

**MODERN FÉNYFORRÁSOK SZÍNMINŐSÉGÉNEK
JELLEMZÉSE ÚJ FEJLESZTÉSŰ SZÍNILLESZKEDÉSI
MODELLEK SEGÍTSÉGÉVEL**

című

DOKTORI (Ph.D) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Szabó Ferenc

Témavezető: Dr. Schanda János



Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Pannon Egyetem

Veszprém

2011

1. PROBLÉMA FELVETÉSE

Értekezésem témájának felvetését az a tény szolgáltatta, hogy a fényforrások színvisszaadási tulajdonságainak meghatározására 1974-ben nemzetközileg elfogadott – és a fényforrásgyártók által azóta is használt – CIE 13.2-es (későbbiekben CIE 13.3) publikáció szerinti módszer az új generációs fényforrások esetén nem szolgáltat megfelelően pontos információt. A színvisszaadási index tévedésének okát számos publikáció taglalja és elfogadása óta több javaslat is született a módszer megújítására, megjavítására, azonban egyetértést egyik sem váltott ki. A színvisszaadási index és a vizuális tapasztalatok közötti gyenge korreláció lehetséges oka a korlátozott számú, telítetlen színminta használata valamint a színkülönbség számítás során használt – mára elavult – CIE U^* V^* W^* színingertér használata. További nehézség, hogy a módszer elfogadásakor használt reflexiós tesztminták ma már igen nehezen érhetők el, a metamer színminták pedig számottevő különbséget produkálnak.

A fehér fényforrások színvisszaadásával foglalkozó CIE 1-69 technikai bizottság ajánlása alapján az új javaslatok a színhűségeen kívüli új szempontok – mint a színpreferencia, színdiszkrimináció, színmemória – alapján közelítik meg a fényforrások színminőségének kérdését. Ehhez a munkához kíván a disszertációban ismertetett színilleszkedés torzulása alapján történő jellemzés további adalékot adni. Színilleszkedés alatt azt értjük, hogy két vagy több egymás mellett látható színminta egymáshoz jól illeszkedő megjelenésű és nem ütik egymást a színek (nemzetközi irodalomban – tévesen – ezt a jelenséget is a „colour harmony” fogalommal szokták jellemezni).

2. CÉLKITŰZÉSEK

1. A kutatás végső célja a fényforrások színminőségét egy ezidáig nem vizsgált tulajdonság – az egymás mellett megjelenő színek egymáshoz képesti illeszkedése – alapján minősítő, vizuális megfigyelések alapján kifejlesztendő és azokkal megfelelő korrelációt mutató metrika kidolgozása.
2. A fényforrások színilleszkedés alapján való értékeléséhez az egymás mellett megjelenő színek illeszkedésének jóságát egy teszt és egy hozzá tartozó referencia látási szituációban előre kell jelezni. Ehhez olyan matematikai formulák szükségesek, amelyek előre adott színkombinációk vizuális illeszkedését egy adott fényforrás alatti megjelenés esetén becsülni tudják. A szakirodalomban ezidáig egy ilyen formula (Ou

és szerzőtársai) ismert, azonban a formula meghatározásához szükséges vizuális kísérleteket távol-keleti megfigyelőkkel végezték, továbbá a CIECAM02 színmegjelenési modell az Ou által alkalmazott CIELAB színingertérnél jóval pontosabb színinger leírást tesz lehetővé. Ezek miatt olyan színilleszkedési modellek kifejlesztésére van szükség, amelyek a vizuális színilleszkedés pszicho-fizikai korrelátumát szolgáltatják.

3. A kifejlesztett színilleszkedési modellek összevetése értékes információt szolgáltathat a távol-keleti megfigyelőkkel végzett kísérletek vizuális eredményei és a dolgozatban bemutatásra kerülő színilleszkedési kísérletek eredményei tekintetében.
4. A bevezetésre kerülő színilleszkedési index alapján színekpi optimalizálással olyan fényforrás színek állítható elő, amely az eddig nem vizsgált tulajdonság – a vizuális színilleszkedés – tekintetében a felhasználó számára a jelenlegi fényforrásoknál optimálisabb vizuális eredményeket szolgáltathat.

