták. A 2°-os szabványos észlelővel kapták a legnagyobb átlagos eltérést ($\Delta E_{ab}^* = 4,56$) de az adatbázisra optimalizált mesterséges súlyfüggvényekkel elérhető minimális átlagos színinger-különbség sem csökkent $\Delta E_{ab}^* = 3,92$ alá.

Világító diódákkal végzett vizuális kísérletünk eredményei arra engednek következtetni, hogy a szabványos észlelő Judd-Vos féle módosítása jobban képviseli a valódi észlelőket, mint az eredeti 1931-es színinger-megfeleltető függvények. A Judd-Vos módosítás azonban épp ellenkezőleg befolyásolja eredményeinket, mint az Thornton elméletéből következik. A módosítások csak az 500 nm alatti hullámhossztartományt érintik, ezért additív színingerkeverés esetén csak a kék alap-színingerre hatnak. A két észlelő súlyfüggvényei közötti különbség maximumhelyei 420 nm és 460 nm, az NP és AP régiókban az észlelők közötti differencia egyre kisebb (28. ábra). Az észlelők közötti különbség a PC hullámhosszakon a legnagyobb, 460 nm-től az NP és AP régió felé haladva monoton csökken.

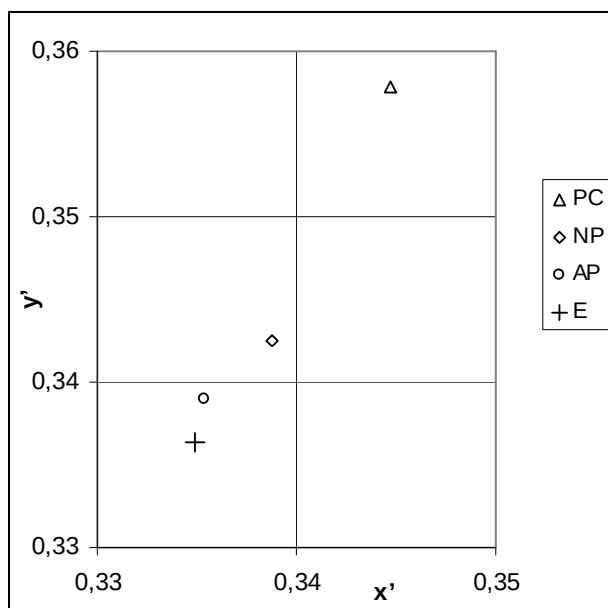


28. ábra. A CIE 1931 színinger-megfeleltető függvények és azok Judd-Vos módosítása közti különbség abszolút értékei

Egyszerű szimulációval is megmutatható, hogy a két észlelő összehasonlításánál a legnagyobb eltéréseket a PC tartományban tapasztalhatjuk. Három, az ekviennergetikusával megegyező színességi koordinátájú ($x = 1/3$; $y = 1/3$) sugárzáseloszlást generáltunk a PC NP és AP régiókat jellemző hullámhosszú monokromatikus sugárzások segítségével. Ezen eloszlásokból Judd-Vos súlyfüggvényeinek felhasználásával x', y' színességi koordinátákat számítottuk ki, ezeket mutatja be a 29. ábra és a X. táblázat.

X. táblázat. Thornton spektrális régióit jellemző monokromatikus alap-színingerek keverékének és az egyenlő energiájú színinger CIE x, y és Judd-Vos x', y' színességi koordinátái.

CIE 1931	PC	NP	AP	E
x	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333
y	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333
Judd-Vos				
x'	0,3447	0,3388	0,3354	0,3349
y'	0,3578	0,3425	0,3389	0,3364



29. ábra. Thornton spektrális régióit jellemző monokromatikus alap-színingerek keverékeinek (PC: háromszög, NP: rombusz, AP: kör) és az egyenlő energiájú színinger (+ jel) színességi koordinátái a módosított Judd-Vos x', y' színinger-diagramban. Az ábrázolt színingerek CIE x, y színességi koordinátái: $x = 0,3333$, $y = 0,3333$

Szélessávú eloszlásoknál kisebb hatása van a színinger-megfeleltető függvények eltéréseinek: az egyenlő energiájú színinger színességi koordinátáit csak harmadik tizedes jegyben változtatja meg a módosított észlelő használata.

Az általunk mért megfigyelők közötti eltérések összhangban vannak az irodalomban Thornton kutatásait megelőzően tapasztaltakkal. Világító diódákkal végzett kísérletünkben tapasztalt eltérések korrigálhatók az CIE 1931 színingermérő észlelő Judd-Vos féle módosításának használatával.

6.2 A színingermérő észlelők megújításának lehetséges szempontjai

A CIE XYZ ill. x, y, Y színingertér nem egyenletes, az észleleti dimenziókat figyelmen kívül hagyja, színingerek szubjektív jellemzésére közelítőleg sem alkalmazható [89]. Több szempontból is felmerülhet az igény az észlelő megváltoztatására, hogy az megfeleljen a kutatás és az ipar egyre bővülő elvárásainak. Szükség van-e például arra, hogy az $\bar{x}(\lambda)$ függvénynek két maximumhelye legyen? Létrehozható a 2°-os színinger-megfeleltető függvényekből lineáris transzformációval egy maximumhelyű (unimodális) súlyfüggvényekből álló észlelő, de ezt az új függvények görbe alatti területének nagy átfedése miatt csak a jel-zaj viszony rovására lehet megtenni [90].

Kétségtelen előnyökkel bír egy fiziológiailag plauzibilis színingermérő rendszer, amely a receptor spektrális érzékenységi görbének ($L(\lambda)$, $M(\lambda)$, $S(\lambda)$) megfelelő színinger-megfeleltető függvényekre épül. Színmegjelenési modellekben első lépés a színinger-összetevők csap-jelekké transzformálása, ez elengedhetetlen a színi áthangolódás modellezéséhez, az észleleti dimenziók meghatározásához.

Kuehni [91] megmutatta, hogy a CIE 1931 színingermérő észlelőből lineáris transzformációval kapott Smith-Pokorny receptor érzékenységi görbéit közelítő súlyfüggvényekre alapozva észleletileg egyenletes színingertér nyerhető.

A színlátás matematikai modelljén alapuló színrendszerben (pl. PDT színrendszer [92]) a receptorok spektrális érzékenységi függvényei egzakt matematikai alakban megadhatók, viszonylag egyszerűbb modellezni az átlagostól eltérő színlátást (színtévesztést). A színlátás-rendellenességek a modellben csak a paraméterekben különböznek, (pl. dikromátok esetén az egyik színinger-összetevő értéke zérus) [93].

A CIE 1-36 technikai bizottságának (TC 1-36 Fundamental Chromaticity Diagram with Physiologically Significant Axes) feladata, hogy a látómező folytonos függvényeként az $[1^\circ - 10^\circ]$ tartományban kiegészítő színingermérő észlelőt alkosson, mely az emberi színlátás fiziológiájára épül. Ezt Stiles és Burch 1959-ben meghatározott spektrális érzékenységi görbéit (lásd az I. mellékletet) alapul véve határozzák meg. Függvényparaméterként a macula lutea pigmentréteg, a pre-retinális közeg (pl. szemlencse), és a fotopigment optikai denzitása, valamint az észlelő életkora adható meg. A 2°-os és 10°-os látómezőkhöz két paraméterhalmaz tartozik. A $V(\lambda)$ spektrális fényhatásfok

függvény az $L(\lambda)$ és $M(\lambda)$ színinger-megfeleltető függvények, a fénysűrűség értéke az L és M színinger-összetevők súlyozott összegeként áll elő [94].

Megállapítható, hogy a CIE 1931 színingermérő észlelőt alkalmasabbá lehet tenni a gyakorlati és kísérleti színingermérés számára. Új, az eddigit helyettesítő szabványos észlelő létrehozását azonban szerintünk csak az előnyök indokolnák, a már meglévő rendszer hiányosságai korrigálhatók.

7 Összefoglalás

Kutatási tevékenységem célja az volt, hogy felderítsem a CIE 1931 2° színingermérő észlelőben rejlő esetleges szisztematikus hibákat és azok okait. A közelmúltban az eddig tapasztaltaknál nagyobb eltéréseket találtak színinger-megfeleltetési kísérletekben vizuálisan egyező metamer színinger-párok számított színinger-jellemzőiben. Az eltérések feltételezett oka, hogy a színek egy-egy tartományaiban a színingermérő észlelő eltérő megbízhatósággal működik, ezért megkérdőjeleződik használhatósága informatikai alkalmazásokban. Két, az informatikai alkalmazások szempontjából fontos területen teszteltem a 2°-os szabványos észlelőt, az additív színinger-keverésen alapuló metamer színinger-megfeleltetési kísérlet-sorozatokat végeztem.

Az első sorozatban katódsugárcsöves monitor fényporai voltak az alap-színingerek, egyenletesen kivilágított, a Munsell színatlaszból választott mintákkal vizuálisan egyező színingert kellett a mérőszemélyeknek beállítani. A képernyőn megjelenített és a nyomtatott dokumentum összehasonlítása a színmenedzsment kritikus lépése – ezt a situációt modellezi a kísérleti összeállítás. A metamer színinger-megfeleltetés során nagy eltéréseket találtunk vizuálisan egyező színinger-párok számított színinger-jellemzőiben, ez azonban nem volt szisztematikus. Az eredmények nagy megfigyelők közötti szórása arra figyelmeztet, hogy az eltéréseket színmegjelenési modellek összehasonlításánál, értékelésénél figyelembe kell venni, nem célszerű kisebb színinger-különbségekkel foglalkozni.

