

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

DOMBI ZOLTÁN
TDK DOLGOZAT

Színszabályozást támogató szoftver fejlesztése spektrálisan
hangolható LED fénykabinhoz evolúciós algoritmus segítségével

Konzulensek:

Dr. Urbin Ágnes

adjunktus

Pizág Bertalan

tanársegéd

Dr. Sipos László

egyetemi docens



Budapest, 2023

Szerzői jog © Dombi Zoltán, 2023.

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó.....	iv
Jelölések jegyzéke.....	v
1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések.....	1
1.2. Áttekintés	1
1.2.1. Elvek és módszerek	2
1.2.1.1. Színtan és a programozási feladatok	2
1.2.1.2. Szoftver és hardver, mint rendszer.....	2
2. Színoptimalizálás szerepe a fénytani kutatásokban és az iparban.....	3
2.1. Színek szerepe és jellemzése.....	3
2.1.1. Színterek.....	4
2.1.1.1. CIE RGB színtér	4
2.1.1.2. CIE 1931 xy színtér (Y=100).....	6
2.1.1.3. CIE 1960-as és 1976-os UCS színtere.....	7
2.1.1.4. CIE Luv és CIE $L^*u^*v^*$ színrendszer.....	8
2.1.1.5. CIE Lab és CIE $L^*a^*b^*$ színtér	9
2.1.2. Színminősítő mennyiségek.....	10
2.1.3. Színhőmérséklet	11
2.1.4. Színvisszaadás matematikai leírása.....	12
2.1.4.1. CIE CRI számítása	13
2.1.4.2. CQS (Color Quality Scale) [11].....	13
2.1.4.3. TM30-15 és TM30-20 (IES TM3020-as szabvány) [12]	14
2.1.5. Metaméria.....	16
2.2. Fénykabinok a piacon és a kutatásban	16
2.2.1. LED-es technológiák és lehetőségeik.....	17
2.2.2. Piackutatás és konklúziók	17
2.2.3. Saját fejlesztésű LED-es fénykabin bemutatása.....	20
2.2.3.1. Kalibráció és eredményei.....	23
2.3. Színoptimalizálás lehetőségei	25
2.3.1. Színszabályozás a LED-es rendszerekben és erre használt eljárások.....	26
2.3.1.1. Optimalizálási eljárás kiválasztása.....	26
2.3.1.2. Evolúciós algoritmusok általános elmélete	31
3. Színszabályozó alkalmazás és algoritmus bemutatása	35

3.1. Módosított DE modell felépítése színszabályozásra	35
3.1.1. Fitnesz függvény felépítése	35
3.1.2. Optimalizálás menete és egyedi vonásai	38
3.2. GUI felépítése és funkciói.....	41
3.2.1. Alkalmazás rendszerterve.....	42
3.2.2. A fénykabint irányító nézet bemutatása	44
3.2.3. A kalibrációs ablak bemutatása	45
3.2.4. A színoptimalizálás oldalának bemutatása	46
3.2.5. Alkalmazásfejlesztés rövid összefoglalása.....	47
3.3. Modell tesztelése és eredményei.....	48
4. Kutatási területek	51
5. Konklúzió.....	52
5.1. Alkalmazás továbbfejlesztési lehetőségek	52
5.2. Módosított DE modell fejlesztési opciói.....	53
6. Felhasznált források	54
7. Summary	55

ELŐSZÓ

A színek minősége, előállíthatósága és megőrzése az ipari termékeknél kulcskérdésnek számít. Az élelmiszerek, a divatos ruházatok, valamint a járművek, házak festékanyagai egyaránt komoly ellenőrzésen esnek át. Ezen ellenőrzéseket standardizált megvilágítási környezetekben végzik a szakemberek. Az ilyen fénykörnyezetek reprodukálhatósága, stabilitása a színes felületek megismételhető és pontos hitelesítésének kulcsa. A fénykabinok ezen minőségellenőrzések megkerülhetetlen kellékei. Értéküket a bennük található fényforrások spektrális beállításai, illetve azok hosszantartó stabil működését biztosító elektronikája, valamint a falfestések, a szerkezeti anyagfelépítése határozza meg.

A jelenlegi EU-s szabályozás szerint a fénycsöves világítóberendezések, illetve fénykabinok a közeli jövőben minden bizonnyal háttérbe fognak szorulni, így a LED-es megvilágítási környezetek fejlesztései mindinkább prioritást fognak kapni. Ennek megfelelően a tanszéken korábban elkészített LED-es megvilágítást alkalmazó fénykabin továbbfejlesztése nemcsak szintani kutatások, hanem alapvető piaci változások miatt is indokoltá vált, így jelen dolgozat fő motivációját a LED-es fénypanelek spektrális optimalizálására képes algoritmus valós fizikai rendszerre való implementálása, illetve annak modellszintű bemutatása adja.

* * *

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném megköszönni Pizág Bertalannak a támogató és alázatos munkáját, mellyel a színszabályozó szoftver elkészítéséhez hozzájárult, és türelemmel segített végig engem szakmai fejlődésem során.

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Sipos Lászlónak, a Magyar Szabványügyi Testület „Érzékszervi vizsgálatok és az élvezeti élelmiszerek” MSZ/MB elnökhelyettesének, aki a korábban megépített fénykabinhoz anyagi támogatással is hozzájárult, emellett végig követte a munkám és inspirált annak folytatására.

Szeretném megköszönni Dr. Urbin Ágnesnek a több éven át tartó szakmai hozzájárulását, mellyel a jelen munka elkészülését is messzemenően támogatta. Alázatos munkája példaértékű volt számomra és.

Köszönettel tartozom Csujá Zoltánnak, aki segítségemre volt a témát megelőző kutatásokban, valamint barátként és kollégaként is támogatott engem.

Budapest, 2023.

Dombi Zoltán

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és *angol* nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
E	megvilágítás (<i>illuminance</i>)	lx
L	fénysűrűség (<i>luminance</i>)	$\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$
x_v	matematikai modellben bevezetett arányosság tényező a fényáram és fénysűrűség közötti átszámításra (<i>proportionality factor introduced in the mathematical model for the conversion between luminous flux and luminance</i>)	$\frac{1}{\text{sr} \cdot \text{m}^2}$
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	színmegfeleltető függvények (<i>color matching functions</i>)	1
$R(\lambda)$	reflexió aránya adott hullámhosszon (<i>reflection ratio at a given wavelength</i>)	1
X_n, Y_n, Z_n	fényforrás nominális értéke (<i>nominal value of light source</i>)	1
X, Y, Z	fényforrás reflexióval vett értékei (<i>values taken by reflection of a light source</i>)	1

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
Φ_v	fényáram (<i>luminous flux</i>)	lm
Φ_r	radiometriai teljesítmény (<i>radiometric performance</i>)	W
λ	hullámhossz (<i>wavelength</i>)	nm
$Q(\lambda)$	megvilágító fényforrás spektrális teljesítményeloszlása (<i>spectral power distribution of an illuminating light source</i>)	lm
$Q(\lambda')$	fluoreszcens minta külső spektrális sugárzási hatásfoka (<i>external spectral radiation efficiency of a fluorescent sample</i>)	1
Ω	térszög (<i>solid angle</i>)	sr

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
i	általános futóindex (<i>general running index</i>)
D	dimmelés kitöltési tényezője (<i>dimming fill factor</i>)
H	PWM jel periódusidejével arányos mérőszám (<i>proportionality factor to the period time of the PWM signal</i>)
W	PWM jel magas jelszintjének tartamával arányos mérőszám (<i>proportionality factor to the duration of the high signal level of a PWM signal</i>)

1. BEVEZETÉS

A LED-ek a színek kikeverésében kiválóan alkalmazható fényforrások, szabályozható fényerejük révén egy sokszabadságfokú rendszerként széles körű és robosztus színszabályozást valósíthatunk meg velük. Ennek pontossága, a lehetséges színek megvalósítása és azok minősége függ a LED-ek spektrális teljesítményeloszlásától, a LED-ek abszolút és relatív fénysűrűségétől, valamint a függetlenül vezérelhető LED-csatornák számától. A környezeti paramétereiről nem is beszélve (környezeti burkolatok, külső zavaró fényforrások, fényforrások elektronikai és termális stabilitása). Egy ilyen rendszer optimalizálása és stabil működtetése robosztus szoftveres és hardveres támogatást igényel.

