

Metaméria és színkonstancia előidézése festett felületeken RGB LED megvilágítás alkalmazásával

Generation of metamerism and color constancy on painted surfaces using RGB LED illumination

Sándor Alexandra, Dr. Samu Krisztián

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

1111 Budapest Műegyetem rakpart 3., +36 1 463-1111, +36 1 463-1110, info@bme.hu, www.bme.hu

Abstract

In addition to the reflective properties of the surface, color perception also depends on the spectral composition of the illumination and the position of the observer, which can lead to the phenomena of metamerism and color constancy. During the study, the spectral reflection of painted samples was analyzed under variable RGB LED illumination. The aim was to minimize color differences and investigate the possibility of inducing metamerism. The results confirmed that, with the help of measurements and mathematical modeling, the perceived color of the samples can be specifically influenced by changing the parameters of the light source.

Keywords: metamerism, color constancy, spectral reflection, spectral power distribution, LED light source

Kivonat

A színészlelés a felület reflexiós tulajdonságain túl a megvilágítás spektrális összetételétől és a megfigyelő helyzetétől is függ, ami a metaméria és a színkonstancia jelenségeihez vezethet. A vizsgálat során festett minták spektrális reflexiója került elemzésre változtatható beállítású RGB LED megvilágítás mellett. A cél a színingerkülönbségek minimalizálása és a metaméria előidézhetőségének vizsgálata volt. Az eredmények igazolták, hogy mérések és matematikai modellezés segítségével a minták észlelt színe a fényforrás paramétereinek változtatásával célzottan befolyásolható.

Kulcsszavak: metaméria, színkonstancia, spektrális reflexió, spektrális teljesítményeloszlás, LED fényforrás

1. BEVEZETÉS

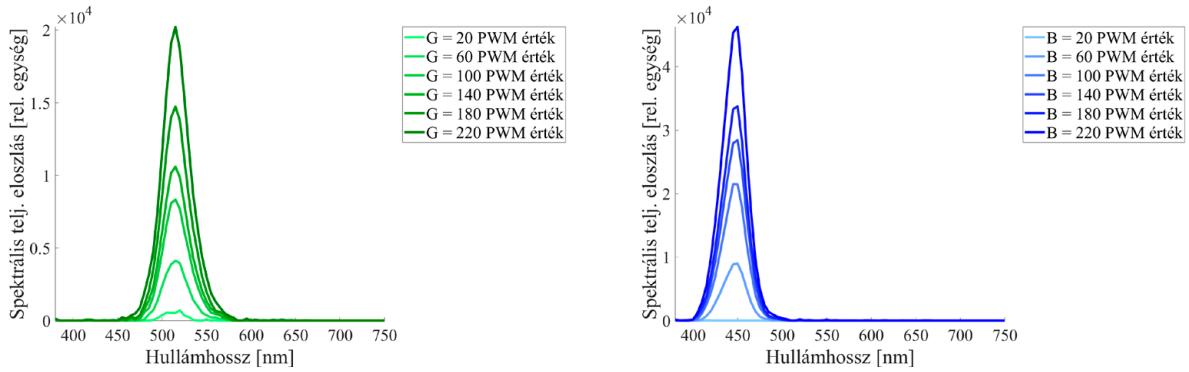
A színészlelés komplex jelenség, amely nem kizárólag a vizsgált felület spektrális reflexiós tulajdonságaitól, hanem a megvilágítás spektrális teljesítményeloszlásától és a megfigyelő helyzetétől is függ. Ennek következtében jelenhet meg a metaméria és a színkonstancia jelensége, amelyek a színinger azonosságát, illetve állandóságát írják le eltérő megvilágítások mellett. E jelenségek a minőségellenőrzés és a vizuális megjelenítés területén kiemelt jelentőséggel bírnak. A korszerű, spektrálisan hangolható LED fényforrások lehetővé teszik a megvilágítás spektrális összetételének kontrollálható változtatását, ezáltal alkalmas eszközt biztosítanak a metaméria mesterséges előidézésének vizsgálatához. Jelen tanulmány célja annak elemzése, hogy festett felületek eltérő spektrális reflexiós tulajdonságai mellett, egy egyszerű RGB LED reflektor beállításainak változtatásával előállíthatók-e metamer színpárok. A vizsgálat méréseken, matematikai modellezésen és szintani számításokon alapul, amelyek segítségével a színingerkülönbségek számszerűen értékelhetők.