A második kísérlet-sorozatban világító diódákat használtam fel, vörös, kék és zöld LED-ekből két csoportot állítottam össze; az egyik csoport spektrális teljesítménye a PC, a másiké az NP "spektrális régiókban" koncentrálódott. Egy – egy csoport additív keverékének fényét egyeztették a mérőszemélyek egy optikai szűrővel felszerelt izzólámpa fényével Brodhun-féle vizuális fotométerben. Az informatikában két területet érint ez a vizsgálat: képbeviteli egységek és a reflexiós minták színinger-mérésére használt mérőeszközök tartalmazhatnak világító diódákat. Eredményeinkből kitűnik, hogy a színingermérő észlelő pontossága csökken erősen metamer színingerek összehasonlítása esetén. Az általunk mért megfigyelők közötti különbségek összhangban vannak az irodalomban eddig tapasztaltakkal, a mérőszemélyek által beállított színingerek színességi koordinátáinak kismértékű eltérése a referencia színességi koordinátáitól korrigálható az 1931 CIE színingermérő észlelő Judd-Vos féle módosításának használatával.

Megállapítható, hogy a látható színek tartomány PC, NP és AP spektrális régiókra osztásának koncepciója nem egyértelmű a CIE 1931 színingermérő észlelő használhatóságának szempontjából.

A szabványos észlelő lecserélése gyakorlati és kísérleti szempontból kedvező lehet, de a kísérleteinkben tapasztalt eltérések alapján csak annak korrekciója indokolt.

8 Tézisek

1. Kísérletileg igazoltam, hogy a korrelált színhőmérséklet definíciójának vizuális jelentése – mérőszemélyek ítéletére alapozva – nem igazolható, értékének meghatározása bizonytalan. A korrelált színhőmérséklet értékének vizuális vizsgálatokra való visszavezetését el kell vetni, a definíciót a CIE 1960 u,v színíngerdigramban való meghatározásra kell alapozni.
2. Kísérletileg megmutattam, hogy a CIE 1931 színíngermérő észlelő pontossága csökken erősen metamer színíngerek összehasonlítása esetén. A metamer színínger-megfeleltetés során szignifikáns eltéréseket találtam vizuálisan egyező színínger-párok számított színínger-jellemzőiben, de ezek nem haladták meg az irodalomban korábban tapasztaltakat. A kísérletekben tapasztalt eltérések alapján javaslom e különbségek színmegjelenési modellek összehasonlításánál, értékelésénél figyelembe vételét. Mivel a metamer színínger-megfeleltetés is $3-10 \Delta E_{ab}^*$ egységnyi színínger-különbséget eredményezhet, nem célravezető $1-3 \Delta E_{ab}^*$ egységnek megfelelő színínger-különbségek elemzésével foglalkozni olyan összetett modellek esetén, melyek bemeneti értékei metamer színíngerek színínger-összetevői.
3. W. A. Thornton és munkatársai szerint a Prime Color (PC), Non-Prime (NP) és Anti-Prime (AP) olyan halmazok a színek rövid közepes és hosszú hullámhosszú tartományában, melyekben ha közel monokromatikus alap-színínger hármasok spektrális teljesítménye összpontosul, akkor az alap-színíngerekkel végzett metamer színínger-megfeleltetésben a vizuálisan egyező metamer párok számított színínger-jellemzői eltérésének nagysága az adott halmazra jellemző ($PC < NP < AP$). Kísérletileg megmutattam, hogy a látható színek tartomány PC, NP és AP spektrális régiókra osztásának koncepciója ellentmondásos a CIE 1931 színíngermérő észlelő használhatóságának szempontjából.
4. Rámutattam, hogy új szabványos észlelő létrehozása a gyakorlati színíngermérés és a kutatás szempontjából kedvező lehet, de a CIE 1931 színíngermérő észlelő lecserélését a világító diódák és katódsugárcsöves monitorok felhasználásával végzett kísérleteimben tapasztaltak nem indokolják. Az 500 nm alatti hullámhossztartományban világító diódák és keskeny emissziós sávokból összetett színekű színíngerek esetén a szabványos észlelő Judd - Vos által módosított változatának használatát javaslom, kimutattam, hogy ez pontosabban modellezi a valódi észlelőket a rövid hullámhosszú színek tartományban.

9 Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom mindazoknak, akik segítették munkámat:

Dr. Schanda János témavezetőmnek, a Veszprémi Egyetem Képfeldolgozás és Neuroszámítógépek Tanszék professzorának, a munkám során nyújtott szakmai és emberi útmutatásért, kritikáért és bizalomért.

Munka - és irodatársamnak, **Dr. Kráncz Baláznak** szellemes és építő megjegyzéseiért.

Kollegáimnak és **mérőszemélyeimnek**, akik fegyelmezett kísérleti alanyok voltak, időt és fáradságot nem sajnálva hozzájárultak az eredmények megszületéséhez.

Szüleimnek, iskolaéveim alatt tanúsított támogatásukért és türelmükért.

I. MELLÉKLET: A CIE színingermérő rendszer

Egy színinger jellemzéséhez három mennyiség szükséges. A trikromatikus színingermérő rendszer három megfelelően választott alap-színinger additív színinger-keverésén alapul, ezek alapszíninger-jellemzőivel bármely színinger színingerjellemzői meghatározhatók. Tetszőleges alapszíninger-hármaszt választhatunk, csak arra kell ügyelni, hogy azok egymástól függetlenek legyenek [95], általában vörös, zöld és kék színingereket alkalmaznak az additív színinger-keveréshez. A színingermérő függvények adják meg, hogy az ekvienti energetikus spektrum monokromatikus színingereivel való vizuális egyezéshez az alap-színingerekből mekkora mennyiség szükséges.

Elsőként Maxwell (1860) határozott meg ilyen függvényeket. Trikromatikus színingermérő készülékében vörös, zöld és kék alap-színingerek additív keverékét lehetett a vizsgált színingerrel egyformának látszóvá tenni. Később König (1892) és Abney (1895) kísérleti eredményeinek átlagából hozta létre az Optical Society of America az első szabványos színingermérő függvényeket ("excitation curves") 1922-ben [96].

Additív színingerkeverés

Az additív színingerkeverés folyamata a szem optikai közegében és a retinán játszódik le. Többféleképpen előidézhethetjük: egyidejűleg egy helyre több színes fényt vetítünk, vagy nagy frekvenciával (> 50 Hz) felváltva cserélgetjük a színingereket, vagy a szem felbontóképességénél kisebb színelemeket helyezünk egymás mellé.

Az additív színingerkeverés tulajdonságait Grassmann empirikus törvényei írják le [97]:

1. A színingerek megfeleltetésének jellemzésére három egymástól független változó szükséges és elegendő.
2. Az additív színingerkeveréskor csak a színingerek színinger-összetevői számítanak, és nem a színingerek spektrális összetétele.
3. Ha a színingerek additív színinger-keverésében egy vagy több összetevő színingert folyamatosan változtatják, akkor a keletkező színinger-összetevők is folyamatosan változnak.

Színingeregyenlet

Trikromatikus színingermérő rendszerben a színinger – összetevők jelölik a három alap-színinger szükséges mennyiségeit, melyekkel additív színinger-keverékük egy adott színingerrel egyformának látszóvá tehető. A színingeregyenlet két színinger egyformává tételének algebrai leírása:

$$C[C] = R[R] + G[G] + B[B]$$

Ahol $\equiv$ a vizuális egyezést jelöli, a „megfelel” szóval fejezzük ki, $[R]$, $[G]$, $[B]$ és $[C]$ meghatározott színingerek, az R , G , B és C valós együtthatók pedig az ezekből vett mennyiségeket színinger-összetevőknek, vagy tristimulusos értékeknek nevezzük. A színingeregyenlet ezen általánosan használt alakjában a ' C ' együtthatót tulajdonképpen nem értelmezzük, hiszen a $[C]$ színingert vizsgáljuk, $C = 1$ [98]. A fentiekből következik, hogy az additív színinger-keverésben a keverék az alap-színingerek lineáris kombinációja.

Grassmann kvalitatív törvényeinek megfelelően az additív színinger-keverés esetén fennáll a szimmetria, disztributivitás, additivitás és proporcionalitás; kvantitatív összefüggésekben felírható a trikromatikus általánosítás erős formája [99]:

- szimmetria: ha $[A] \equiv [B]$, akkor $[B] \equiv [A]$;
- tranzitivitás: ha $[A] \equiv [B]$ és $[B] \equiv [C]$, akkor $[A] \equiv [C]$;
- proporcionalitás: ha $[A] \equiv [B]$, akkor $a[A] \equiv a[B]$;
- additivitás: ha $[A] \equiv [B]$, $[C] \equiv [D]$ és $([A]+[C]) \equiv ([B]+[D])$, akkor $([A]+[D]) \equiv ([B]+[C])$.

Színinger – megfeleltetés

Az additív színinger-megfeleltetés esetében azzal a feltevessel élünk, hogy ha azonos látási szituációban két színingert azonosnak látunk (azonos színészleletet keltenek), akkor színinger-jellemzőik megegyeznek.

Vizuális kísérletekben tipikus a kör alakú, középen egy vonallal kettéosztott látómező, melynek egyik felében állandó, a másikban változtatható színinger látható. Ezek egyformává tétele ('megfeleltetése') a mérőszemély feladata. A vizuális egyezés akkor áll be, ha a mérőszemély a két mezőt egyformának látja – nem észlel színkülönbséget a kettő között.

Ha a vizsgálandó (referencia) sugárzásnak a látható színképtartomány különböző hullámhosszúságú monokromatikus sugárzását választjuk és minden egyes különböző hullámhosszúságú sugárzáshoz meghatározzuk, hogy a 3 összehasonlító sugárzásból (alap-színingerből) mekkora intenzitást kell venni ahhoz, hogy színegyezést tudjunk létrehozni, színinger-megfeleltető függvényeket kapunk [100].