1.1. Célkitűzések

Jelen dolgozat fő célja a színszabályozás szoftveres és hardveres megvalósításának demonstrálása egy valós fizikai rendszeren, illetve ennek összehasonlítása más iparban és kutatásokban használt és hozzáférhető színszabályozási elvekkel. Az eredmények tükrében a lehetséges felhasználási és kutatási területek feltérképezése szintén részét képezi a tartalomnak, amelyek a részletes irodalom-és piackutatás alapján kerülnek összegzésre.

A dolgozatban szó lesz:

- Szintanban használt színterekről és színminősítő eljárásokról,
- Fénykabinok szerepéről és a megépített LED-es konstrukció funkcióiról
- Spektrális hangolás LED-es lehetőségeiről és kivitelezéséről,
- Színoptimalizálást támogató optimumkeresési eljárásokról,
- Saját fejlesztésű színszabályozó szoftver felépítéséről,
- Módosított DE. (differenciális evolúciós) algoritmus felépítéséről,
- LED-es fénykabin és szoftver együttesével kutatható területekről,
- Alkalmazás továbbfejlesztéséről.

1.2. Áttekintés

Jelen dolgozatban a tanszéken korábban megépített LED-es fénykabin színszabályozását támogató szoftverének kivitelezése és működése kerül bemutatásra.

A fő hangsúly a színszabályozást megvalósító algoritmusra tevődik, amelyet alapos irodalomkutatás, valamint a célkitűzések szempontjából releváns szintani háttérismeretek rövid rendszerezése előz meg. A szoftver bemutatása, a módosított DE (differenciális evolúciós) algoritmus mellett annak implementálásáról és működéséről, egyedi vonásairól, teljesítményelemzéséről és az eredmények más rendszerek működésével való összehasonlításáról is szó esik.

A színszabályozást is tartalmazó szoftver a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, illetve a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem közösen kivitelezett fénykabinjára lett optimalizálva,

amely színmaszkolásokra, élelmiszeripari tesztekre, illetve ételminősítésekre, valamint a standardizált D típusú megvilágítási környezetek (például D65 megvilágítás) szimulációjára és színhőmérséklet-változtatásra is alkalmas a különféle funkcióknak köszönhetően. Ezen funkciók áttekintése sem marad el.

Végül pedig a kapott eredmények tükrében a jövőbeli lehetséges kutatási területek feltérképezésével zárul a dolgozat.

1.2.1. Elvek és módszerek

A színszabályozás elméletéről szóló szakirodalmak, valamint a színrendszerek átszámításaira, ábrázolásaira szolgáló szoftveres lehetőségek felkutatása, valamint az elméleti modellek valós fizikai rendszerre való átültetése alapozta meg a kutatómunkát. A célkitűzések ennek megfelelően kerültek véglegesítésre.

1.2.1.1. Szintan és a programozási feladatok

A színszabályozás implementálására a Python programozási környezetre esett a választás, ezt az egyszerű telepíthetőség, valamint a számos, szintani feladatokra megírt Python könyvtárak megléte is indokolta. Az alkalmazás fejlesztése a gondos rendszertervezést, valamint hibakeresést is magába foglalta.

1.2.1.2. Szoftver és hardver, mint rendszer

A korábban megépített fénykabinhoz implementált színszabályozó szoftver együttesét mechatronikai rendszerként tekintve optomechatronikai feladatot kapunk, amelynek komplexitását a dolgozatban bemutatott problémák és megoldásaik tárják fel és támasztják alá.

2. SZÍNOPTIMALIZÁLÁS SZEREPE A FÉNYTANI KUTATÁSOKBAN ÉS AZ IPARBAN

2.1. Színek szerepe és jellemzése

Az ember érzékszervei (látás, hallás, szaglás, ízlelés, tapintás) közül a látás hordozza a legtöbb információt (90 %-nál több) a környezetünkről. Ennek révén környezetünk feltérképezését a benne található tárgyak alakjai, térbeli elhelyezkedése, és azok színei határozzák meg.[1]

A színek a mindennapi életben nagy hatást gyakorolnak ránk. Meghatározzák közérzetünket, első benyomásunkat egy termék kapcsán, vagy éppen a veszély felismerésében és a helyes reakció megtételében játszanak szerepet[1]. Egyszerű példa erre a közúti lámpa, melynek színei különböző információval bírnak: a vörös a megálljt, a zöld a szabad utat jelenti, míg köztudott, hogy a borostyánsárga színre figyel fel a leginkább az ember, ennek köszönhető a járművek indexének színe is.

A kultúrák különféle életeseeményeket is színekhez kötnek, nem ritka viszont az sem, hogy ugyanazon színt két közösség másként értelmez és ez akár konfliktusokhoz is vezethet közöttük. Van, ahol a fehér szín például az ártatlanságot, máshol a gyászt szimbolizálja.

A színek esztétikai, művészeti értéküket az ember hangulatára gyakorolt hatása adja, ezt használja ki a festőművészet is. Legnagyobb alkotóink színekben gazdag, de kiegyensúlyozott festmények révén nyerték meg maguknak a közönséget. A hétköznapi életben a szobák falfestése, egy adott évszak színei, mind-mind más hangulatot hordoznak. Egy zöld színű szoba a kórházakban nyugtató hatással van a betegekre, míg a kék szín serkenti a racionális gondolkodást. [1]

A színek az ipari termékek, textíliák, élelmiszerek fontos minőségi jellemzőjeként is felbukkannak. Gondoljunk csak a divatos ruhákra, a különféle színű gyümölcsökre, zöldségekre, húsfélésekre, illetve azok megvilágítására különféle fényforrások alatt. Ha már fakóbbnak látszik egy termék, rosszabb benyomást kelt számunkra.

Emellett az építőipari festékek, vegyszeti oldatok, az autókarosszériák, motorkerékpárok és más gyártásból kikerülő termékek esetében is egy adott színárnyalat hitelesítése és reprodukálhatósága komoly feladat a szakembereknek.

Ez első hallásra nem tűnik bonyolultnak, de valójában a színtani kutatások, a különféle szabványosan definiált színrendszerek, azok előnyeivel és hátrányaival, a metaméria jelensége, hatása és okai, a színadaptáció, és még sok más, színtani kifejezés mutatja, hogy a színek minősítése és validálása, tartósságának garantálása egy fizikai termék, rendszer esetében nem olyan triviális feladat.

Ebben a fejezetben a téma szempontjából releváns színtani alapfogalmak, a színkeverés és színoptimalizálás megvalósításának és modellezésének irodalma, valamint ennek demonstrálására korábban többedmagammal megépített LED-es fénykabin bemutatása kerül szóba.

2.1.1. Színterek

2.1.1.1. CIE RGB színtér

A színek leírására a CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, azaz Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság) több színrendszert is definiált attól függően, hogy az újabb emberi látással kapcsolatos kutatások eredményei milyen hatással voltak az addigi színmodellekre. A megfigyelések szerint a szín matematikai leíráshoz három számérték szükséges. Ezt az emberi látás háromreceptoros érzékelése indokolja, ugyanis a három csap három eltérő spektrális tartományban érzékel, ezeket az érzékelési tartományuknak megfelelően *protos* (vörös), *deuteros*(zöld) és *tritios* (kék) elnevezéssel látták el [1].

A CIE az additív színkeveréssel kapcsolatos, megfigyelésen alapuló kísérletei alapján definiálta az emberi színlátás alapfüggvényeit. Elsőnek az RGB színrendszert rögzítette, amelynek az alapszíneihez a következőket rendelték hozzá [1]:

- $\lambda_1=700$ nm hullámhosszú vörös (R),
- $\lambda_2=546,1$ nm-es zöld (G),
- $\lambda_3=435,8$ nm-es kék (B)

Ebben a rendszerben többek között a színes és fehér fény kikeverését Wright és Guild vizsgálta kísérleti úton 1928 -1931 között [2], melynek során az alábbi összefüggés született meg:

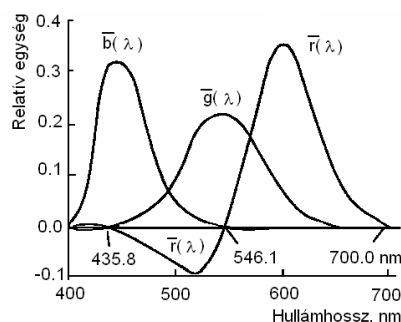
$$Q(\lambda) = r \cdot R(700,0) + g \cdot G(546,1) + b \cdot B(435,8) \quad (2.1)$$

Ezt felhasználva adott r, g és b arányok mellett a $Q(\lambda)$ célszínkénnel megegyezőnek ható színt kapunk.