2. FÉNYKIBOCSÁTÓ DIÓDÁK MŰKÖDÉSE

A fénykibocsátó dióda (Light Emitting Diode, röviden LED) olyan félvezető eszköz, amely az elektromos energiát közvetlenül fénné alakítja. A fény kibocsátását az elektrolumineszcencia jelensége magyarázza. A LED fényforrás fényerőssége impulzusszélesség-modulációval (Pulse-Width Modulation, röviden PWM) szabályozható, amely során adott frekvencián történő ki- és bekapcsolással a fényforráson átfolyó effektív áram, ezáltal a kibocsátott fény intenzitása változik. Az RGB LED reflektor három csatornája (Vörös – Red, röviden R, Zöld – Green, röviden G, Kék – Blue, röviden B) digitálisan 0–255 intenzitás tartományban vezérelhető, így

több mint 16 millió spektrális teljesítményeloszlás kombináció állítható elő vele. A 0 érték a csatorna kikapcsolt állapotának, míg a 255 az adott csatorna maximális PWM kitöltési tényezőjének felel meg, a köztes értékek pedig a fényerő arányos, normalizált szabályozását reprezentálják.

A mérések során az egyes csatornák spektrális teljesítményeloszlásai kerültek bemérésre, külön-külön és együttesen is, 0-tól 10-ös lépésközzel növelve (a maximális, 255-ös értéket is beleértve). A mért adatok kirajzolása után láthatóvá vált, hogy az intenzitásértékek növelésével a spektrális teljesítményeloszlások valamilyen szabályszerűség szerint változnak. Ez a jelenség várható volt, mivel az RGB LED-ek esetében a spektrális teljesítményeloszlás és az intenzitás közötti kapcsolat jellemzően nemlineáris, ugyanakkor folytonosan változó függvénnyel írható le. [1]



1. ábra. A zöld (G) és kék (B) csatorna spektrális teljesítményeloszlásai a PWM beállítás függvényében (40-es lépésközzel)

3. DIÓDÁK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

A mérések során nem került sor az összes lehetséges spektrális teljesítményeloszlás mérésére, mivel azok teljes körű mérése rendkívül idő- és erőforrásigényes lett volna. Emiatt, valamint a későbbi számítások egyszerűsítése érdekében, szükségessé vált egy olyan matematikai eljárás kidolgozása, amellyel előállíthatók azon PWM értékekhez tartozó spektrumok is, amelyek nem kerültek közvetlenül bemérésre.

A mért adatok kirajzolása alapján jól megfigyelhető, hogy a PWM értékének növelésével a spektrális teljesítményeloszlások szabályszerűen változnak. A kapcsolat pontos jellegének feltárása érdekében statisztikai módszerekkel görbeillesztések kerültek elvégzésre. Kétféle modell került vizsgálatra, a szinuszok összege, illetve a Gauss-modell, mivel ezek karakterisztikája hasonlított leginkább a kapott spektrális teljesítményeloszlások alakjára.