E függvények azt fejezik ki, hogy az adott hullámhosszúságú sugárzáshoz az alap-színingerekből mekkora mennyiség kell egy megfigyelőnek a vizuális egyezés létrehozásához. Az additivitás és proporcionalitás törvényeinek teljesülése esetén az így meghatározott $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ színinger-megfeleltető függvények segítségével összetett színeképű, S_λ -sugárzáseloszlású színinger R , G , B színinger-összetevőit (tristimulusos értékeit) határozhatjuk meg:

$$R = k \int S_{\lambda} \bar{r}(\lambda) d\lambda, \quad G = k \int S_{\lambda} \bar{g}(\lambda) d\lambda, \quad B = k \int S_{\lambda} \bar{b}(\lambda) d\lambda,$$

ahol k alkalmasan választott együttható. Színinger-megfeleltető függvények előállításához az alábbiakban az additív színinger-megfeleltetés két kísérleti módszerét ismerhetjük meg.

Maxwell módszere

A kettéválasztott kör alakú látómező egyik felében szélessávú fehér sugárzást (Maxwell eredeti kísérletében napfényt), másik felében monokromatikus alapszíningerek keverékét látja a mérőszemély. A keverék mindhárom alap-színingerének intenzitását változtatva a megfigyelő vizuális megfeleltetést hozhat létre a fehér (referencia) mintával. Maxwell módszerével színinger-megfeleltető függvényeket úgy határozhatunk meg, ha először az alap-színingerekkel egyezővé tesszük a [W] fehér teszt-színingert:

$$R[R] + G[G] + B[B] = [W].$$

Ezt követően a megfelelő alapszíningert a vizsgálni kívánt $[\lambda]$ monokromatikus sugárzással cseréljük le, és újból beállítjuk az intenzitásokat az egyezéshez:

$$L[\lambda] + G'[G] + B'[B] = [W].$$

A fenti két egyenletből kifejezhetők $[\lambda]$ színinger tristumulusz értékei:

$$[\lambda] = (R/L) [R] + ((G - G') / L) [G] + ((B - B') / L) [B].$$

A "maximum telítettség" módszere

A XX. század elején egy új kísérleti technika kezdett elterjedni. Szintén közel monokromatikus alapszíningereket használtak fel az additív színinger-keveréshez, de a referencia is keskenysávú, "spektrumszín". Ez utóbbi hullámhosszát változtatva kapjuk a színinger-megfeleltető függvényeket. Additív színinger-keveréssel csak úgy lehet az alap-színingerektől különböző spektrumszínekkel vizuális egyezést létrehozni, ha az egyik alap-színingert a referenciát tartalmazó látómezőbe visszük át, a másik látómezőben a maradék két alapszíninger keveréke látható. Tegyük fel, hogy csak R mennyiségű vörös hozzáadásával lehet a [C] színingert a másik két alapszíninger keverékével egyformának látszóvá tenni. Az egyezést a színinger-egyenlettel így írhatjuk le:

$$R[R] + [C] \equiv G[G] + B[B]$$

Rendezve az egyenletet az $[R]$ alapszíningerhez negatív együtthatót kapunk:

$$[C] \equiv -R[R] + G[G] + B[B]$$

Ez a jelölés természetesen csak a színinger-megfeleltetés módszerére utal.

Maxwell módszerében az egyik mezőben folyamatosan a fehér referencia látható ezért a megfigyelő színi adaptációja állandó. Az egy mérőszeméllyel, és a két különböző módszerrel kapott színinger-megfeleltető függvényekben kis mértékű, szisztematikus eltéréseket találtak [101], emellett azt is tapasztalták, hogy a Maxwell módszerrel nagyobb a színinger-megfeleltetés bizonytalansága.

A CIE 1931 színingermérő észlelő

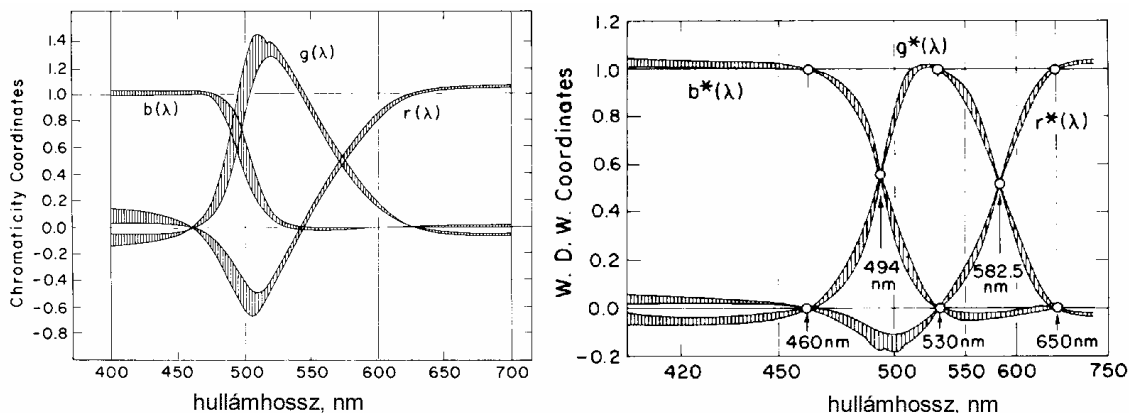
A CIE 1931 színingermérő észlelő az az ideális észlelő, akinek a színinger-megfeleltető tulajdonságai megegyeznek az $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ CIE színinger-megfeleltető függvényekkel [102]. Az észlelőt alkotó függvényeket a maximum telítettség módszerével határozták meg; W.D. Wright 10, J. Guild 7 mérőszemély bevonásával végzett színinger-megfeleltetési kísérleteket (30. ábra).

Wright és Guild kísérletei

Wright [103] 460 nm, 530 nm és 650 nm hullámhosszúságú alap-színingereket használt fel kísérleteiben. A fénysűrűségi együtthatókat úgy állította be, hogy a 650 nm-es és 530 nm-es alapszíningerekhez tartozó színinger-megfeleltető függvények (W.D.W. – koordinátáknak is nevezik) értékei egyenlők legyenek 582,5 nm-en (normalizációs hullámhossz érték), az 530 nm-hez és 460 nm-hez tartozók pedig 494 nm-en.

Wright így az okuláris közeg egyénenként eltérő spektrális transzmisszióját vette figyelembe, mely felelős lehet a mérőszemélyek színingermérő tulajdonságai közti kis különbségekért. A normalizációs hullámhosszokon ezek a különbségek minimálisak. Ezt követően villogásos (flicker) fotometriával (7 észlelő) valamint egy NPL standard fehér színminta és az alapszíningerek világosság-egyeztetésével (36 észlelő) határozta meg a fénysűrűségi tényezőket.

Guild [104] fehér fényforrás szélessávú sugárzásából optikai szűrővel erősen telített alap-színingereket hozott létre, melyek domináns hullámhosszai 460 nm, 548 nm és 630 nm voltak. Az alap-színingerek fénysűrűségi tényezőinek meghatározásánál Wright-hoz hasonlóan járt el [105].



30. ábra. Wright 10 észlelővel (jobb oldali diagram) és Guild 7 észlelővel (bal oldali diagram) meghatározott színingermérő függvényei; az alap-színingerekhez tartozó görbék vastagsága az egyes mérőszemélyek közötti eltérések mértékét jellemzi

Wright és Guild színingermérő függvényei összehasonlításához először ki kellett fejezni ezeket az NPL által definiált R, G, B alap-színingerek rendszerében. A 435,8 nm-es, 546,1 nm-es (higanygőz gázkisülő lámpa emissziós hullámhosszai) és 700 nm-es (interferenciás szűrővel állítható elő) hullámhosszúságú monokromatikus sugárzásokat választották [106]. Az additivitás és proporcionalitás teljesülése esetén egyik kísérlet alap-színingerei megadhatók a másik alapszíninger-hármas segítségével, így lineáris transzformációval át lehet térni az egységes R, G, B rendszerre. A két kísérletből származó, transzformált színinger-megfeleltető függvények között nem mutatkozott olyan eltérés, amely azok egyesítésének elfogadását megkérdőjelezte volna. A fénysűrűségi tényezőket úgy választották meg, hogy az $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ függvények görbe alatti területe egyenlő legyen, így ezek additív keveréke egyezik az ekvienti energetikus színingerral.

A CIE XYZ színingermérő rendszer megalkotása

A gyakorlati színingermérésre számítástechnikai szempontból alkalmasabb színingermérő függvényeket kellett találni. Az $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ színinger-megfeleltető függvények transzformációjához, a CIE követelményei alapján számították ki az új alap-színingereket:

1. Minden létező színingert elő lehessen állítani az alapszíninger-összetevők pozitív előjelű additív keverékeként.

2. Az alapszíningerek egységeit úgy kell meghatározni, hogy az ekviennergetikus színeképű színinger színességi koordinátái egyenlők legyenek ($x = y = z$).
3. A fényűrűségi információt csak az egyik alapszíninger-összetevő hordozza.
4. Az XYZ színingertér térfogata a fentiek teljesülése mellett legyen minimális.

A transzformáció megadásánál még további szempontokat is figyelembe vettek:

- a színekép hosszú hullámhosszúságú része minél nagyobb tartományban legyen kikeverhető az X és Y színinger-összetevőkből (lehetőség szerint a $\bar{z}(\lambda)$ függvény a spektrum vörös vége felé eső részét tegyék zérussal egyenlővé).
- a színekép rövid hullámhosszúságú része minél szélesebb tartományban legyen kikeverhető az Z és Y színinger-összetevőkből, igen kevés X hozzáadásával [21].

Az X , Y , Z színinger-összetevők

A felsoroltakat valós alap-színingerek nem elégítik ki. Az X, Y, Z alap-színingereket fényforrásként nem lehet megvalósítani, amit úgy fejezünk ki, hogy nem valódiak. (Lehet generálni olyan – negatív értéket is felvevő - eloszlásokat, amelyek színinger-összetevői megfelelnek a CIE alap-színingereknek [107].)

A CIE XYZ tristimulusos értéket (színinger-összetevőket) az

$$X = k \int_{380}^{780} S_{\lambda} \bar{x}(\lambda) d\lambda; \quad Y = k \int_{380}^{780} S_{\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda; \quad Z = k \int_{380}^{780} S_{\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

egyenletek szolgáltatják: S_{λ} a színinger relatív spektrális teljesítmény-eloszlása, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ színinger-megfeleltető függvények, k alkalmasan megválasztott konstans. Ha Y értékét fotometriai mennyiségben szeretnénk megkapni, akkor a k állandónak K_m –mel a monokromatikus sugárzás spektrális fényhatásfokának legnagyobb értékével (683 lm / W) kell megegyeznie.