Külön említést érdemel, hogy azon fehér fény kikeverése, amely azonosnak látszik a vele egyenlő energiájú fehér fényforrás színével, $R : G : B = 1 : 4,5907 : 0,0601$ aránnyal megvalósítható [1].

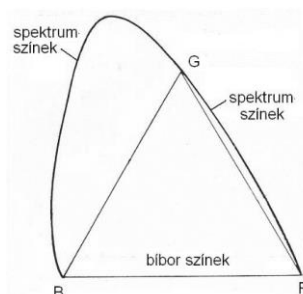
Másik megfigyelésből fakadó tény, hogy a keverés eredménye mindig fakóbbnak hat, mint a monokromatikusan megadott célfény. A fakó hatást a célfény fakításával (valamelyik keverő fény célfényhez történő rávetítésével) oldották meg végül, ami matematikailag az egyik keveréshez használt fényt negatív előjelűvé módosítja.

Ezen megfontolásokat követve a színek egy R, egy G és egy B alapszínhez rendelt r, g, b színhármassal jellemezhetőek. Ez egyúttal a spektrum minden hullámhosszát is leírja. Ezeket diagramon ábrázolva álltak elő a CIE RGB színmegfeleltető függvényei, amelyet a 2-1. ábra szemléltet.



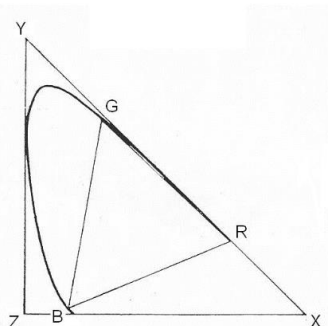
2-1. ábra: A CIE RGB színmegfeleltető függvények relatív skálán ábrázolva [1]

A korábban bevezetett R, G és B alapszíneket egy háromszög sarkaira téve egy olyan additív színkeverési teret kapunk, ahol az eredeti kikeverhető színek ezen alakzaton belül, míg azon színek, amikhez negatív színmegfeleltető komponensre lenne szükség, kívül foglalnak helyet [1]. Ennek megvalósulását a 2-2. ábra mutatja be.



2-2. ábra: Az R, G és B alapszínek színtere és színtartományai [1]

Mivel az CIE RGB színrendszer nemcsak pozitív értékalmazó színmegfeleltető függvényeket tartalmaz, így matematikai megfontolásból a CIE újabb alapszíneket vezetett be, amelyekkel így már minden valóságos színt le lehet fedni. Ez matematikailag azt jelenti, hogy az új alapszínek (X, Y, Z) által definiált háromszög a spektrum minden színpontját tartalmazza, beleértve azok határvonalait és magát a bíborvonalat is. Ennek megvalósulását szemlélteti a 2-3. ábra:



2-3. ábra: CIE X, Y és Z alapszín ingerek színtere és körbezárt spektrum, benne az eredeti R, G, B színrendszer [1]

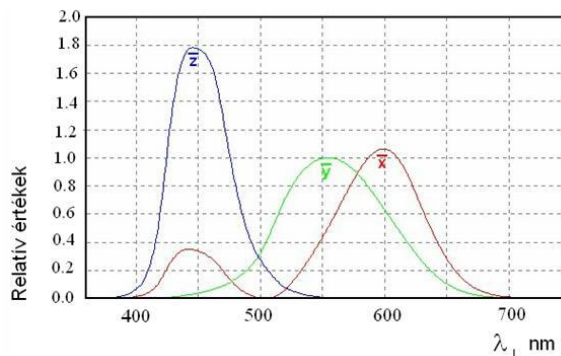
Fontos leszögezni, hogy ezek az új X, Y és Z alapszínek virtuálisak, a spektrumvonalon kívül helyezkednek el, így képzetes színek minősülnek, tehát nem lehet színeket kikeverni belőlük. Viszont az eredeti R, G, B rendszerből könnyedén átszámíthatóak az alábbiak szerint:

$$X = 0.49000 \cdot R + 0.31000 \cdot G + 0.20000 \cdot B \quad (2.2)$$

$$Y = 0.17697 \cdot R + 0.81240 \cdot G + 0.01063 \cdot B \quad (2.3)$$

$$Z = 0.00000 \cdot R + 0.01000 \cdot G + 0.99000 \cdot B \quad (2.4)$$

Ezen képzetes alapszín ingerek már csak pozitív értékeket tartalmaznak, amely a későbbiekben definiált CIE színrendszerek számításaiban is szerepelnek. Ezek ábrázolását a [1] forrás alapján a mutatja be.



2-4. ábra: Az CIE RGB-ből levezetett CIE XYZ színmegfeleltető függvények relatív értékskálán [1]

2.1.1.2. CIE 1931 *xy* színtér ($Y=100$)

A CIE 1931-ben definiálta az Yxy színtérét, amely a világossági paraméterét $Y=100$ -ban fixálva egy kétdimenziós grafikont jelent. Jellegzetes alakja miatt „papucsdiagramnak” is nevezik. Ezen megjelenítés hátránya, hogy a fényforrás világossági paramétere fix a teljes diagramon. A CIE 1931 Yxy színrendszer komponenseinek számítása az alábbiak szerint történik:

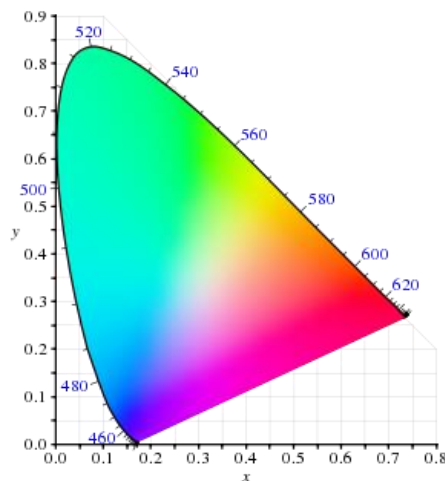
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.5)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.6)$$

$$Y = Y \quad (2.7)$$

A képletek alapján látható, hogy minden színárnyalatot egy (x, y) pont és egy Y világossági tényező definiál. Mivel azonban az Y fix így az elméleti 3 dimenziós térből csak adott világosságú részt tudunk ily módon leírni.

Egy másik hiányosságára MacAdam kísérletei derítettek fényt, aki további méréseket hajtott végre a színtér 25 kiválasztott pontján. Ennek során jó színlátású kísérleti alanyokat kért fel arra, hogy a kiválasztott színpontokat több különböző színpárból keverjék ki. Ennek eredményeit kielemezve arra jutott, hogy a mérési bizonytalanságból fakadó szórási ellipszisek eltérőek a színtért különböző tartományokban. Ennek pedig egyenes következménye, hogy a színtér egynetlen, vagyis azonos színárnyalatkülönbséghez a színtér különböző tartományain eltérő távolságok tartoznak [1].