A szinuszok összegének modellje jól illeszkedik periodikus függvényekre, és a matematikai alakja a következő [2]:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin(b_i \cdot x + c_i) \tag{1}$$

ahol:

- a_i az amplitúdó
- b_i a frekvencia
- c_i a fáziskonstans
- n a tagok száma, ahol $1 \leq n \leq 8$

A Gauss-féle modell csúcspontú adatok illesztésére alkalmas, és az alábbi matematikai összefüggéssel írható le [3]:

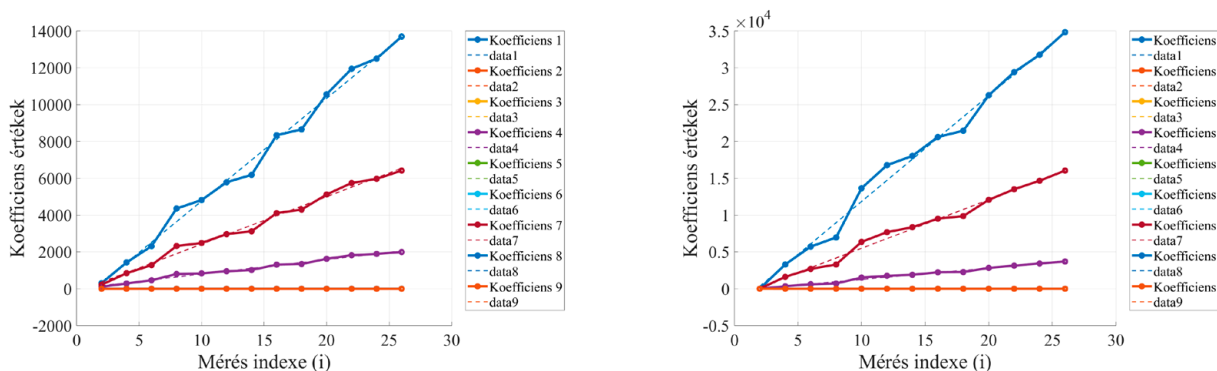
$$y = \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2} \tag{2}$$

ahol:

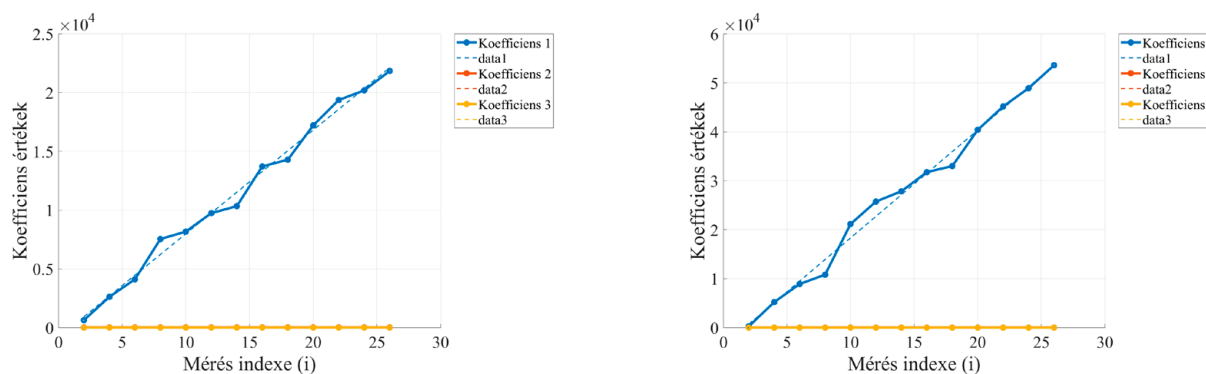
- a_i az amplitúdó

- b_i a csúcs helye (centruma)
 c_i a csúcs szélességével arányos paraméter
 n az illesztett csúcsok száma, ahol $1 \leq n \leq 8$

A görbeillesztések MATLAB-ban kerültek végrehajtásra a fit() függvény segítségével. Az illesztési eljárás során először az egyes modellek segítségével meghatározásra kerültek az adott spektrális teljesítményeloszlásokhoz tartozó illesztett görbék, majd ezt követően ábrázolásra került, hogy a modellek együtthatói miként változnak a PWM kitöltési tényező növelésével.