Az $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ színingermérő függvények (31. ábra) 360 és 830 nm közötti, 1 nm-es lépésközzel felvett értékei megtalálhatók táblázatos formában a CIE 15.2 számú kiadványában [108]. A gyakorlati színingermérésben alkalmazott számításokban csak a látható sugárzás 380 nm –780 nm tartományát vesszük figyelembe.

Ha két színinger színinger-összetevői páronként egyenlők egymással, akkor azonos körülmények között egymás mellett azonosnak látjuk a kettőt:

$$\begin{aligned}\int_{380}^{780} S_1(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} S_2(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{780} S_1(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} S_2(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{780} S_1(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} S_2(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda\end{aligned}$$

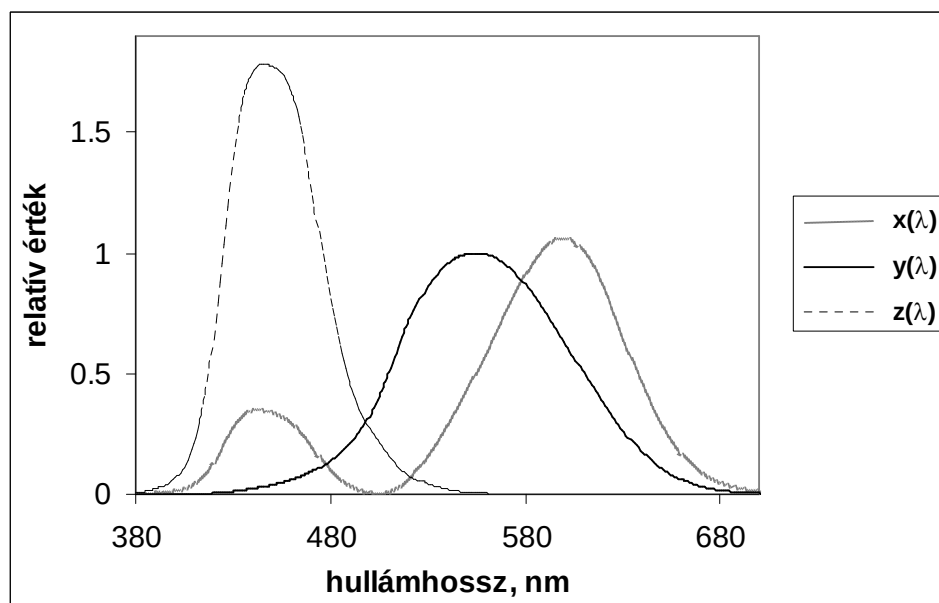
Ahol $S_1(\lambda)$ és $S_2(\lambda)$ a két színinger spektrális teljesítmény-eloszlása, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ pedig a színinger-megfeleltető függvények. Ha $S_1(\lambda)$ és $S_2(\lambda)$ eltérőek, akkor metamereknek nevezzük azokat.

A színinger-koordináták és a színességi diagram - az x, y, Z színingermérő rendszer

Gyakorlatban sokszor az Y fotometriai mennyiség mellett a színingert nem az X és Z színinger-összetevővel jellemezzük, hanem a színinger-összetevőkből számított x, y szín(inger-)koordinátákkal, vagy más néven színességi koordinátákkal:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}.$$

Mivel $z = 1 - x - y$, ezért z elhagyható. Az x, y színességi koordináták közösen a színinger színességét



31. ábra. A CIE 1931 2° színingermérő észlelő, az $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ színinger-megfeleltető függvények

határozzák meg, a színinger teljes jellemzéséhez az Y színinger-összetevőt is meg kell adni.

A CIE x, y színességi- (vagy színinger-) diagramban az additív színinger-keveréssel előállított színingerek a felhasznált három alapszíninger által meghatározott háromszögön belül helyezkednek el. A színességi diagramban a spektrumszínek vonalának végpontjait a bíbor színingerek vonala köti össze.

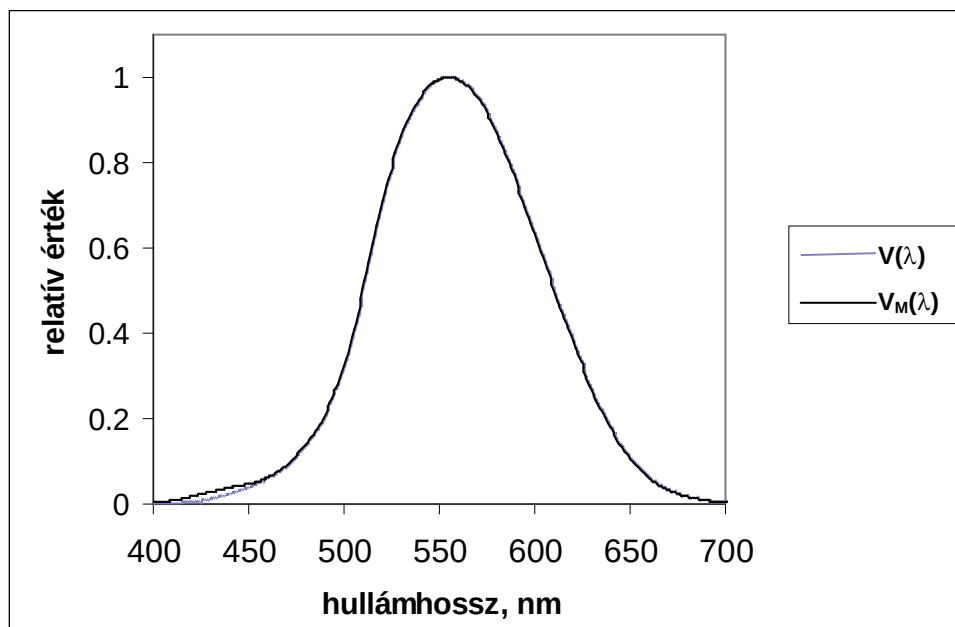
Judd és Vos módosítása

Judd [109] szerint az 1924 $V(\lambda)$ spektrális fényhatásfok függvény megalkotásakor alulbecsülték annak értékeit a színekép 460 nm alatti tartományában, ezért javasolta a függvény korrekcióját. A CIE ezt gyakorlati okokból a szabványos rendszer megalkotása szempontjából figyelmen kívül hagyta, csak mint kiegészítő észlelőt határozta meg [110]. Az új láthatósági függvény integrálása a színingermérő rendszerbe a színingermérő függvények megváltoztatásával járt együtt, Judd $X'Y'Z'$ rendszere azonban nem megfelelő transzformációja az 1931-es színingermérő észlelőnek, mivel Judd a fénysűrűségi együtthatókat hibásan határozta meg, ezért az $X'Z'$ tengely mentén a fénysűrűség nem zérus. Ebből következik, hogy az 1951 $X'Y'Z'$ rendszer nem használható a színingermérés és színlátás-modellezés területén [111].

Vos [112] szerint a gyakorlati színingermérés igényeit kielégíti az 1931 CIE színingermérő észlelő, a kutatásban viszont pontosabb súlyfüggvényekre van szükség. Vos tovább dolgozott Judd módosításán, pontosította a számításokat, az eltelt időszak új ismereteit is figyelembe vette a láthatósági függvény és a színingermérő függvények korrekciójánál.

A CIE 1931 színingermérő észlelő 700 nm-nél nagyobb hullámhosszakon konstans értékeket vesz fel, azóta ismertté vált, hogy az infravörös tartományban is érzékeny a vizuális rendszer színingerekre, ezért korrigálni kellett a régi adatokat. Az 1924 $V(\lambda)$ láthatósági függvény értékeit alulbecsülték, Judd módosítása viszont túlbecsülte 410 nm alatt annak értékeit. Vos a 380 nm alatti részt elhagyta, mivel ezt a CIE kísérleti adatok hiányában, extrapolációval állította elő. A 380 nm – 400 nm közötti szükségtelen irregularitásokat megszüntetve a függvényeket „kisimította”.

A javasolt módosítások a látható színeképtartomány végeire vonatkoznak, ezért a gyakorlati színingermérésben szerepük nem jelentős, de a monokromatikus színingerekkel végzett kutatásokban nem szabad ezeket figyelmen kívül hagyni. A CIE a láthatósági függvény Judd-Vos, majd Kaiser által módosított változatát 1990-ben fogadta el, $V_M(\lambda)$ néven [110].



32. ábra. Az 1924-ben szabványosított, villogásos (flicker) fotometriával meghatározott $V(\lambda)$ spektrális fényhatásfok függvény és a Judd és Vos módosításait is magába foglaló $V_M(\lambda)$

Stiles és Burch színingermérő függvényei

Az 50-es években a CIE kezdeményezte a húszéves színingermérő észlelő felülvizsgálatát, mivel problémák adódtak a $V(\lambda)$ láthatósági függvény használatával a spektrum végein, egyes titántartalmú festékek észlelt és számított színinger-különbsége közti jelentős eltéréseket tapasztaltak [113]. Meg kellett vizsgálni továbbá, hogy jól használható-e a szabványos észlelő az ipari nagy látószögű alkalmazásokban (pl. termékek ellenőrzése).