3. A KUTATÁS MÓDSZEREI

A kutatás első lépéseként a színilleszkedési észlelet fényforrások általi befolyásolását kellett igazolnom. Az előkísérleteket sötétszobában valós fényforrásokkal és reflexiós tesztmintákkal fénydobozban, valamint ennek a látási szituációnak a katódsugárcsőves monitoron történt szimulációjával végeztem el. A fényforrások színekpi teljesítményeloszlását, a tesztminták reflexióját spektro-radiométer segítségével mértem. A színhelyes megjelenítés érdekében a katódsugárcsőves monitor karakterizációját végeztem el a kísérleti sorozat megkezdése előtt. A pszicho-fizikai kísérletek lefolytatásához a megfigyelőket előre meghatározott kor és nem szerinti eloszlásban választottam ki, majd színlátásukat a Munsell-Farnsworth 100 Hue teszt segítségével ellenőriztem. A megfigyelők a vizuális kísérletek előtt tréningen vettek részt, mely során a kísérletek elvégzéséhez szükséges alapvető szintani alapfogalmakat elsajátították. A kísérletek során kétféle skálázási módszert alkalmaztam:

1. közvetlen értékelés a -5...0...+5 skálán, ahol a legkedvezőtlenebb vizuális illeszkedést a -5, a legkedvezőbb vizuális illeszkedést +5 skálaelem jelenti.
2. referencia állapottal történő közvetlen összehasonlítás: Az egyszerre megfigyelt, kétféle színi megjelenés közül a kedvezőbb megjelenéshez 1 pont adható, a kedvezőtlenebb megjelenéshez 0 pont úgy, hogy egy összehasonlítandó színi megjelenés pár esetén a referencia és teszt állapotra összesen 1 pontot kell kiosztani.

Két, három és több színingerből álló színekombinációk színi megjelenésének változását figyeltem meg a megvilágító színeképi teljesítmény eloszlásának változtatásakor. Vizuális kísérletek segítségével igazoltam, hogy rögzített színekombinációk megjelenését megfigyelve mesterséges fényforrások esetén egy referencia megvilágításhoz képest a megfigyelő vizuális színilleszkedési ítélete torzulásokat szenvedhet. Ennek lehetséges okát grafikus úton mutattam meg.

A színilleszkedés alapján minősítő fényforrás színminőségi metrika definiálásához szükséges az egyes színekombinációk által kiváltott színilleszkedési észlelet pszicho-fizikai korrelátumának meghatározása. A színilleszkedés torzulását ezután külön kísérletsorozattal vizsgáltam. A színekombinációkat a CIECAM02 színmegjelenési modell mintavételezésével állítottam elő oly módon, hogy a modellből kiválasztott elsődleges színingereket minden önmagától eltérő elsődleges színingerrel kombináltam. A kísérleti eredmények kiértékelésekor Kolmogorov-Szmirnov próba segítségével megvizsgáltam a minta eloszlását, majd Levene próba segítségével a varianciák homogenitását. Ezután a színekombinációk észleleti tényezőinek hatását a színilleszkedési ítéletre varianciaanalízis segítségével vizsgáltam. A színilleszkedési ítéletre hatást gyakorló észleleti tényezők esetén regresszióval nyert egyenletek felhasználásával négy különböző – a tesztminták számától és tulajdonságaitól függő – színilleszkedési modellt fejlesztettem ki, amelyek a két vagy három színingerből álló színekombinációk színilleszkedési mértékét becslik, adott látási szituáció mellett. Ezek a formulák egy adott megvilágítás esetén felépülő vizuális színilleszkedési észlelet pszicho-fizikai korrelátumát szolgáltatják. A színilleszkedési észlelet becslések egyes fényforrások esetén bekövetkező változásai alapján bevezettem a színilleszkedési indexet.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Kísérletileg igazoltam, hogy egymás mellé helyezett két, három illetve több színingerből álló színekombinációk esetén a színekombinációt alkotó színingerek vizuális illeszkedése megváltozhat, amennyiben a színekombinációk különböző megvilágítók alá kerülnek. (6.1. fejezet) [P2, P4]
2. Kísérletekkel megmutattam, hogy ún. szisztematikus színi eltolódások esetén az egymás mellett megfigyelt színek vizuális illeszkedésének változása nem szignifikáns. Nem szisztematikus színi eltolódások esetén (amikor az elmozdulás különböző irányú és nagyságú vektorok mentén történik) a vizuális illeszkedés szignifikáns mértékben torzulhat. Kísérletileg igazoltam, hogy az észleleti tényezők közül a vizuális

illeszkedés a króma menti nem szisztematikus eltolódásokra a legérzékenyebb. (6.2. fejezet) [P4]