2. ábra. Szinuszos összege modellre kapott együtthatókra illesztett trendvonalak, a zöld (G) és a kék (B) csatorna esetén



3. ábra. Gauss-féle modellre kapott együtthatókra illesztett trendvonalak, a zöld (G) és kék (B) csatorna esetén

Az együtthatók ábrázolása alapján mindkét modell esetében az amplitúdót leíró paraméterek mutatták a legnagyobb mértékű változást, ráadásul a PWM kitöltési tényező növekedésével közel lineáris jelleg volt megfigyelhető. Ennek megfelelően ezekre az együtthatókra lineáris trendvonalak kerültek illesztésre. A többi paraméter változása elhanyagolhatónak bizonyult, ezért azok a továbbiakban konstansként kerültek kezelésre.

A kapott egyenletek segítségével lehetővé vált, hogy csupán az egyes csatornákhöz tartozó PWM értékek megadásával megkapjuk az adott beállításhoz tartozó spektrális teljesítményeloszlást.

Ezt követően a matematikai úton előállított görbék összehasonlításra kerültek az azonos PWM beállítások mellett végzett mérések eredményeivel. A görbeillesztések pontosságának értékelése a determinációs együttható (R^2) segítségével történt. Az R^2 érték azt fejezi ki, hogy az illesztett görbe milyen mértékben illeszkedik az eredeti adatsorhoz. Az érték 0 és 1 közé esik és minél közelebb van az 1-hez, annál pontosabbnak tekinthető az illesztés.

Az R^2 általános képlete a következő:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

ahol:

- y_i az i -edik mért érték
 \hat{y}_i az i -edik modell által illesztett érték

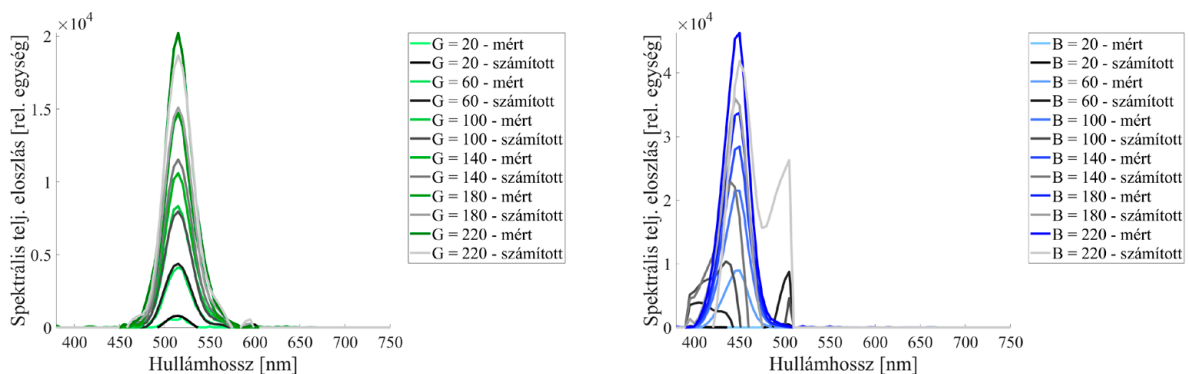
\bar{y} a mért értékek átlaga

n a mért adatok száma

A szinuszos modell esetén az illesztéshez háromtagú modell került alkalmazásra ($n = 3$). Az illesztések a vörös (R) és zöld (G) csatornák esetében sikeresnek tekinthetők, azonban a kék komponensnél nem sikerült megfelelő illesztést elérni. A kék (B) csatorna esetében az illesztett és a mért spektrális teljesítményeloszlás karakterisztikája jelentős mértékben eltért egymástól, ezért a szinuszos modell nem alkalmazható teljeskörűen a fényforrás összes komponensére.