2-5. ábra: CIE 1931 Yxy színtérét ábrázoló színdiagram [2]

A későbbi CIE konferenciákon ezt a problémát igyekeztek orvosolni azzal, hogy a CIE Yxy színtérére újabb és komplexebb transzformációt definiáltak, létrehozva ezzel újabb és újabb színrendszereket. Az [1]-es forrás szerint eddig több mint 20 új színrendszert alkottak meg, ezek közül a legfontosabbak a következők:

- CIE LUV
- CIE L U*V*
- CIE LAB
- CIE L*a*b* (1976)
- CIE UCS u, v (1960)
- CIE UCS u', v' (1976)

Egyéb gyakran használt színrendszerek az iparban és a 3D-s megjelenítésnél:

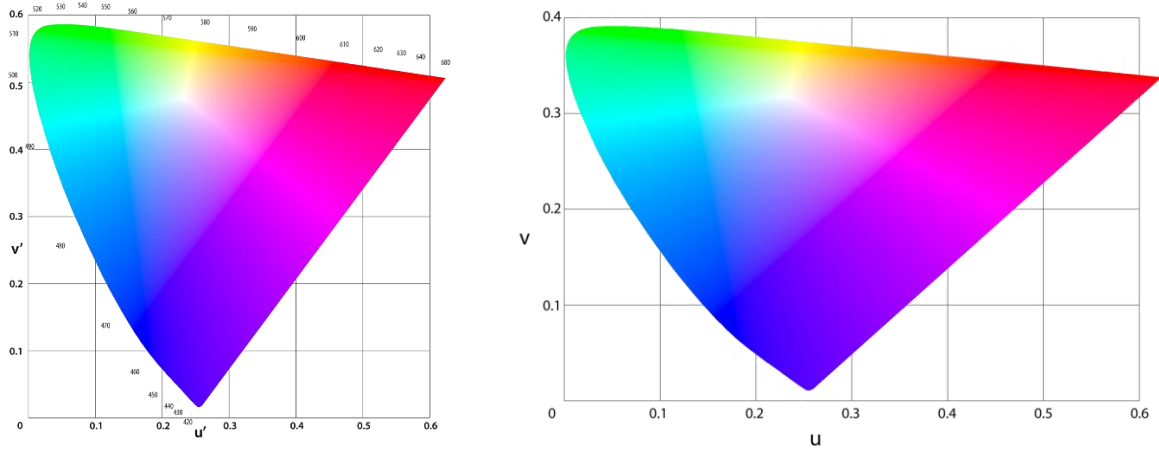
- HLS (színezet, fényesség és telítettség alapú jellemzés)
- CMY és CMYK (nyomtatóiparban használják, szubtraktív színkeverés)
- sRGB (1996-ban hozták létre, monitorokra, nyomtatókra használják)

2.1.1.3. CIE 1960-as és 1976-os UCS színtere

A CIE 1960 UCS színtérét az 1931-es CIE Yxy színtérének transzformálásával kapjuk meg oly módon, hogy a színkülönbségek egyenletesebbek legyenek. A kapott mennyiségek között ugyan a világosság már nem szerepel, vannak esetek, ahol azt is feltüntetik az Y-t alapul véve. Ennek eredménye:

$$u = \frac{4 \cdot X}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{4 \cdot x}{12 \cdot y - 2 \cdot x + 3} \quad (2.8)$$

$$v = \frac{6 \cdot Y}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{6 \cdot y}{12 \cdot y - 2 \cdot x + 3} \quad (2.9)$$



2-6. ábra: CIE 1960 UCS u v (jobbra) és CIE 1976 UCS u' v' (balra) színtérét ábrázoló színdiagram (CIE 1960 UCS u v):[3], CIE 1976 UCS u v: [4])

A CIE 1976-os UCS u' v' színtérben az alábbiak módosulnak a számítások során:

$$u' = u \quad (2.10)$$

$$v' = \frac{3}{2} \cdot v \quad (2.11)$$

2.1.1.4. CIE Luv és CIE L*u*v* színrendszer

A CIE Luv színteret a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE) 1976-ban definiálta, amellyel az összes érzékelhető szín háromdimenziós térbeli reprezentálása lehetséges. Maga a modell az emberi színlátásra épül és a CIE XYZ tovább gondolt verziója, és azért tervezték, hogy az érzékelt színterazsúlyozásban egyenletesebb legyen, mint más színterek. A színtér egy három tengelyes ortogonális koordinátarendszerben ábrázolható, az u és v tengelyek értékei az eredeti X, Y és Z színarányokat segédfüggvényekkel súlyozva adódnak, miközben a harmadik L tengely a fényerőt mutatja (L luminance angol terminológia nyomán). Így, ha egy adott színt szeretnénk rögzíteni egy adatbázisban, akkor annak világosságát egy referencia fehér fényhez mért Y aránnyal határozzuk meg. Ebből fakadóan ezt a rendszert előszeretettel alkalmazzák a színtkorrekciók és színreprodukciókban is. A számításokhoz szükséges formulák a következők:

$$L^* = \begin{cases} \left(\frac{29}{3} \right)^3 \cdot \frac{Y}{Y_n}, \text{ ha: } \frac{Y}{Y_n} \leq \left(\frac{6}{29} \right)^3 \\ 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16, \text{ ha: } \frac{Y}{Y_n} > \left(\frac{6}{29} \right)^3 \end{cases} \quad (2.12)$$

$$u^* = 13 \cdot L^* \cdot (u' - u'_n) \quad (2.13)$$

$$v^* = 13 \cdot L^* \cdot (v' - v'_n) \quad (2.14)$$

$$u' = \frac{4 \cdot X}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{4 \cdot x}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad (2.15)$$

$$v' = \frac{9 \cdot Y}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{9 \cdot y}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad (2.16)$$

Ahol:

- L^* a világosság CIE LUV-ban,
- Y a világosságérték tristimulusos értéke a CIE XYZ-ben,
- Y_n a világosságérték referencia pontja,
- (u'_n, v'_n) a fehér referencia színekoordinátái u' v' színtérben,
- (u', v') az aktuális fény színekoordinátái u' v' színtérben.

2.1.1.5. CIE Lab és CIE $L^*a^*b^*$ színtér

A CIE $L^*a^*b^*$ színtér esetében is a CIE X, Y, Z színösszetevőkből indulunk ki. Ez az ellentétes színpárok rendszerére alapozott háromdimenziós színtér közel egyenletesnek tekinthető, mivel az azonos méretű elmozdulások minden esetben ugyanakkora változást eredményeznek a színekben. A három koordináta számítása egy neutrális fehér referencia mellett a következők [5]:

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (2.17)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[\left(\frac{X}{X_0}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (2.18)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (2.19)$$

$$\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} > 0,008856 \quad (2.20)$$

$$\left(\frac{X}{X_0}\right)^{\frac{1}{3}} > 0,008856 \quad (2.21)$$

$$\left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{\frac{1}{3}} > 0,008856 \quad (2.22)$$

Ahol:

- L^* : a vizsgált szín világosságát adja meg,
- a^* : a vizsgált szín piros vagy zöldes mértékét jellemzi,
- b^* : a vizsgált szín kék-sárgás mértékét adja meg,
- X, Y, Z jelölik a színes tárgynak, míg X_0, Y_0, Z_0 a fehér trikromatikus mérőszámai.

A CIELab rendszerhez ezen felül definiálható az úgynevezett színezeti szög, amely a háromdimenziós térben a választott színpont színezetét adja meg az a^* és b^* függvényében:

$$h_{ab}^* = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2.23)$$

A CIELab króma telítettsége a különféle színpontok L^* tengelyétől mért távolságát adja meg:

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.24)$$

A dolgozat témája szempontjából fontos megemlíteni a színeltérések jellemzésére szolgáló színingerkülönbséget. Ez lényegében egy választott színpont és egy referencia, adott esetben etalon közötti térbeli geometriai távolság, amely a (2.21) -es egyenlettel adható meg:

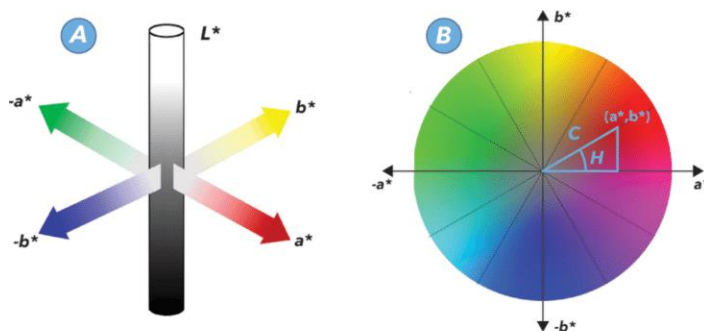
$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_A^* - L_R^*)^2 + (a_A^* - a_R^*)^2 + (b_A^* - b_R^*)^2} \quad (2.25)$$

A színingerkülönbséggel az ember vizuális érzékelését is jellemezhetjük, mivel közel egyenletes színtérről lévén szó a geometriai távolságok közel arányosak a színárnyalatok különbségével, amely a vizuális érzékelést határozza meg. Ennek gyakorlatban bevett kategorizálását foglalja össze.