3. Kísérletek segítségével igazoltam, hogy az egymás mellett megfigyelt színek vizuális illeszkedésének pszicho-fizikai korrelátuma meghatározható olyan mennyiségként, amely a CIECAM02 színmegjelenési modell észleleti tényezőinek függvénye. A CIECAM02 színmegjelenési modell alapú vizuális illeszkedést előrejelző modellek egyben alkalmasak az eltérő megvilágító, látótérben változó fehérpont vagy a látási szituáció megváltozása miatt bekövetkező vizuális illeszkedés változásának leírására. (6.3 és 7.3 fejezet) [P1]
4. Vizuális kísérletek alapján olyan új mérőszámot definiáltam, amely a fényforrások színminőségét a fényforrás alatt tapasztalható, egymás mellé helyezett színingerek vizuális illeszkedésének valamely referencia látási szituációhoz képesti megváltozásával jellemzi. (8. fejezet) [P2, P5]
5. Számítások alapján olyan algoritmust fejlesztettem, amely a bemeneti színeképi teljesítmény-eloszlást hullámhossz tartományokhoz tartozó szorzótényezők segítségével a színilleszkedési index értékelése szerint optimalizálja. (8.4. fejezet) [P2]

5. AZ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ALKALMAZÁSA

A színilleszkedési index jelenleg is szerepel a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE) TC1-69 technikai bizottságának programjában, mint a jelenlegi színvisszaadási index-et kiegészítő egyik lehetséges metrika. Az új színminőségi metrika a jelenlegi vagy megújított színvisszaadási index mellett kiegészítésül szolgálhat a fényforrás gyártók számára, fényforrásaik színeképi teljesítmény eloszlásának meghatározásakor.

6. PUBLIKÁCIÓS LISTA

A DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK NEMZETKÖZI FOLYÓIRATBAN:

- [P1] **F. Szabó**, P. Bodrogi, J. Schanda: Experimental Modelling of Colour Harmony, Color Research and Application 2010, 35:1, 34-49, 10.1002/col.20558, ISSN: 0361-2317, Online ISSN: 1520-6378, impakt faktor: 0,825 (2009)
- [P2] **F. Szabó**, P. Bodrogi, J. Schanda: A Colour Harmony Rendering Index based on new Colour Harmony Formulae, Lighting Research and Technology 2009 41: 165-182, Online ISSN: 1477-0938 Print ISSN: 1477-1535, impakt faktor: 1,252 (2009)

TÉZISEKHEZ KÖZVETLENÜL KAPCSOLÓDÓ REFERÁLT, HAZAI ÉS NEMZETKÖZI KONFERENCIÁK KIADVÁNYAIBAN (PROCEEDINGS-EK) MEGJELENT DOLGOZATOK:

- [P3] **F. Szabó**, P. Bodrogi, J. Schanda: Comparison of Colour Harmony Models: Visual Experiment with Reflecting Samples Simulated on a Colour CRT Monitor, (CGIV 2006, Leeds, UK)
- [P4] **F. Szabó**, J. Schanda, P. Bodrogi: Experimental Investigation of the Distortion of Colour Harmony, (AIC International Conference on Colour Harmony, Budapest, Hungary, 2007)
- [P5] **F. Szabó**, P. Bodrogi, J. Schanda: Visual Experiments on Colour Harmony: A Formula and a Rendering Index, (The 26th Session of the CIE, Beijing, China, 2007)
- [P6] **F. Szabó**, J. Schanda, P. Bodrogi, E. Radkov: A Comparative Study of New Solid State Light Sources, (The 26th Session of the CIE, Beijing, China, 2007)

TÉZISEKHEZ KÖZVETLENÜL KAPCSOLÓDÓ TOVÁBBI KONFERENCIÁKON ELHANGZOTT ELŐADÁSOK:

- [K1] **F. Szabó**, P. Bodrogi, J. Schanda: Colour harmony impression of young and aged observers, AIC2008, Stockholm, Sweden

DOLGOZATHOZ KAPCSOLÓDÓ TOVÁBBI IDEGEN NYELVŰ KONFERENCIÁKON TARTOTT ELŐADÁSOK:

- [K2] P. Bodrogi, **F. Szabó**, P. Csuti, J. Schanda: Why does the CIE Colour Rendering Index fail for white RGB LED light sources? (CIE Expert Symposium on LED Light Sources, 2004 Tokyo, Japan)
- [K3] **F. Szabó**, N. Sándor, P. Bodrogi, J. Schanda: Colour rendering of white LED light sources: Visual experiment with colour samples simulated on a colour monitor (International Lighting Congress and CIE Midterm meeting 2005 Leon, Spain)
- [K4] J. Schanda, G. Madár, N. Sándor, **F. Szabó**: Colour rendering – colour acceptability, 6th International Lighting Res. Symp. On Light and Colour, Florida, Feb. 2006
- [K5] **F. Szabó**: Investigation of colour harmony, *4th PhD-Mini-Symposium*, Veszprém, June 2006
- [K6] **F. Szabó**: Comparison of colour harmony models, CREATE: Managing Colours in Digital Processes & the Art, 2007, Bristol, UK
- [K7] **F. Szabó**: Visual Experiments on Colour Harmony: A Formula and a Rendering Index, *5th PhD-Mini-Symposium*, Veszprém, June 2007
- [K8] **F. Szabó**: Colour harmony impression of young and aged observers, CREATE: Putting the human back into colour, 2008, Charleville-Mézières, France
- [K9] I. Rozsovit, **F. Szabó**: Investigation of uniform colour scales in different colour systems, CREATE: Putting the human back into colour, 2008, Charleville-Mézières, France
- [K10] **F. Szabó**: Comparison of classical and modern theories of colour harmony, *6th PhD-Mini-Symposium*, Veszprém, June 2008

- [K11] **F. Szabó**, P. Bodrogi, J. Schanda: Experimental Investigation of Distortion of Colour Harmony: A Harmony Distortion Index, CGIV2008, Terrassa, Spain
- [K12] **F. Szabó**, P. Csuti, J. Schanda: Colour Preference under Different Illuminants: New Approach of Light Source Colour Quality, CIE Light and Lighting Conference 2009, Budapest, Hungary
- [K13] **F. Szabó**, I. Rozsovits: Investigation of Uniform Colour Scales in Different Colour Order Systems, 11th Congress of the International Colour Association (AIC), 27.Sept – 02.Oct 2009, Sydney, Australia
- [K14] **F. Szabó**, S. Sueeprasan, R. Malkovics, P. Ngammaneeewat: Towards a Culture Dependent Model of Colour Harmony, 11th Congress of the International Colour Association (AIC), 27.Sept – 02.Oct 2009, Sydney, Australia

DOLGOZATHOZ KAPCSOLÓDÓ TOVÁBBI MAGYAR NYELVŰ KONFERENCIÁKON TARTOTT ELŐADÁSOK:

- [K15] **F. Szabó**, P. Bodrogi: Színharmónia modellek vizsgálata, Lux et Color Vespremiensis 2005, Veszprém, Hungary
- [K16] **F. Szabó**, P. Bodrogi: A színharmónia modellezése (Modelling colour harmony), Lux et Color Vespremiensis 2006, Veszprém, Hungary
- [K17] I. Rozsovits, **F. Szabó**: Egyenletes színskálák vizsgálata különböző színrendszerekben, Lux et Color Vespremiensis 2008, Veszprém, Hungary
- [K18] **F. Szabó**, S. Sueeprasan, R. Malkovics, P. Ngammaneeewat: Útban egy kultúrafüggő színharmónia modell felé, XXXII. Kolorisztikai Szimpózium, 2009. május 11-13 Eger, Magyarország

TOVÁBBI PUBLIKÁCIÓK (2011 JANUÁRIG):

- [K19] I. Zilizi, **F. Szabó**, I. Rozsovits, P. Bodrogi, J. Schanda: Comparison of Classical and Modern Theories of Colour Harmony, AIC2008, Stockholm, Sweden
- [K20] Z. Vas, **F. Szabó**, J. Schanda: A fényforrás spektrumának hatása a látásélességre a mezopos fénysűrűségi tartományban, Elektrotechnika, 2010/3. szám, 17-19. oldal, ISSN: 0367-0708
- [K21] T. Benyhe, **F. Szabó**: Intelligens LED-es beltéri világításvezérlés, Elektrotechnika, 2011/1. szám, 14-17. oldal, ISSN: 0367-0708
- [K22] O. da Pos, Sergio C. Masin, S. Gori, R. Bellacosa Mariotti, F. Chiarelli, L. F. Cuturi, M. Maniglia, **F. Szabó**: Lightness constancy under achromatic filters, 11th Congress of the International Colour Association (AIC), 27.Sept – 02.Oct 2009, Sydney, Australia, ISBN 1 877040 76 2
- [K23] **F. Szabó**, Z. Vas, J. Schanda: Investigation of the effect of light source spectra on visual acuity at mesopic lighting conditions, CIE Light and Lighting Conference 2010, Vienna, Austria
- [K24] **F. Szabó**: New metric on light source colour quality: colour harmony rendering index, CREATE: Final conference, 2010, Gjøvik, Norway
- [K25] **F. Szabó**, Z. Vas, P. Csuti, J. Schanda: Experimental investigation of the Purkinje effect in case of traditional and modern light sources, Lumen v4 conference, 2010, Brno, Czech Republic
- [K26] **F. Szabó**, Zs. Kosztyán, J. Schanda: Testing Colour Sample Datasets for calculating Colour Rendering Indices, 2nd CIE Expert Symposium on Appearance - When appearance meets lighting, 2010, Gent, Belgium