Görbeillesztések pontossága R^2 determinációs együttható alkalmazásával, szinuszos illesztés esetén 1. táblázat

LED dióda elnevezése	Illesztés pontossága [%]
Red	96,16
Green	96,56
Blue	50,91

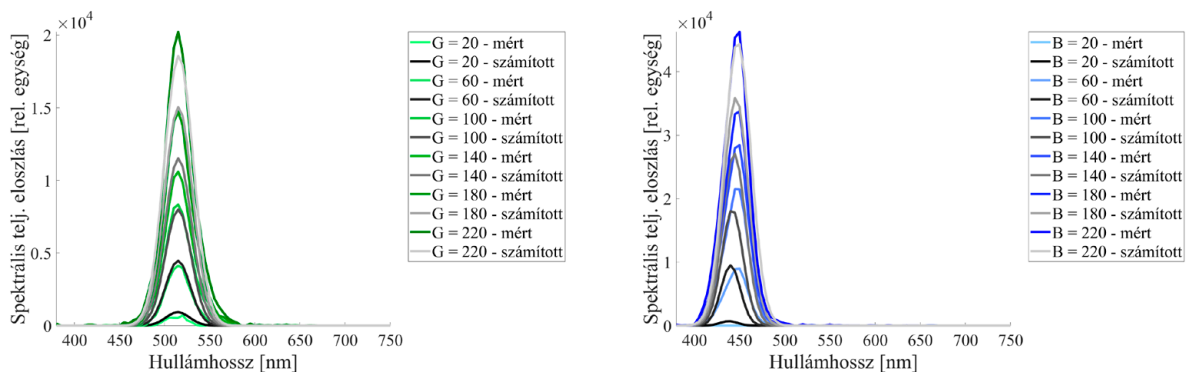


4. ábra. A mért és az új módszerrel számított spektrális teljesítményeloszlások összehasonlítása különböző PWM értékek mellett (40-es lépésközzel), a zöld (G) és kék (B) csatornák esetében, szinuszos illesztés esetén

A Gauss-féle illesztés esetében az eredmények minden komponensnél megfelelő pontosságot mutattak, a görbék karakterisztikája jól követte a mért spektrális teljesítményeloszlásokat, így ez a modell alkalmasnak bizonyult a teljes sugárzási spektrum matematikai leírására.

Görbeillesztések pontossága R^2 determinációs együttható alkalmazásával, Gauss-féle illesztés esetén 2. táblázat

LED dióda elnevezése	Illesztés pontossága [%]
Red	96,53
Green	95,63
Blue	92,58



5. ábra. A mért és az új módszerrel számított spektrális teljesítményeloszlások összehasonlítása különböző PWM értékek mellett (40-es lépésközzel), a zöld (G) és kék (B) csatornák esetében, Gauss-féle illesztés esetén

4. METAMER SZÍNPÁROK KERESÉSE

Ezt követően vizsgálatra került, hogy a 33 darab különböző spektrális reflexiójú festett minta és a modellezett fényforrás kombinációjával előállíthatók-e metamer színpárok. Az ellenőrzésre szintén MATLAB-ban került sor. Annak érdekében, hogy megállapítható legyen, hogy előállíthatóak-e metamer színpárok a jelenlegi festett mintákkal és a rendelkezésre álló fényforrással, végig kellett nézni az összes esetet. Az elkészült kód végigiterál az összes lehetséges fényforrás beállításon, illetve minden elérhető színmintát összehasonlít az összes többivel is.

A kódban elsőként kiszámításra kerülnek az adott spektrális teljesítményeloszlásra a CIE XYZ színösszetevők, majd ezt követően a CIELAB értékek. [4] A CIELAB kiszámítása előtt még szükség volt a X_n , Y_n és Z_n referenciafehér értékek meghatározására is. Ezek úgy kaphatók meg, hogy a vörös (R), zöld (G) és kék (B) csatornák maximális (255-ös) PWM értékre kerülnek beállításra, majd a kapott spektrális teljesítményeloszlás értékei egy, a CIE által definiált egyenletbe kerülnek behelyettesítésre.[4]

Ezt követően kiszámításra kerültek az $L^*a^*b^*$ színkoordináták is, amelyek utána színingerkülönbség számításra kerülnek összehasonlításra, majd osztályozásra.