2-1. táblázat: A színingerkülönbség és a vizuális érzékelés kapcsolata

ΔE_{ab}^*	Szemmel érzékelhető eltérés
$\Delta E_{ab}^* \leq 0,5$	Nem érzékelhető
$0,5 < \Delta E_{ab}^* \leq 1,5$	Alig érzékelhető
$1,5 < \Delta E_{ab}^* < 3$	Észrevehető
$3,0 < \Delta E_{ab}^* \leq 6,0$	Jól látható
$6,0 < \Delta E_{ab}^*$	Nagy

Végül a CIELab színterének szemléltetését mutatja az 2-7. ábra.



2-7. ábra: CIE $L^*a^*b^*$ színteret szemléltet [5]

2.1.2. Színminősítő mennyiségek

A színek ábrázolása mellett azok minősítése és különbségeik matematikai jellemzése is több szempont szerint lehetséges. Ehhez legtöbbször ismerni kell a fényforrás spektrális összetételét, illetve a színes felületek spektrális reflexióját.

Az, hogy egy adott tárgy milyen színűnek hat a megfigyelő számára, azt a megvilágítási környezet döntően befolyásolja. Ezért fontos, hogy az adott megvilágítási környezetben tapasztalt színeket egy jól

definiált referencia megvilágítási környezet eredményeivel is össze lehessen hasonlítani és értékelni. Ennek feltétele, hogy maguk színminták is szabványosak és tartósak legyenek, így az összehasonlítás időtállósága és reprodukálhatósága is garantált.

Ezt az alapelvet felhasználva alkották meg a színvisszaadási indexek rendszerét, amelyek közül a legismertebb a CIE Ra és R9, az IES TM30-20, korábban TM30-15, végül pedig a CQS.

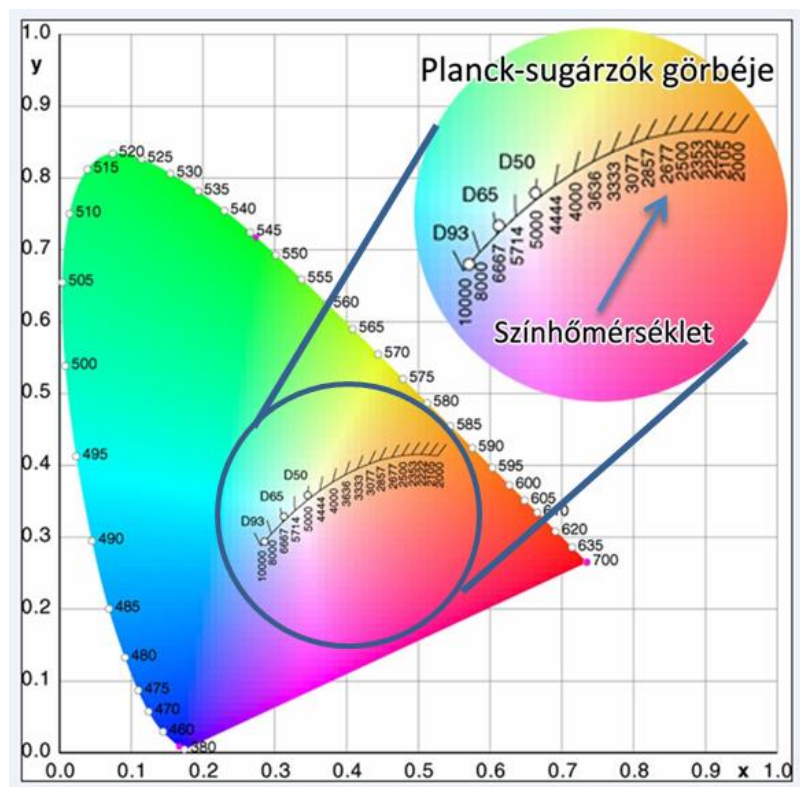
A fehér fények jellemzésénél pedig a színhőmérséklet (CT), valamint a korrelált színhőmérséklet (CCT) fogalma használatos.

2.1.3. Színhőmérséklet

A fényforrások színének jellemzésére a szinten a színhőmérsékletet használja, amely a fekete test sugárzó színével való összehasonlítást jelent. Az [1] alapján a színhőmérséklet a fekete test sugárzó azon Kelvinben vett hőmérséklete, amelyen a vizsgált fényforrás sugárzásnak színessége azonos a jellemzett sugárzás színességével.

Ha ennek a vizsgált fényforrásnak a színpontja a Planck-sugárzó vonalán helyezkedik el, akkor a színhőmérséklet nem más, mint a vonalon feltüntetett hőmérséklet.

Az [1] korrelált színhőmérséklet a fekete sugárzó azon hőmérséklete, amelynek színpontja a CIE színezeti háromszögben legközelebb található a jellemzendő sugárzás színpontjához. Ha az adott sugárzó színpontja nem a Planck sugárzó vonalára esik, akkor a Planck sugárzó vonaláig a megfelelő korrelációs egyenesen haladunk, és ahol a korrelációs egyenes metszi a Planck sugárzó vonalát, ott olvassuk le a korrelált színhőmérséklet értékét.



2-8. ábra: CIE Yxy (Y=100) színezeti diagramon feltüntetett Planck-sugárzók vonala [6]

A korrelált színhőmérséklet számítására legtöbbször a McCamy-féle approximációt használják [9]:

$$n = \frac{x - 0,3320}{0,1858 - y} \quad (2.26)$$

$$CCT = 437 \cdot n^3 + 3601 \cdot n^2 + 6861 \cdot n + 5517 \quad (2.27)$$

A korrelált színhőmérséklettel együtt szokás még a *Duv* metrikát is megadni, amely azt fejezi ki, hogy adott CCT vonal mentén pontosan hol helyezkedik el a vizsgált fényforrásunk, mennyire van közel a Planck-görbéhez. Ha ennek értéke negatív, akkor a Planck-görbe alatt a bíborvörös – rózsaszín tartományra esik, míg pozitív esetén a zöldes – sárgás területekre. Minél inkább nagyobb a *Duv* számértéke, előjeltől függően annál messzebb van a Planck-görbétől (pozitív előjel esetén felfelé, negatív esetben pedig lefelé), így előjele az irányt, nagysága a távolság mértékét határozza meg.

2.1.4. Színvisszaadás matematikai leírása

A színvisszaadás fényforrások egyik meghatározó tulajdonsága, amely a fényforrás fényével megvilágított színes felületek színeinek helyes megjelenítését jellemzi. Helyesnek tekinthetők az egyenlő energiacioszlású fényforrással megvilágított felület színei, illetve a fekete test fényével megvilágított felület színei. Mindez független a napfény pillanatnyi színhőmérsékletétől [1].

2.1.4.1. CIE CRI számítása

A CIE által meghatározott színvisszaadás két mennyiségből áll (CIE Publication 13.3) [10]: egy egyedi színvisszaadási indexből (R_i), valamint egy általános színvisszaadási indexből (R_a). Az R_i egyetlen színes felületre vonatkozó minősítő érték, míg az R_a ezen egyedi színvisszaadási indexeknek az átlagaként adódik, ezt más néven CRI-nek is nevezik.

A CRI számításához színmintagyűjteményre van szükség, ezek színmintáira kapott egyedi színvisszaadási indexekből kapható meg az általános érték. Ehhez a CIE olyan színmintát szabványosított, amelyek 6 rikítóbb, illetve 8 halványabb színmintát tartalmaznak [1].