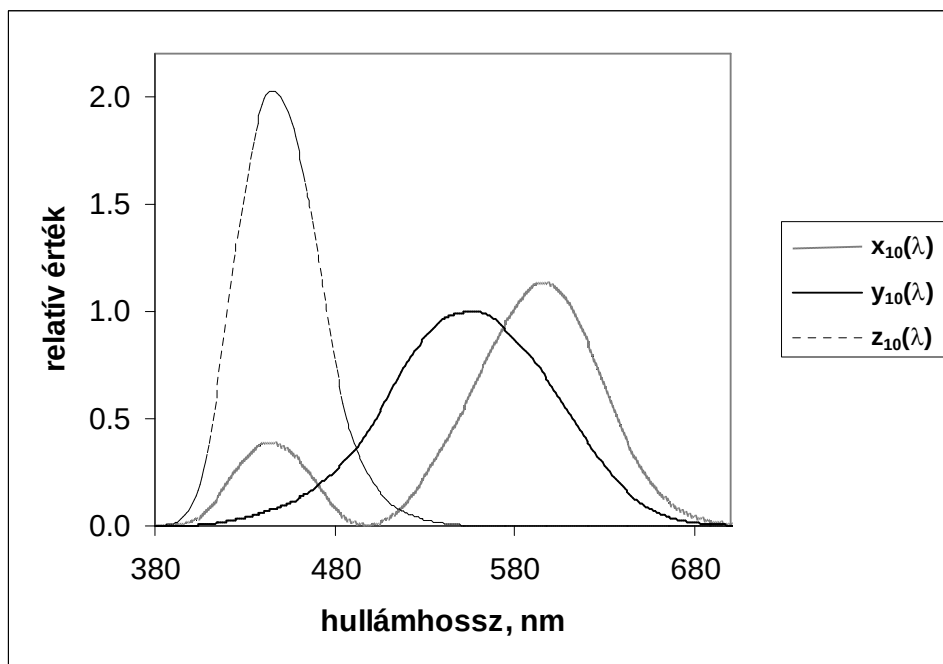
Stiles [24] színingermérő függvények meghatározásába fogott 2°-os és 10°-os osztott látómezőkkel egy speciálisan tervezett készüléken ("Stiles" illetve "NPL" trikromátor). Színinger-megfeleltető és heterokromatikus világosság-egyeztető próbakísérleteket végzett 10 mérőszeméllyel. A jelentés szerint szignifikáns különbségek adódtak a 2°-os szabványos észlelő és a kísérleti adatok között, de ezek nem voltak olyan mértékűek, hogy indokolják a színingermérő észlelő lecserélését a gyakorlati színingermérésben.

A CIE 1964 10°-os kiegészítő színingermérő rendszer

Az iparban felmerült az igény egy olyan színingermérő rendszerre, mely nagyobb méretű minták színinger-mérésére alkalmazható – ezek mérésére a CIE 1931 észlelő nem volt megfelelő. A 2°-os látószögű színinger a retinán a sárgafolttra képeződik le. A fovea centralisban a vörös és zöld színingerekre érzékeny csapok mellett kékre érzékenyek alig találhatók (az S receptorok száma a foveában jóval alacsonyabb az L és M receptorok számánál, a kék mechanizmus térbeli felbontása kisebb: 0,5°-nál kisebb látószögnél már a tritanópia jelensége mutatkozhat; a fovea centrálisban

teljesen hiányozhatnak a színek kék tartományában érzékeny receptorok [114]). A látószög növelve túllépünk a sárgafolt retinát borító pigmentrétegen – megváltozik a receptorokig vezető fényút spektrális transzmissziója. A csap receptorok mellett egyre nagyobb számban találhatók meg a pálcikák, megváltozik a receptorok eloszlása. Ezért szükség volt új súlyfüggvényekre – egy nagy látószögű észlelőre. Stiles és Burch [115] és Sperankaya [116] eredményei alapján alkotta meg a CIE az 1964 10°-os kiegészítő színingermérő észlelőt [117], melyet akkor célszerű használni, ha a látószög meghaladja a 4°-ot. Ez az észlelő a pálcika kölcsönhatást elhanyagolja, csak nagy fénysűrűség esetén használható.

A 10°-os színingermérő függvények nagyon hasonlóak a 2°-os észlelő súlyfüggvényeihez (25. ábra), ugyanazzal a módszerrel származtatták ezeket. Lényeges eltérés, hogy az alap-színingereknek nem fotometriai, hanem radiometriai jellemzőit rögzítették. Így a színingermérés függetlenné vált a fotometriától. Jellemző különbség továbbá, hogy az $\bar{x}(\lambda)$ minimuma 498 nm-nél míg a $\bar{x}(\lambda)_{10}$ -é 504 nm-nél található (abban, hogy a spektrumszínéek görbéjét mely hullámhossz értéknél érintse az YZ egyenes, eltértek az 1931-es számításoktól) [118].



33. ábra. A CIE 1964 10° kiegészítő színingermérő észlelő, az $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ színingermegfeleltető függvények

A csap receptorok spektrális érzékenységi függvényei

Az emberi színlátás tulajdonságait a színérzékelésért felelős receptorsejtek tulajdonságai határozzák meg. A csap receptorok olyan detektoroknak tekinthetők, melyek a látható színek rövid (Short), közepes (Middle) és hosszú (Long) hullámhosszú tartományában érzékenyek. A receptorok érzékenységének meghatározására irányuló kutatásban vizsgálatnak vetik alá a pszichofizikai módszerekkel meghatározott színíngermérő függvényeket is.

Ha ismerjük a csap receptorok spektrális érzékenységét, akkor két színíngert azonosnak látszik, ha a látható sugárzás intervallumán az érzékenységi görbékkel súlyozva vett integráljuk megegyezik. A receptorok spektrális érzékenységi görbéinek ismeretében felírhatjuk az alábbi egyenlőséget vizuálisan azonos színíngert-párookra:

$$\begin{aligned}\int_{380}^{780} S_{R1}(\lambda) L(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} S_{R2}(\lambda) L(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{780} S_{R1}(\lambda) M(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} S_{R2}(\lambda) M(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{780} S_{R1}(\lambda) S(\lambda) d\lambda &= \int_{380}^{780} S_{R2}(\lambda) S(\lambda) d\lambda\end{aligned}$$

$S_{R1}(\lambda)$ és $S_{R2}(\lambda)$ a retinára eső optikai sugárzások spektrális teljesítmény-eloszlása, $L(\lambda)$, $M(\lambda)$ és $S(\lambda)$ pedig a csap receptorok spektrális érzékenységi görbéi.

Vos és Walraven [119] a fovea receptorainak spektrális érzékenységi görbéinek meghatározását kísérelték meg, feltételezve, hogy a dikromátok és monokromátok színlátása hiányos formája a trikromatikus ép színlátókénak. Ez nem általánosan elfogadott vélemény, kérdéses, hogy a deuteranopiát az M típusú receptorok hiánya okozza, vagy az L és M rendszerek fúziójával magyarázható. Úgy találták, hogy a receptor érzékenységi görbék lineáris transzformáltjai a CIE színíngert-megfeleltető függvényeknek, a transzformáció mátrixának együttthatóit dikromátokkal folytatott kísérletekből határozták meg.

Smith és Pokorny [120] a receptorok spektrális érzékenységi függvényeit Judd és Vos színíngermérő függvényeinek lineáris transzformációjával kapták dikromátok adataiból, feltételezve, hogy a $V(\lambda)$ láthatósági függvény az $L(\lambda)$ és $M(\lambda)$ összege.

Stockman, MacLeod és Johnson [121] a színi adaptáción alapuló technikával normál, protanóp és deuteranóp alanyok L és M receptorok spektrális érzékenységi függvényeit határozták meg, a számítások Stiles és Burch 2°-os próbakísérletéből származó színíngermérő függvényekre épülnek.

Planck sugárzók

Planck sugárzási törvénye a termikus egyensúlyban lévő üregsugárzó (feketetest- vagy Planck-sugárzó) kis nyílásán kilépő sugárzás spektrális sugársűrűségét adja meg a hullámhossz és a hőmérséklet függvényében:

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

ahol $c_1 = 2\pi^5 k^4 / 15 h^3 c^2$

$$c_2 = hc_0 / k = (1,438\,769 \pm 0,000\,012) \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

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

$$k = (1,380\,658 \pm 0,000\,012) \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \text{ a Boltzmann állandó,}$$

c_0 a fénysebesség légüres térben, T a hőmérséklet.

A Planck sugárzók vonala a különböző hőmérsékletű Planck-sugárzók színpontjainak összessége egy színinger-diagramban.

II. Melléklet: Az Ocean Optics S2000 PC-vezérlésű kompakt spektrofotométer specifikációja

Detektor:

2048 elemű lineáris CCD tömb (12.5 μm x 200 μm méretű elemek)

Potenciál-gödör kapacitás (600 nm): 160,000 foton

A rendszer dinamikus tartománya: 2×10^8

A detektor dinamikus tartománya: ~2000:1

Jel-zaj viszony: 250:1 (maximális jelszint mellett)

Sötét zaj: 2.5-4.0 (RMS érték)

Mérhető hullámhossztartomány: 350 -1000 nm

Integrációs idő: 6 ms - 60 s

A/D átalakító:

Típus: ADC-1000

Csatlakozás: ISA-busz

Felbontás: 12 bit

Mintavételi frekvencia: 1 MHz

Integrációs idő: 3 ms – 60 s

Maximális mérésszám: 200 1/s

Felhasználói program: SpectraWin 4.0 for Windows

Opcionális optikai elemek adatai:

Résszélesség: 50 μm

Rácsállandó: 600 vonal/mm

Felbontás:

Felbontás: 1,7 nm

Száloptika:

Típus: FC UV 400-2

Átmérő: 400 μm

Hossz: 2 m

Szórt sugárzás:

< 0.05% (600 nm); < 0.10% (435 nm)

(Forrás: <http://oceanoptics.com/Products/s2000.asp>)

A spektrofotométer reprodukálóképességét izzólámpa és katódsugárcsöves monitor spektrális teljesítmény-eloszlásain vizsgáltuk :

Izzólámpa:

vizsgált hullámhossz	relatív szórás
435 nm	0,24 %
470 nm	0,13 %
530 nm	0,25 %
600 nm	0,13 %
630 nm	0,20 %