A színingerkülönbség számítás két színinger közötti eltérést számszerűsíti a színérzékelés szempontjából. A számítás során a CIELAB térben definiált két színinger közötti euklideszi távolság kerül kiszámításra, és ez alapján határozható meg, hogy mekkora a szemmel észlelhető különbség a két színinger között. [4] A matematikai leírása következő:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

ahol:

- ΔL^* a világosságkülönbség,
- Δa^* a vizsgált színek közti vöröses vagy zöldes mértékek közti különbség
- Δb^* a vizsgált színek közti kékes vagy sárgás mértékek közti különbség

Számos kutatás foglalkozott különböző anyagok (pl. fogak, kerámiák, műgyanták, bőrreplikációk) esetén a színingerkülönbségek észlelhetőségi (perceptibility threshold, röviden PT) és elfogadhatósági (acceptability threshold, röviden AT) küszöbértékeinek meghatározásával, vizuális és digitális mérési módszerek alkalmazásával. [5] [6] Az eredmények azt mutatták, hogy a PT és AT küszöbértékek anyagtól, mérési módszertől és értékelési környezettől függően változnak. A különbségek ellenére a kapott PT küszöbértékek jellemzően $\Delta E_{ab}^* = 0,8-2,0$ tartományba estek, míg az AT értékek tipikusan $\Delta E_{ab}^* = 2,5-5,5$ közé estek, az anyagtól és a vizsgálati körülményektől függően. Mivel az emberi szem képes a színadaptációra, azaz automatikusan igazítja a receptorai érzékenységét a környezeti fényviszonyokhoz, a megfelelőség küszöbértéke a korábbi kutatásokban javasoltnál magasabbnak lett meghatározva. [7] Ez alapján azok a fényforrás beállítások és színminta párok bizonyultak megfelelőnek, amelyek esetén $\Delta E_{ab}^* < 5$.

Brute-force módszerrel (minden lehetséges opció megvizsgálásával) került ellenőrzésre az, hogy milyen beállítások mellett hozható létre a metamer színpárok. Azok a fényforrás beállítások, illetve színminta párok, amelyek küszöbérték alatti eredményt adtak, elmentésre kerültek egy táblázatba.

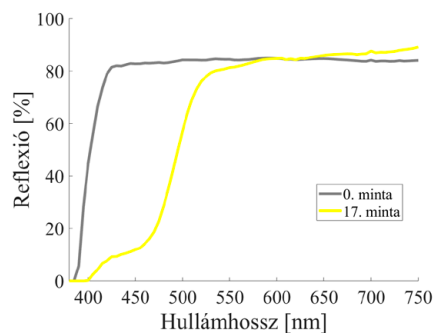
A MATLAB-ban elvégzett elméleti számítás pozitív eredményt hozott, mivel a 33 rendelkezésre álló minta közül 13 esetben volt lehetséges egy másik mintával párosítva metamer színpárok létrehozása. Ez persze jelentősen kevesebb, mint a rendelkezésre álló minták mennyisége, viszont az elmaradást nem a fényforrás által létrehozható spektrális teljesítményeloszlások mennyisége, hanem a festett minták reflexiós tulajdonságai okozták. Ugyanis a minták elkészítéséhez használt festékek többsége nagy tisztaságú volt, tehát egyetlen erősen domináns reflexiós csúccsal rendelkeztek, míg a spektrum további tartományaiban alig mutattak fényvisszaverést. Ez a tulajdonság a jelen alkalmazás szempontjából kedvezőtlen, mivel a metaméria előállítása két minta között akkor lehetséges, ha mindkét minta többféle hullámhosszon is jelentős reflexiót mutat. Ezért a jövőben célszerű lenne új festékkeverékekkel és új mintákkal is kísérletezni.