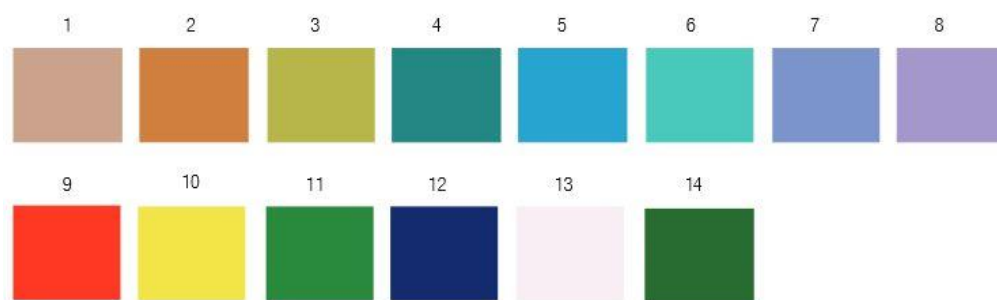
A számítások során a CIE 1976-os $L^* u^* v^*$ szírendszert használja a szabvány. Ebből az adott színmintára jellemző u' v' értékek adódnak, s ezek révén az egyedi színíngerkülönbségek, végül pedig az egyedi színvisszaadási indexek (R_i). Ezeket összeadva, majd átlagolva kapható az általános színvisszaadási index (R_a)

$$\Delta E_i = \sqrt{(\Delta u'_i)^2 + (\Delta v'_i)^2 + (\Delta L_i)^2} \quad (2.28)$$

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (2.29)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n R_i \quad (2.30)$$

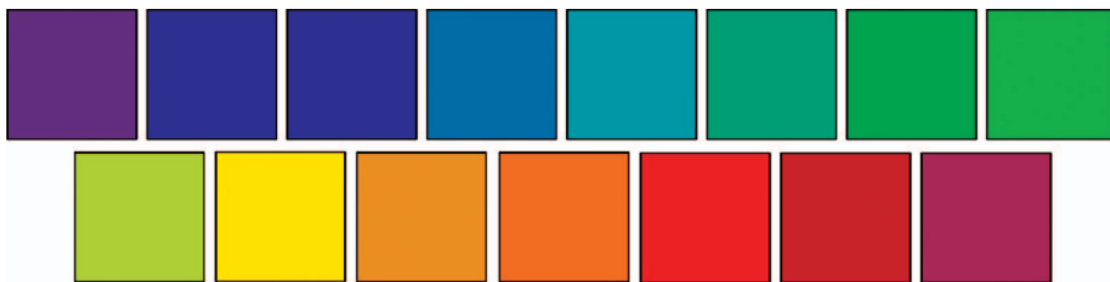
Ennek a módszernek szembetűnő hátránya, hogy a színminták száma igen kevés, ráadásul ezek a színek nincsenek telítésben, így hamis jó és rossz eredmények is adódhatnak. Különböző fényforrások összehasonlítására is csak korlátozottan alkalmazható ez a módszer, mivel a számítások csak azonos korrelált színhőmérséklet esetén adnak hiteles összehasonlítást.



2-9. ábra: a CIE CRI színmintagyűjteménye, 8 fő és 6 kiegészítő színnel, előbbiből számítható a CRI

2.1.4.2. CQS (Color Quality Scale)

A CQS (Color Quality Scale – színminőség skála) a CRI-hez hasonlóan a fényforrások minőségének jellemzésére használatos eljárás. Ennek színmintagyűjteménye már 15 erősen telített színt alkalmaz, amelyeket a NIST határozott meg [7]. Ennek színmintagyűjteményét mutatja be a 2-10. ábra.



2-10. ábra: A CQS szabványos színmintagyűjteménye D65 megvilágítással szimulálva [7]

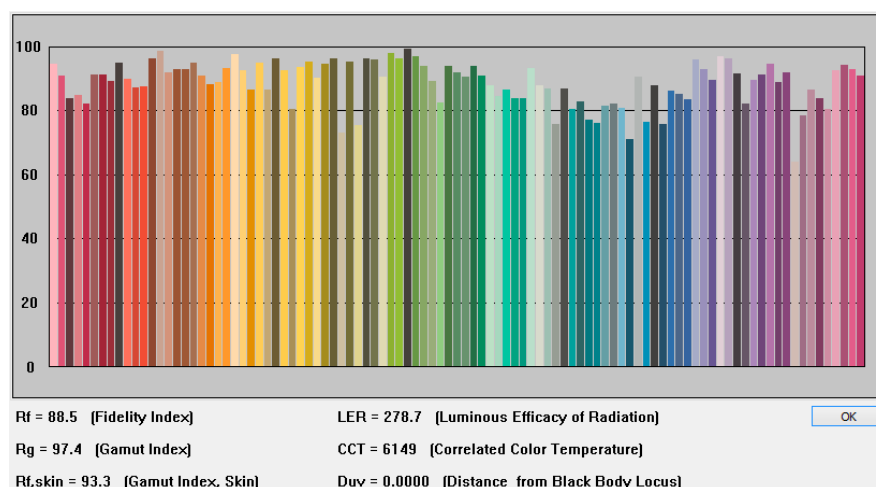
2.1.4.3. TM30-15 és TM30-20 (IES TM3020-as szabvány)

A CIE CRI számításánál tárgyalt hibák elkerülése érdekében az IES (Illuminating Engineering Society) létrehozta a TM-30-20 [8](korábban TM-30-15 és TM-30-18) szabványosított eljárást, amely a sokkal nagyobb és reprezentatívabb színminták, valamint a többféle színvisszaadási indextípusok definiálása révén hatékonyabb értékelést kínál.

A definiált mennyiségek a következők:

- R_f : *színhűségindex* (fidelity index): megadja, hogy a vizsgált fényforrás a hozzárendelt referenciafényforráshoz képest milyen közel áll.
- R_g : a *gamut index* a vele együtt értelmezett *színvektorgrafikával* együtt jellemzi a vizsgált fényforrás színvisszaadását.

Ezen mennyiségeket egy 99 úgynevezett színértékelési mintát (CES) tartalmazó színmintagyűjteménnyel számítják, ez a CRI-nél használt 8-hoz képest statisztikai alapon is megbízhatóbb és pontosabb értékelést eredményez. Ezt a tényt tovább növeli, hogy a színmintákat valódi tárgyak és anyagok közül válogatták össze, a szabvány szerint összesen 7 csoportból: természet, műanyagok, bőrszín, nyomtatott anyagok, textíliák, színrendszerek, valamint festékek.

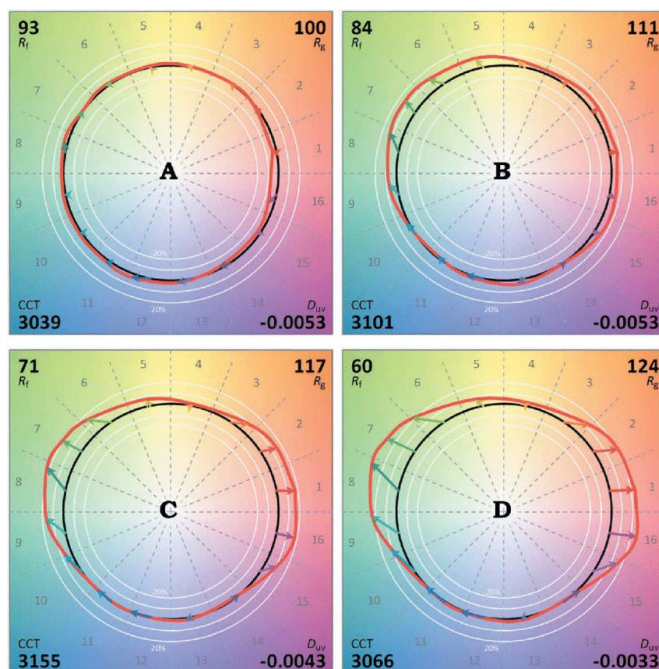


2-11. ábra: A CES színértékelési mintagyűjteménye [8]

A gamut vagy más néven színtartományindex a fényforrások krómájában bekövetkező növekedését vagy csökkenését írja le. A króma, mint mennyiség a vizsgált szín intenzitásának, tisztaságának és telítettségének minőségét határozza meg. Ha ez az érték 100 körül van, abban az esetben az R_g értéke arra utal, hogy a fényforrás telítettségben a napfényhez hasonló telítettséggel bíró színeket ad vissza. Ellenben, ha 100 feletti, akkor a referenciához képest intenzívebb színek adódnak, ha 100 alatti, akkor pedig fakóbbak.