Katódsugárcsöves monitor:

vizsgált hullámhossz	relatív szórás
450 nm	0,19 %
530 nm	0,16 %
626 nm	0,17 %

III. Melléklet: A 3. fejezetben ismertetett vizuális kísérlet eredményei

Munsell minta: N 3.0/				5 PB 3/6			10 Y 3/2			5R 2/6			10R 2/4			10G 3/6		
No.	x	y	Y	x	y	Y	x	y	Y	x	y	Y	x	y	Y	x	y	Y
1	0,4139	0,3967	39,38	0,2900	0,3056	34,75	0,444	0,4318	39,04	0,5490	0,3358	21	0,5658	0,3691	19,1	0,2889	0,4771	37,58
2	0,4221	0,3948	33,25	0,2931	0,3092	34,95	0,4319	0,4254	39,43	0,5458	0,3421	21,2	0,5671	0,3666	21,73	0,2974	0,4728	37,84
3	0,4049	0,3881	33,3	0,2819	0,2997	26,2	0,4284	0,4306	42,2	0,5519	0,3406	18,35	0,5466	0,3704	14,8	0,2887	0,4506	25,58
4	0,4169	0,3950	35,26	0,2930	0,3102	31,72	0,4424	0,4298	40,15	0,5595	0,3386	19,88	0,5613	0,3663	16,4	0,2947	0,4707	34,91
5	0,4122	0,3865	28,92	0,2956	0,3113	31,43	0,4387	0,4262	33,84	0,5637	0,3375	19,54	0,5635	0,3663	18,42	0,2938	0,4670	29,26
6	0,4213	0,3945	32,01	0,2955	0,3192	30,02	0,4424	0,4258	31,4	0,5660	0,3338	18,97	0,5723	0,3603	16,8	0,3029	0,4671	31,08
7	0,4189	0,4005	33,3	0,2929	0,3096	29,97	0,4494	0,4351	39,84	0,5752	0,3384	18,88	0,5718	0,3647	17,86	0,2929	0,4765	35,02
8	0,4129	0,3951	37,53	0,2934	0,3083	33,03	0,4398	0,421	33,81	0,5602	0,3367	19,73	0,5571	0,3607	20,38	0,2886	0,4643	34,1
9	0,4118	0,3917	32,6	0,2869	0,3068	27,95	0,4386	0,419	30,32	0,5660	0,3351	19,72	0,5598	0,3627	16,42	0,2881	0,4712	33,83
10	0,4114	0,3960	34,6	0,2942	0,3089	26,01	0,4393	0,4334	34,57	0,5662	0,3357	19,7	0,5674	0,3663	20,13	0,2892	0,4763	30,5
11	0,4127	0,3925	31,72	0,2934	0,3097	29,72	0,4448	0,43	31,5	0,5675	0,3397	19,88	0,5686	0,3664	16,54	0,2889	0,4737	32,98
12	0,4017	0,3811	30,16	0,2915	0,3050	28,97	0,4464	0,4274	34,14	0,5700	0,3376	18,79	0,5587	0,3531	21,29	0,2881	0,4834	39,84
13	0,4155	0,4000	39,25	0,2919	0,3134	29,52	0,441	0,4243	32,77	0,5622	0,3339	17,86	0,5678	0,3632	20,41	0,2940	0,4755	32,72
14	0,4127	0,3907	40,16	0,2888	0,3135	32,94	0,4423	0,4246	41,52	0,5631	0,3384	19,93	0,5638	0,3655	20,68	0,2845	0,4890	34,62
15	0,3997	0,3801	28,1	0,2885	0,2963	24,9	0,4362	0,4258	31,92	0,5602	0,3357	19,18	0,5594	0,3629	17,28	0,2888	0,4614	27,04
16	0,4142	0,3970	36,15	0,2900	0,3033	27,6	0,4443	0,426	36,21	0,5717	0,3371	19,21	0,5686	0,3650	18,19	0,2865	0,4739	30,88
17	0,4092	0,3933	35,49	0,2945	0,3060	28,78	0,4469	0,4274	34,55	0,5740	0,3353	17,44	0,5812	0,3637	18,22	0,2873	0,4761	26,94
18	0,4050	0,3848	33,91	0,2943	0,3123	39,74	0,44	0,4194	40,74	0,5606	0,3327	20,13	0,5576	0,3630	22,07	0,2932	0,4690	43,8
19	0,4213	0,4005	35,9	0,2956	0,3192	29,7	0,4469	0,4194	35,5	0,5740	0,3343	17,88	0,5562	0,3664	18,87	0,2940	0,4506	27,2
20	0,4050	0,3848	34,1	0,2943	0,3123	39,8	0,4494	0,4199	41	0,5740	0,3327	20,23	0,5566	0,3680	22,2	0,2932	0,4690	43,9
ÁTLAG	0,4122	0,3922	34,25	0,2920	0,3090	30,89	0,4417	0,4261	36,22	0,5640	0,3366	19,38	0,5636	0,3645	18,89	0,2912	0,4708	33,48
SZÓRÁS	0,0064	0,0061	3,29	0,0034	0,0056	4,07	0,0054	0,0047	3,88	0,0083	0,0026	0,99	0,0076	0,0037	2,15	0,0043	0,0093	5,25

IV. Melléklet: Katódsugárcsöves monitor kalibrációja

Katódsugárcsöves monitorok jellemző tulajdonsága, hogy a D/A átalakítás során lineárisan kvantált feszültségjelek nem lineáris fénysűrűség értékeket hoznak létre. E képmegjelenítők szintani kalibrálása két lépésből áll. Első lépésben a számítógép grafikus kimenetének R,G,B alap-színíngerei és a CIE X,Y,Z színínger-összetevők közti lineáris transzformációt megvalósító, ún. fénypor-mátrix együtthatóit, majd a második lépésben a D/A átalakító digitális bemenő értékei és a képernyő felületén mérhető sugársűrűség közti kapcsolatot leíró egyenlőségek paramétereit kell kiszámítani.

A fénypor-mátrix elemeinek meghatározásához egy Ocean Optics S2000 típusú CCD detektorsoros spektrométert használtunk, melynek specifikációja megtalálható a II. mellékletben. A méréseket a képernyő közepén végeztük, mivel a képernyő felületének ezt a részét használtuk a kísérlet folyamán az összehasonlítható színíngerek megjelenítésére.

A maximális R , G , B tristimulusos értékekre meghatározott fénypor-mátrix alakja és értékei:

$$\begin{bmatrix} X_{r,\max} & X_{g,\max} & X_{b,\max} \\ Y_{r,\max} & Y_{g,\max} & Y_{b,\max} \\ Z_{r,\max} & Z_{g,\max} & Z_{b,\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 31,90 & 21,46 & 12,67 \\ 17,41 & 46,74 & 4,97 \\ 1,91 & 9,32 & 67,11 \end{bmatrix}.$$

E mátrix inverzének segítségével tudjuk meghatározni a CIE X,Y,Z színínger-összetevők ismeretében a monitor R,G,B színínger-összetevőit. A fénypor mátrix inverze és értékei:

$$\begin{bmatrix} X_{r,\max} & X_{g,\max} & X_{b,\max} \\ Y_{r,\max} & Y_{g,\max} & Y_{b,\max} \\ Z_{r,\max} & Z_{g,\max} & Z_{b,\max} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,041411 & -0,01771 & -0,00651 \\ -0,01553 & 0,028362 & 0,000834 \\ 0,000981 & -0,00344 & 0,01497 \end{bmatrix}.$$

A digitális értékek és a monitor színínger-összetevők közti nemlineáris kapcsolatot leíró egyenlet paramétereinek meghatározásához InPhoRa típusú tristimulusos színíngermérő készüléket használtunk. A D/A erősítési értékeket azonos lépésközzel növelve az egyes csatornára külön-külön mértük az R,G,B tristimulus értékeket (valójában az adott csatornára legnagyobb jel-zaj viszonyt biztosító színínger-összetevőt mértük). Az eredményül kapott normalizált értékekre a legkisebb négyzetek módszerével illesztettünk függvényt, melynek bemenete 0-tól 255-ig a digitális R,G,B érték, kimenete pedig a monitor R_m,G_m,B_m színínger-összetevője. A digitális értékek és a monitor R_m,G_m,B_m színínger-összetevők közti nemlineáris kapcsolatot leíró modellfüggvények:

$$R_m = (a_r * (R - 255) + 1)^{\gamma_r}$$

$$G_m = (a_g * (G - 255) + 1)^{\gamma_g}$$

$$B_m = (a_b * (B - 255) + 1)^{\gamma_b}$$

R, G, B digitális erősítési értékek; R_m, G_m, B_m a monitor tristimulusos értékei; $\gamma_r, \gamma_g, \gamma_b$ exponensek az úgynevezett „gamma” paraméterek, a_r, a_g, a_b további szabad paraméterek. A fenti függvények inverzére van szükségünk, ha a monitor trisitimulusos értékeinek ismeretében a digitális erősítési értékeket szeretnénk meghatározni:

$$R = \frac{(R_m^{1/\gamma_r} - 1)}{a_r} + 255 \quad G = \frac{(G_m^{1/\gamma_g} - 1)}{a_g} + 255 \quad B = \frac{(B_m^{1/\gamma_b} - 1)}{a_b} + 255.$$