- [K27] **F. Szabó**, Z. Vas, P. Csuti, J. Schanda: The Spectral Power Distribution Dependence of the Purkinje effect, 2nd CIE Expert Symposium on Appearance - When appearance meets lighting, 2010, Gent, Belgium
- [K28] **F. Szabó**, Z. Vas, J. Schanda: Látásélesség változása mezopos fénysűrűségek esetén, Lux et Color Vesprimiensis 2009, Veszprém, Hungary
- [K29] **F. Szabó**: LED lighting in enhancing and preserving our cultural colour heritage, CREATE: Colour Heritage and Conservation, 2009, Gargnano, Italy
- [K30] Schanda J., **Szabó F.**, Csuti P., Vas Z.: Éleslátás mezopos körülmények között, Látás szimpózium, 2009, Szeged
- [K31] Z. Vas, **F. Szabó**, J. Schanda: A fényforrás spektrumának hatása a látásélességre a mezopos fénysűrűségi tartományban, LED konferencia, 2010.02.24-26, Budapest, Hungary
- [K32] **F. Szabó**, G. Sárvári, K. Tóth, L. Balázs, J. Schanda: Új módszer a fényforrások által okozott színharmónia torzítás vizsgálatára, Lux et Color Vesprimiensis 2010, Veszprém, Hungary
- [K33] Csuti P., Poppe A., Molnár G., **Szabó F.**, J. Schanda: LED-ek élettartam vizsgálata, Lux et Color Vesprimiensis 2010, Veszprém, Hungary
- [K34] **Szabó F.**, Schanda J.: LED színek optimalizálás a színhőmérséklet és a cirkadián hatás figyelembevételével, II. LED konferencia, 2011.02.01-02, Budapest
- [K35] N. Vidovszky Á. Schanda J., **Szabó F.**: LED színek optimalizálás a cirkadian hatás figyelembevételével, II. LED konferencia, 2011.02.01-02, Budapest
- [K36] Csuti P., Poppe A., Molnár G., **Szabó F.**, Schanda J.: LED-ek élettartam vizsgálata, II. LED konferencia, 2011.02.01-02, Budapest
- [K37] **Szabó F.**, Schanda J.: Észlelt világosság vizsgálata LED-es közvilágítás esetén, XLII. Közvilágítási Ankét, Sárospatak, 2011. május 19-20.
- [K38] Csuti P., **Szabó F.**, Schanda J.: LED-ek élettartam vizsgálata, XLII. Közvilágítási Ankét, Sárospatak, 2011. május 19-20.

A DOLGOZAT BEADÁSAKOR KÖZLÉSRE ELFOGADOTT PUBLIKÁCIÓK:

- [K39] **F. Szabó**, G. Sárvári, K. Tóth, L. Balázs, J. Schanda: A new method for investigating colour harmony distortion of light sources, 27th CIE Session, 2011, Sun City, South Africa
- [K40] Zs. Kosztyán, **F. Szabó**, G. Sárvári, J. Schanda: Sample selection for a colour fidelity index, 27th CIE Session, 2011, Sun City, South Africa
- [K41] M. R. Luo, Yi-Fan Chou, Zs. Kosztyán, **F. Szabó**, G. Sárvári, J. Schanda: A Dataset for Evaluating Colour Rendering Property of Lamps, 27th CIE Session, 2011, Sun City, South Africa
- [K42] A. Poppe, G. Molnár, P. Csuti, **F. Szabó**, J. Schanda: Ageing of LEDs: a comprehensive study based on the LM80 standard and thermal transient measurements, 27th CIE Session, 2011, Sun City, South Africa