A harmadik mennyiség, a színvektorgrafika értelmezésében az alábbi szempontokat írja elő a TM-30-20-as szabvány:

- A referencia fényforrást (napfény) a fekete, míg a vizsgált fényforrást a piros szín szimbolizálja.
- Ha a piros vonal a fekete kör belsejébe kerül, akkor a vizsgált fényforrás telítetlen hatást gyakorol a körön belüli színárnyalatokra a referenciához képest.
- Ennek ellenkező esetében, vagyis mikor a piros vonal a fekete körön kívül helyezkedik el, a referenciakörön kívül eső színárnyalatok túltelítettek lesznek a referenciához képest.
- Ha a piros és fekete vonalak átfednek egymáson, akkor a kapott színárnyalatok mind a referencia, mind a vizsgált fényforrás esetében azonosak lesznek.
- Tökéletes átfedésnél így nincs különbség a két fényforrás színvisszaadásában, és ez grafikusán is szembetűnő ekkor.



2-12. ábra: Színvektorgrafikák eltérő fényforrásokra [8]

2.1.5. Metaméria

A metaméria jelensége [1]-t alapul véve az emberi színlátás mechanizmusára vezethető vissza. Mivel a retinában csupán három széles spektrális tartományban érzékeny receptor található, így spektrálisan eltérő színek is képesek azonos színérzetet kiváltani az embernél. Ahhoz, hogy ez megvalósuljon, elegendő csupán az, hogy a protos, a deuterios és a tritos ingere azonosnak adódjanak, ez végtelen sok különböző színinger során előállhat.

Azon színpárok, amelyek spektrális energiaeloszlása különböző, de adott körülmények esetén azonosnak látszanak, metamer színpároknak hívjuk. Ezen látszólagos azonosság megszűnik, ha a körülmények, mint például a megvilágítás spektrális eloszlása, megváltozik.

Tipikus példaként említhető a fehér fény metamériája, amelyet az [1] alapján így foglalható össze. Az ideális fehér felületet, amelyet egyenlő energiájú spektrummal rendelkező fény világít meg, fehérnek érzékeljük, mivel mindhárom receptorunkat azonos mértékű ingerlés éri ilyenkor. Másrészt ugyanez a hatás kiváltható három monokromatikus fényforrás egyidejű alkalmazásával is. A kulcs, hogy mindegyik fényforrásnak éppen azonos mértékben kell ingerelnie a hozzá tartozó receptort.

Érdekesség, hogy az olyan emberek esetében nem jön létre ez a jelenség, akiknek valamely oknál fogva a receptorai némileg eltérő spektrális érzékenységgel rendelkeznek, mint az ép színlátó társaik. Ezt a szakzsargon az érzékelő metamériájának hívja.

A metaméria másik esetben is megvalósulhat, ha a fehér festésű felületet nem egyenlő energiájú fényt kibocsátó megvilágítás alá helyezzük. Ezt pedig a fényforrás metamériája.

2.2. Fénykabinok a piacon és a kutatásban

A színtanban használt fénykabinok olyan eszközök, amelyek alapvető szerepet játszanak a színek megbízható és reprodukálható vizsgálatában. Ennek megfelelően a színek objektív értékelése eltérő megvilágítási környezetek között valósulhat meg, amelyek a színészlelést is befolyásolhatják.

Egy ilyen környezet lehetővé teszi, hogy standardizált fényviszonyok mellett lehessen értékelni a színeket, minimalizálva ezzel a külső tényezők hatását, kiszámíthatatlanságát. Mindez a fogyasztói elégedettséget és a termékek színhűségének biztosítását is döntően meghatározza.

A leggyakoribb standardizált megvilágítási környezet a D65, amely a 6500 K korrelált színhőmérsékletű déli természetes napfény spektrumának spektrális jellemzőit, valamint színét szimulálja. Ezt a legtöbb iparág alkalmazza, de más standardizált megvilágítási környezetek is szóba jöhetnek, például a D50 a nyomatóknál, vagy éppen a hőmérsékleti sugárzók, halogén izzók, illetve egyre inkább teret nyerő LED-es megvilágítási környezetek.

Felhasználás tekintetében ipari szempontból elsősorban a festékgyártásban, a textiliparban, járműiparban, valamint a nyomdaiparban alkalmazzák ezeket az eszközöket. Emellett a színtani kutatások alapeszközének tekinthetők.

2.2.1. LED-es technológiák és lehetőségeik

Az elmúlt 10 évben a LED-es technológiát alkalmazó világítástechnikai termékek fejlődése és térnyerése olyan mértéket öltött, hogy a fénykabinok alapkellékévé váltak. Ezt számos előnyös fénytani tulajdonságuk támasztja alá, amelyet a 2-2. táblázat összegez.

Másrészt az EU-ban 2023-tól kezdődően betiltanak bizonyos fénycsőveket, így ennek hatására a LED-es termékek várhatóan plusz lendületet kapnak. Ez a fénykabinok fejlesztési irányát is kijelöli (EU ROHS 2011/65/EU). [9].

A korábban fénycsővekkel megvalósított standardizált megvilágítási környezeteket az új piaci igényeknek megfelelően így LED-es kivitelezéssel szükséges helyettesíteni. Mindez a LED-ek fényerő hangolása révén spektrális hangolással is elérhető. A kérdés, hogy megelégszik-e a vevő diszkrét beállításokkal, azok korlátozott módosításával, vagy pedig a spektrális hangolásban rejlő lehetőségekre igényt tart.

A spektrális hangolás révén kevesebb fényforrással többféle beállítást is megvalósíthatunk, így költség-és helyhatékonyak lehetünk egyszerre.

Ennek eléréséhez azonban komoly elektronikára és stabil szoftveres-hardveres rendszerre van szükség, ráadásul LED-es rendszerek esetében a hőmérsékletfüggő spektrális teljesítmények szabályozására is gondolni kell. Ezzel pedig egy komplex mechatronikai szabályozáshoz jutunk, amelyet egy fénycsőves megoldás helyett komoly átalakítások mellett lehet implementálni a már meglévő rendszerekbe.

2-2. táblázat: A fénycsőves és LED-es technológiák összehasonlítása

Összehasonlítási szempont	Fénycső	LED
Fényhasznosítás	55-95 lm/W	>100 lm/W
Élettartam	6.000-20.000 óra	100.000 óra
Színvisszaadás	70-95	akár >98
Színhőmérséklet	2700-6500 K	hangolható
Fényerőszabályozás	nem, vagy korlátozottan	igen, széles tartományban
Spektrális szabályozhatóság	nem	igen
Energiahatékonyság	rosszabb	valamivel jobb
Fénysűrűség	akár 11 kcd/m ²	akár 30 kcd/m ²
Spektrális hangolhatóság	Nem	Igen
Hőmérsékletre érzékeny	Kevésbé	Igen
Homogenitás	Palást mentén egyenletes	Diffúzorral egyenletessé tehető

2.2.2. Piackutatás és konklúziók

Jelenleg a fénykabinok piacán számos gyártó képviselteti magát különféle termékeivel. A piaci változások okán egyre több LED-es megvilágítást alkalmazó termék kerül forgalomba, de közülük csak

kevésnél implementálják a színkeverésre alkalmas hardveres és szoftveres hátteret. A szintani kutatások esetében ez viszont egyre inkább lényegi kérdéssé válik.

A tanszéken megépített 22 csatornás LED-es fénykabin tervezése, megépítése gondos előkészületeket, és a rendelkezésre álló adatokhoz mérten alapos piackutatást követelt meg. Ennek megfelelően először a nagyobb gyártók kerültek kigyűjtésre, majd pedig a termékeik alapos elemzése következett. A piackutatás során több szempontot is figyelembe kellett venni, amelyek rendre:

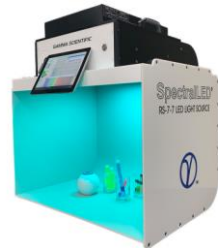
- Adott termékben található megvilágítási környezetek beállításai, kiemelt figyelmet fordítva a D65 meglétére és kivitelezésre (fénycsőes vagy LED-es), illetve napfényszimulátoros minősítése.
- A termék fizikai bennfoglaló méretei, amely a fényteret, a falfelületeket és ezáltal a megvalósítható megvilágítás és fénysűrűség értékeket befolyásolhatja.
- Spektrális szabályozhatóság adott-e a vizsgált termékben, és ha igen, milyen korlátokkal, milyen mutatókkal.
- A fénytér felosztható-e a fényforrások elrendezéséből adódóan két részre annak érdekében, hogy osztott kettéres vizsgálatokat lehessen a termékben végezni.
- Milyen akkreditációkkal rendelkezik a vizsgált kabin, mely szabványoknak felel meg.