A mérési eredmények segítségével a függvényillesztés során meghatározott paraméterek értékei:

$$a_r = 0,0053$$

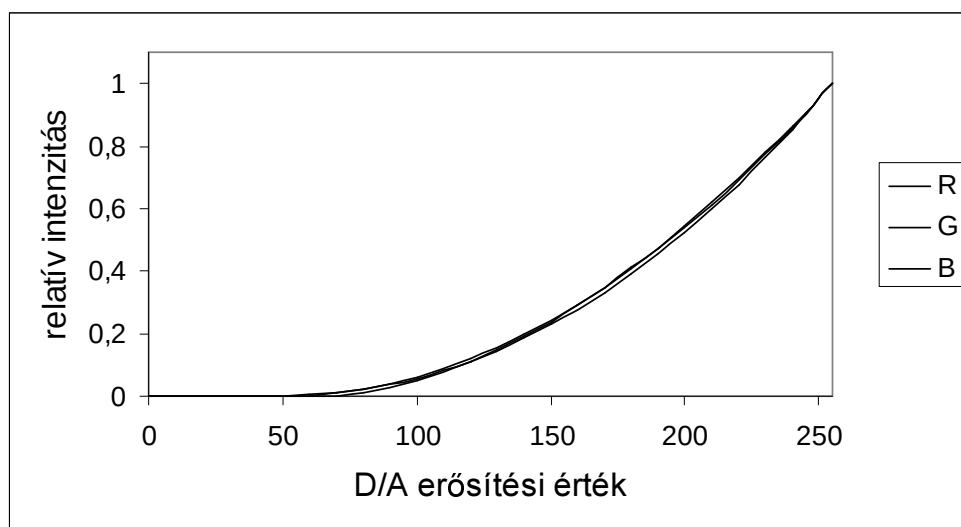
$$a_b = 0,004866$$

$$a_g = 0,00477$$

$$\gamma_r = 1,7594$$

$$\gamma_b = 1,983$$

$$\gamma_g = 2,125$$



34. ábra. A kísérletben használt monitor karakterisztikájának modellje

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Homann J. P.: *Digitales Colormanagement (Farbe in der Publishing-Praxis)*, Springer 2000
- [2] Commission Internationale de l'Éclairage: *CIE Proceedings*. 1931, Cambridge University Press, Cambridge, 1931
- [3] Commission Internationale de l'Éclairage: Colorimetric Observers. ISO/CIE **10527**-1991 (S002, 1986)
- [4] Fairchild M.D.: *Colour Appearance Models*. Addison Wesley Longman, Inc. 1998: 215-244
- [5] Comission Internationale de l'Éclairage: CIE NEWS, *CIE Central Bureau*, 51, 1999
- [6] Á. Borbély: Kognitive effekte der Weisspunktdefinition am Computerbildschirm, Farb-Info '98 Wien, A, 1998
- [7] C. Sik-Lányi, Á. Borbély, J. Schanda: Cognitive Effects of White Point Definition on Computer Screens, CIM98, Derby, UK, 1998
- [8] C. Sik-Lányi, Á. Borbély, J. Schanda: Cognitive Effects in Image Reproduction on Computer Screens, 5th International Symposium „Colour and Colorimetry”, Kranj, SLO, 1998
- [9] International Commission on Illumination, *Comte Rendu 18 Session*, London, 1975, **CIE 36** p. 171, 1976.
- [10] International Commission on Illumination, *Comte Rendu CIE 14e Session*, Brussels, W-1.3.1. Colorimetry 107-108, 1959.
- [11] MacAdam D.L.: Correlated color temperature? *J. Opt. Soc. Am.* **67** 839-40 1977.
- [12] Magyar Szabványügyi Hivatal: *Magyar Szabvány, Fénytechnikai terminológia, Színmérés*. MSZ 9620-3, 1990. 845-03-49
- [13] Magyar Szabványügyi Hivatal: *Magyar Szabvány, Fénytechnikai terminológia, Színmérés*. MSZ 9620-3, 1990. 845-03-50
- [14] MacAdam D.L.: Projective transformations of I.C.I. color specifications, *J. Opt. Soc. Am.* **27** 294-299, 1937.
- [15] Kelly K.L.: Lines of constant correlated color temperature based on MacAdam's (u,v) uniform chromaticity transformation of the CIE diagram, *J. Opt. Soc. Am.* **53** 999-1002 1963.

- [16] Judd D.B.: Contributions to color science, edited by DL MacAdam, US Department of Commerce, NBS, p. 206 1979.
- [17] Harding H.G.W.: The colour temperature of light sources, *Proc. Phys. Soc.* **B63** 685-698 1950.
- [18] Grum F., Saunders S.B., MacAdam L.: Concept of correlated color temperature, *Color Res. & Appl.* **3** 17-21 1978.
- [19] Bodrogi P., Schanda J.: Testing the calibration model of colour CRT monitors. A method to characterise the extent of spatial and channel interdependence, *Displays* **16/3** 123 - 133 1995.
- [20] Borbély Á., Sámson Á., Schanda J.: The concept of correlated color temperature revisited *Color Research and Application* 2001, 26: 450-457
- [21] Fairman H.S, Brill M. H., Hemmendinger H.: How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from the Wright-Guild Data. *Color Research and Application*, 1997; 22:11-23.
- [22] Kaiser P. K., Wyszecki G.: Additivity failures in heterochromatic brightness matching. *Color Research and Application* 1978; 3: 177-182
- [23] Trezona P.W.: Additivity of colour equations, *Proc Phys. Soc.*, London **B66** 548, 1953 & **B67** 513, 1954.
- [24] Stiles W. S., Burch J. M.: Interim report to the Comission Internationale de l' Éclairage Zurich, on the National Physical Laboratory's Investigation of colour matching, with an appendix by W.S. Stiles and J.M. Burch, *Optica Acta* 1955, **2**, 168-181.
- [25] Stiles W.S., Wyszecki G.: Field trials of color-mixture functions, *Journal of Optical Society of America*, 52, 58-75 1962.
- [26] Shapiro A.G., Pokorny J., Smith V.C.: Rod contribution to Large-Field Color Matching. *Color Research and Application* 19, 236-245 1994
- [27] Trezona P.W.: Derivation of the 1964 CIE 10° XYZ colour-matching functions and their applicability in photometry. *Color Research and Application* 2001; 26: 67-75
- [28] Burns S. A., Elsner A. E.: Color matching at high illuminances: photopigment optical density and pupil entry. *Journal of Optical Society of America*, 1993; 10: 221-230
- [29] Estévez O.: A better colorimetric standard observer for color-vision studies: the Stiles and Burch 2° color-matching functions. *Color Research and Application* 1982; 7/2: 131-134.

- [30] Sperling H.G.: An experimental investigation of the relation between colour mixture and luminous efficiency. Visual problems of colour. I, National Physical Laboratory Symposium No. 8, London, HMSO, 1958, p. 251
- [31] Thornton W.A.: Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part I. The visual colorimeter – spectroradiometer. Experimental results. *Color Research and Application* 1992; 17: 79-122.
- [32] Thornton W.A.: Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part II. Discussion. *Color Research and Application* 1992; 17: 162-186.
- [33] Thornton W.A.: Evidence for the three spectral responses of the normal human visual system *Color Research and Application*; 11: 160-163.
- [34] Thornton W.A.: Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part III. Discussion. *Color Research and Application*, 1992; 17: 240-262.
- [35] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE): *Proceedings of the CIE Symposium '93 on Advanced Colorimetry*. **CIE x007** - 1993
- [36] Thornton W.A.: Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part IV. Visual experiments with bright fields and both 10° and 1,3° field sizes. *Color Research and Application*, 1997; 22: 189-198.
- [37] Thornton W.A., H. S. Fairman: Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part V. Testing visually matching pairs of lights for possible rod participation on the Aguilar – Stiles model. *Color Research and Application*, 1998; 23: 92-103.
- [38] Thornton W.A.: Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part VI. Improved weighting functions. *Color Research and Application*, 1998; 23: 226-233.
- [39] Thornton W.A.: How Strong Metamerism Disturbs Color Spaces. *Color Research and Application*, 1998; 23: 402-407.
- [40] Kang H.R.: *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. SPIE, 1997
- [41] Brill M.H.: A theorem on prime color wavelengths. *Color Research and Application*, 1996; 21: 239-240.
- [42] Brill M.H., Finlayson G. D., Hubel P.M., Thornton W.A.: Prime colors and color imaging. *Proceedings, IS&T/SID 6th Color Imaging Conference*, pp. 33-42, 1998.

- [43] Thornton W.A.: Spectral sensitivities of the normal human visual system, color-matching functions and their principles and how and why the two sets should coincide. *Color Research and Application* 1999; 24: 139-156.
- [44] MacAdam D.L.: A Paradox! A Most Ingenious Paradox! *Color Research and Application* 1992; 17: p. 366.
- [45] Commission Internationale de l'Éclairage: Colorimetry. 2nd edition, **CIE 15.2** – 1986, p. 15.
- [46] Burns R.S., Motta R.J., Gorznychski M.E.: CRT Colorimetry. Part I.: Theory and Practice. *Color Research and Application* 1993; 18/5.
- [47] Reháč R., Bodrogi P., Schanda J.: On the use of the sRGB colour space. *Displays* 1999; 20: 165-170.
- [48] Wyszecki G., Stiles W.S.: *Colour Science*. 2nd Edn., John Wiley and Sons, p. 306 - 313. 1982.
- [49] Mátrai T., Csillag L: *Kísérleti spektroszkópia*, Tankönyvkiadó, Bp 1990., p. 173.
- [50] Commission Internationale de l'Éclairage: The relationship between digital and colorimetric data for computer-controlled displays. **CIE 122**-1996, p. 5.
- [51] Bodrogi P., Schanda J.: Testing a calibration method for colour CRT monitors. *Displays* 1995; 16: 123-133.
- [52] Bodrogi P., Sinka B., Borbély Á., Geiger N., Schanda J.: On the use of the sRGB colour space: the "Gamma" problem. *Displays* (Elfogadva)
- [53] Rich D.C., Jialili J.: Effects of Observer Metamerism in Determination of Human Color-Matching Functions. *Color Research and Application*, 1995; 20: 29-35.
- [54] MacAdam D.L.: Visual Sensitivities to Small Color Differences in Daylight. *Journal of Optical Society of America*, 1942; 32: p. 247.
- [55] Brown W.R.J., MacAdam D.L.: Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences. *Journal of Optical Society of America*, 1949; 39: p. 808.
- [56] Robertson A.R.: CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation. *Color Research and Application* 1978; 3: 149-151.
- [57] Brown W.R.J.: Statistics of Color-Matching Data. *Journal of Optical Society of America*, 1952; 42/4 Apr.