5. KONKLÚZIÓ

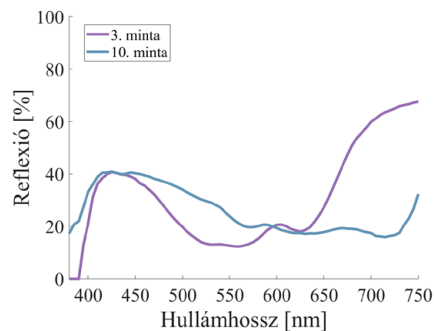
A vizsgálatok során kimutatható volt, hogy az előre elkészített festett minták és az RGB LED reflektor kombinációjával metamer színpárok előállítása lehetséges. A számítások egyszerűsítése céljából matematikailag modellezésre kerültek a fényforráshoz tartozó csatornák, így lehetővé vált, hogy csupán az egyes csatornákhöz tartozó PWM értékek megadásával megkapjuk az adott beállításhoz tartozó spektrális teljesítményeloszlást.

Az elméleti számítások és a brute-force módszerrel végzett vizsgálat eredményeként a 33 vizsgált minta közül 13 esetben sikerült metamer színpárokat létrehozni. A korlátozott előfordulás a festett minták spektrális reflexiós tulajdonságaiból adódott, mivel a minták többsége egyetlen domináns reflexiós csúccsal rendelkezett,

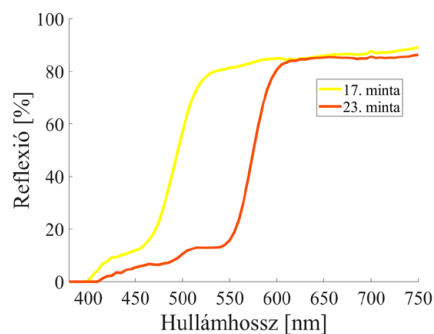
viszont a metaméria előállítása két minta között akkor lehetséges, ha mindkét minta többféle hullámhosszon is jelentős reflexiót mutat.



0. minta		17. minta	
R	G	B	
245	5	5	
ΔE			
4,14			



3. minta		10. minta	
R	G	B	
0	0	5	
ΔE			
3,82			



17. minta		23. minta	
R	G	B	
255	0	5	
ΔE			
2,19			

6. ábra. Metamer színpárokat alkotó minta párok spektrális reflexiói (balra), valamint a fényforrás RGB csatornához tartozó PWM digitális intenzitások és a két minta közötti számított ΔE értékek (jobbra)

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnénk köszönetet mondani Boruzs Ádám festőművésznek, aki biztosította számunkra a vizsgálatokhoz szükséges festett mintákat.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Rugved Kore, Dorukalp Durmus: *Curve-Fitting Correction Method for the Nonlinear Dimming Response of Tunable SSL Devices*. Technologies, 11(6), 162, 2023. DOI: 10.3390/technologies11060162
- [2] MathWorks: *Sum of Sine Model*. Elérhető: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/sum-of-sine.html> (Utolsó megtekintés: 2025. november 3.)
- [3] MathWorks: *Gaussian Model*. Elérhető: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/gaussian.html> (Utolsó megtekintés: 2025. november 3.)
- [4] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE): *CIE 15:2004 – Colorimetry*, 3rd Edition. Vienna: CIE Central Bureau, 2004. ISBN 3-901-906-33-9.
- [5] Analysis of Colour Differences Obtained by Acceptability and Perceptibility Threshold (Visual Method): Review. *Mustansiria Dental Journal*, 19(2), 280–289, 2023. <https://doi.org/10.32828/mdj.v19i2.900>
- [6] Kurt M., Nemli S. K., Güngör M. B., Bal B. T., Öztürk E.: Perceptibility and acceptability thresholds for color differences of light and dark maxillofacial skin replications. *Vision Research*, 223, 108474, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2024.108474> (Utolsó megtekintés: 2026. február 15.)
- [7] Dr. Ábrahám Gy., Dr. Wenzelné Geröfy K., Dr. Antal Á., Dr. Kovács G.: *Műszaki optika*. BME MOGI Tanszék, 2014. ISBN 978-963-313-202-9.