- [58] Kremers J., Schnöll H.P.N., Knau H., Berendschot T.T.J.M., Usui T., Sharpe L.T.: L/M cone ratios in human trichromats assessed by psychophysics, electroretinography, and retinal densitometry. *Journal of Optical Society of America*, 2000; 17/3: 517-526
- [59] Stiles W.S., Burch J.M.: N.P.L. colour matching investigation: final report. (1958) *Optica Acta* 6, 1 (1959)
- [60] Judd D.B.: Report of U. S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight. *CIE Proceedings*, Vol. 1. P. 11. , Paris, Bureau Central de la CIE, 1951
- [61] Sueeprasan S., Luo M.R., Rhodes P.A.: Investigation of colour appearance models for illumination changes across media, *Color Research and Application*, 2001; 26: 428-435
- [62] Fairchild M.D.: *Colour Appearance Models*. Addison Wesley Longman, Inc., 1998, Chapter 15: Testing color appearance models: 301-324
- [63] Zukauskas A., Ivanauskas F., Vaicekauskas R., Shur M.S., Gaska R.: Optimization of multichip white solid-state lighting source with four or more LEDs, *Proc. SPIE* Vol. 4445, 2001, p. 148-154
- [64] Ashdown I.: Correlated Color Temperature and white light LEDs, *IESNA Annual Conference Proceedings*, 2002: 1-12,
- [65] Kohmoto K.: Development of white LEDs in Japan, 2nd CIE Expert Symposium on LED measurement, Nist, USA 2001
- [66] Szabados M.: COMCOLOR mérési pontossága, XXVIII. Kolorisztikai Szimpózium, Tata, 2001
- [67] Prache O.: Active matrix molecular OLED microdisplays. *Displays*, 2001. 22: 49-56
- [68] U.S. Patent and Trademark Office: United States Patent Application No. 0020135997, 2002
- [69] Schanda J., Schanda G., Muray K.: Light Emitting Diode Standards, 2nd CIE Expert Symposium on LED measurement, Nist, USA 2001
- [70] Borbély Á.: Colour matching using LEDs as primaries, 2nd CIE Expert Symposium on LED measurement, Nist, USA 2001
- [71] Bodrogi P., Tarczali T.: Colour memory for various sky, skin, and plant colours: effect of the image context, *Color Research and Application* 2001, 26/4, pp. 278-289
- [72] Budó Á.– Mátrai T.: *Kísérleti Fizika III.*, Tankönyvkiadó, BP, 1989, p. 113.
- [73] Commission Internationale de l'Éclairage: Measurement of LEDs. **CIE 127** –1997 p. 15

- [74] Muray K.: CIE work on LED measurement. 2nd CIE Expert Symposium on LED measurement, Nist, USA 2001
- [75] Commission Internationale de l'Éclairage: CIE NEWS, *CIE Central Bureau*, 55, 2000
- [76] Borbély Á., Schanda J.: Színmegfeleltetés LED alapszínekkel. XXVIII. Kolorisztikai Szimposium, Tata, 2001
- [77] Muray K., Ohno Y., Schanda J., Kranicz B.: Comparison Measurements of LEDs: Spectral power distribution. 2nd CIE Expert Symposium on LED measurement, Nist, USA 2001
- [78] Wyszecki G., Stiles W.S.: *Colour Science*. 2nd Edn., John Wiley and Sons, p. 157 1982.
- [79] Commission Internationale de l'Éclairage: CIE Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms. *Supplement No.2 to CIE publication No.15*, 1978
- [80] Carroll J., McMahon C., Neitz M., Neitz J.: Flicker–photometric electro-retinogram estimates of L:M cone photoreceptor ratio in men with photopigment spectra derived from genetics. *Journal of Optical Society of America*, 2000; 17: 499-509
- [81] Kuehni R.G.: Testing the Standard Observer with sensitive tools. *Color Research and Application*, 1998; 1: 55-56
- [82] Ezquerro J.M., Carreno F., Zoido J.M., Bernabeu E.: The use of metamers to compare the color vision of observers. *Color Research and Application*, 2001; 26: 262-269
- [83] Viénot F.: Relations between inter- and intra-individual variability of color-matching functions. Experimental results. *Journal of Optical Society of America*, 1980; 70: 1476-1483
- [84] Ábrahám Gy., Kőrösi H., Schanda J., Shapiro A.G., Wenzel K.: Anomalies in Additive Colour Matches. *Color Research and Application*, 1995; 20: 235-244.
- [85] Pokorny J., Smith V.C., Lutze M.: Aging of the human lens. *Applied Optics*, 1987, Vol. 26, No. 8, 1437-1440
- [86] Oleari C.: Inter-observer comparison of color-matching functions. *Color Research and Application*, 1999; 24: 177-184
- [87] Shapiro A. G., Pokorny J., & Smith V.: Cone-rod receptor spaces with illustrations that use CRT phosphor and light-emitting-diode spectra. *Journal of Optical Society of America*, Vol. 13, No. 12, pp. 2319-2328, 1996
- [88] Shaw M.Q., Fairchild M.D.: Evaluating the CIE 1931 Color Matching Functions. *Color Research and Application*, 26, (in press)

- [89] Judd D.B.: Ideal color space. *Color Engineering*, 1970, April, 37-52
- [90] Gibson G.L.: Color-matching functions: A set of transformations with essentially single maximums. *Color Research and Application*, 1981; 6/3: 143-146
- [91] Kuehni R.G.: Uniform color space modeled with cone responses. *Color Research and Application*, 2000; 25: 56-63
- [92] Wenzel Klára: A színes látás modellezése mérés technikai alkalmazásokkal. *Kandidátusi értekezés*, Budapesti Műszaki Egyetem, 1991
- [93] Ábrahám Gy. (szerk.): *Optika*. 21. Fejezet: Színtan. Panem-McGraw-Hill, 1998, p. 497-505.
- [94] Viénot F.: Report on a fundamental chromaticity diagram with physiologically significant axes, 9th *Congress of International Colour Association, Proceedings*, SPIE Vol. 4421, 2002
- [95] Lukács Gyula: *Szín mérés*. Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1982
- [96] Wright W.D.: The Historical and Experimental Background to the 1931 CIE System of Colorimetry, Golden Jubilee of Colour in the CIE, Bradford 1981, *Color Research and Application*, 1981; 7/1: 12-15.
- [97] Magyar Szabványügyi Hivatal: *Magyar Szabvány, Fénytechnikai terminológia, Szín mérés*. MSZ 9620-3, 1990. 845-03-17
- [98] Morren L.: On the specification of colour-matching functions. *Lighting Research and Technology*, 1992; 24: 161-165
- [99] Wyszecki G., Stiles W.S.: *Colour Science*. 2nd Edn., John Wiley and Sons, 1982, p. 117.
- [100] Wyszecki G., Stiles W.S.: *Colour Science*. 2nd Edn., John Wiley and Sons, 1982, p. 124.
- [101] Wyszecki G., Stiles W.S.: *Colour Science*. 2nd Edn., John Wiley and Sons, 1982, p. 385.
- [102] Magyar Szabványügyi Hivatal: *Magyar Szabvány, Fénytechnikai terminológia, Szín mérés*. MSZ 9620-3, 1990. 845-03-31
- [103] Wright W.D.: A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colors. *Transactions of the Optical Society*, 30 (p. 141-164), 1928-1929
- [104] Guild J.: The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A230 (p. 149-187), 1931

- [105] Fry G. A.: Amalgamation of the Wright and Guild Color-Mixture Data. *Color Research and Application*, 1988; 13: 50-54
- [106] Hunt R.W.G.: *Measuring colour*. 2nd Edn. Ellis Horwood 1995.
- [107] Hawkyard C.J., C. de M. Bezerra: Spectral Power Distributions for the CIE Stimuli. *Color Research and Application*, 2001; 26: 478-482.
- [108] Commission Internationale de l'Éclairage: Colorimetry. 2nd edition, **CIE 15.2** - 1986
- [109] Judd D.B: Report of the secretariat, Technical Committee No. 7, Colorimetry and Artificial Daylight, Sec.7, *CIE Proceedings*, Stockholm , 1951, Vol1, Bureau Central de la Paris
- [110] Commission Internationale de l'Éclairage: 2° Spectral luminous efficiency function for photopic vision. **CIE 86** - 1990
- [111] Fry G.A.: Judd's 1951 color-mixture diagram. *Color Research and Application*, 1987; 12/2: 88-93
- [112] Vos J.J.: Colorimetric and photometric properties of a 2° Standard Observer. *Color Research and Application*, 1978; 3/3: 125-128
- [113] Commission Internationale de l'Éclairage: *CIE Proceedings* 1951, Vol 1, Sec. 4; Vol. 3, p. 37, Bureau Central de la CIE, Paris, 1951
- [114] Mollon J. D.: The oddity of blue. *Nature*, 1977. 268: 587-588
- [115] Stiles W. S., Burch J. M: N.P.L colour-matching investigation: final report (1958), *Optica Acta* **6**, 1-26.
- [116] Speranskaya N.I.: Determination of spectral color co-ordinates for twenty-seven normal observers. *Optics and Spectroscopy* **7**, 424-428, 1959
- [117] Commission Internationale de l'Éclairage: *CIE Proceedings* 1963 (Vienna Session), Vol. B., p. 209-220 (Committee Report E-1.4.1), Bureau Central de la CIE, Paris, 1964
- [118] Trezona P.W., Parkins R.P.: Derivation of the 1964 Colorimetric Standards. *Color Research and Application*, 1998; 23: 221-225.
- [119] Vos J.J., Walraven P.L.: On the derivation of the foveal receptor primaries, *Vision Research*, 1970 11:795-818
- [120] Smith V. C., Pokorny J.: Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 nm and 500 nm. *Vision Research*, 1975; 15: 161-171.

- [121] Stockman A., MacLeod D.I.A., Johnson N.E.: Spectral sensitivities of the human cones. *Journal of Optical Society of America*, 1993, 10: 2491-2521.