A felkutatott kabinyártó cégek listája jó pár nevet tartalmaz, ezek közül a relevánsabbak listája:

- X-Rite: Spectralight QC, Pantone Judge QC, Pantone 3 Light Booth
- Just Normlicht: DLS COLOR VIEWING LIGHT V2, V7, V8, LED Color Viewing Light XL Hybrid, Color Viewing Light BASIC 98681
- Gamma Scientific: SpectralLED® RS-7-7-VIS Tunable Light Source – Light Booth
- Konica Minolta: CMB-2540 Premium Controlled Lighting, GTI MiniMatcher Series

Ezen cégek közül végül három került kiválasztásra, mivel ezek mindegyike a tervezni kívánt kabin egy-egy lényegi tulajdonságát hordozta, de együttesen egyik termékben sem egyesültek. Ezeket foglalja össze 2-3. táblázat a[10] nyomán.

2-3. táblázat: LED-es fénykabin tervezéséhez felhasznált piaci termékek [10]

Gyártó cég megnevezése	Termék megnevezése	Termék képe
Gamma Scientific	SpectralLED® RS-7-7-VIS Tunable Light Source – Light Booth	

X-Rite	Spectralight QC	
Just Normlicht	Color Viewing Light BASIC	

A kiválasztott termékek adatlapjait és fénytani paramétereit összehasonlítva az alábbi konklúzió született meg:

- SpectralLED® RS-7-7: Ez a termék ugyan speciális kutatásokra megépített eszköz és spektrálisan hangolható, de piaci ára miatt ki lett zárva. További hátrány, hogy eléggé kicsi vizsgálóteret mondhat magának, illetve csupán egy világítótest található benne.
- Spectralight QC: Viszonylag nagy vizsgálóterrel, valamint az alapvető fényforrásokkal rendelkezik, de ez is csak fénycsőes és halogén megvilágítást tartalmaz.
- Color Viewing Light BASIC: Kis vizsgálóterrel, valamint halogén és fénycsőes fényforrásokkal rendelkezve nem alkalmas színes megvilágítások megvalósítására.

Összesítésként a főbb paramétereket foglalja össze a[10] alapján.

2-4. táblázat: Kiválasztott piaci kabinok paramétereit [10]

Gyártó	GretagMacbeth (jelenleg: X-Rite)	Just Normlicht	Gamma Scientific
Termék	Spectralight III (Spectralight QC)	Pantone Color Viewing Light (Color Viewing Light BASIC)	SpectralLED® RS-7-7- VIS Tunable Light Source – Light Booth
Geometria	69,9 x 94 x 62 cm	64 x 33 x 36 cm	45 x 45 x 45 cm
Üzem módok	D65, CW, Horizon, TL84/U30, UV, 'A'	☼ (D65), 🏠 (domestic), 🛒 (store)	CIE A, B, C, D50, D55, D65, D75, E, F1-F12, Macbeth/ X-Rite színminták

Fényforrás	D65: 2x750 W halogén CW: 2xF30T8/CW (4150K) Horizon: 4x500 W halogén izzó (2300K) TL84/U30: 2xF30T8/TL84 (4000K) UV: 2xF30T8 BLB + 1xF6T5 BLB 'A': 2x150 W halogén izzó (2856K)	D65: fénycső (6500K) Incandescent/ domestic lighting: halogén izzó (2700K) Store lighting: TL84/CWF (4100K)	35 LED-csatorna (32 különálló LED- csatorna, 3 szélessávú LED- csatorna)
Ajánlott üzemóra	400-4000 óra (fényforrásfüggő)	2500 óra	—

A kiválasztott termékek közül kettőn alapos fénytani mérések lettek elvégezve, ahol a különböző beállításokhoz tartozóan azok szintani és napfénystimulátorminősítési paramétereit értékeltem ki kollégámmal. Az értékelési szempontok az alábbiak voltak:

- Színkoordináták – CIE Yxy és CIE 1976 UCS u' v'
- Színvisszaadási indexek: CIE CRI (Ra, R9), valamint a TM-30-20-as szabványok szerint
- Korrelált színhőmérséklet: CCT

A LED-es fénykabin tervezési irányelvei között ezen beállítások, valamint színmetrikai paraméterek elérése, azok javítása kiemelt helyen szerepelt, mindezek pedig a spektrális hangolás implementálásával valósultak meg. Ennek részleteiről és kivitelezéséről szól a 2.2.3-as fejezet.

2.2.3. Saját fejlesztésű LED-es fénykabin bemutatása

A 2.2.2-es fejezetben leírtak szerint a LED-es fénykabin tervezési szempontjai a piackutatás során kiválasztott és kiértékelt kabinok előnyös tulajdonságait ötvözve kerültek véglegesítésre.

2-5. táblázat: A LED-es fénykabin fénytani követelményeit [11]

Kritérium	Érték vagy feltétel
Fényforrás, napfénystimulátor*	D65: $R_a \geq 90$

Fénysűrűség a falakon és a munkaterületen	$L \geq 100 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$
Dobozfal	matt természetes szürke, csillogásmentes fényességi tényező: $\approx 15\%$ (30 %) (N4, N5, N6)
Mintára eső megvilágítás	$800 \text{ lx} \leq M_v \leq 4000 \text{ lx}$ (sötét színek) $1000 \text{ lx} \leq M_v \leq 1500 \text{ lx}$ (világosabb színek)
Fényforrás elrendezés	$0^\circ/45^\circ$ vagy $45^\circ/0^\circ$ vizsgált mintától függően
Fényáram*	kiegyenlített a VIS (380-780 nm) tartományban minél több színre (maszkolás)
Munkaterület mérete	minimum 0.9 m széles, és 0.6 m mélységű
Dobozméret	magassága akkora legyen, hogy egy széken ülő ember elférjen a térben és a mérési elrendezések megvalósíthatóak legyenek

Ennek folyamatát részleteibe menően a [10] tartalmazza, jelen esetben a dolgozat témája szempontjából releváns paraméterek kerülnek bemutatásra és értékelésre. Ebben az alfejezetben ennek rövid összefoglalásáról lesz szó.

A tervezéshez használt végleges szempontokat, illetve fénytani kritériumokat foglalják össze 2-5. táblázat, illetve a 2-6. táblázat. A részletes fénytani, illetve elektronikai tervezés leírását a [10], illetve a [12]-es források tartalmazzák.

2-6. táblázat: Általános tervezési irányelvek a piackutatás, illetve egyéni igények alapján. Magasabb prioritás 3, alacsonyabb 1)

Tervezési szempontok	Prioritás (1-3)
Spektrális szabályozhatóság	3
Standard D65 megvilágítás, illetve D50, D55, D75 lehető legjobb minősítéssel („AA” minősítéssel)	3
Széles GAMUT a színikeveréshez	3
Színvisszaadás magas minősége több szabvány szerint (CRI, TM-30-15/20)	2
PWM vezérelhetőség linearitása és nagy felbontása (16 biten)	3
Színhőmérséklet szabályozás széles tartományban	3
Fényerőszabályozhatóság adott megvilágításhoz	2
Osztott kettérű vezérelhetőség szimultán színvizsgálatokhoz	3
Fényáram kiegyenlítés megvalósítása színikiemeléshez és elmaszkoláshoz	3

Robosztus geometriai kivitelezés, amely lehetővé teszi az érzékszervi bírálatok szakszerű elvégzését	3
Spektrális szabályozhatóság	3

A fénytani kritériumok esetében a csillaggal megjelölt paraméter figyelembevétele az egyedi szintani kutatások, többek között a fénysűrűsége kiegyenlített spektrális hangolás, és a színmaszkolási kísérletek támasztják alá [11]. Ennek szoftveres és hardveres megvalósítására a dolgozatban még szó esik később.

A tervezési feladatokat hallgatótársammal közösen véglegesítettük, ezek közül jómagam az elektronikai és programozási feladatköröket, valamint a megépítéshez szükséges alapanyagok beszerzését intéztem. A fénytani szimulációkat, valamint a CAD-modellezést kollégám véglegesítette. Ezek részletes leírását a [10]-es forrás részleteibe menően tartalmazza.



2-13. ábra: LED-es fénykabin kalibráció működése kalibráció alatt (Forrás: Saját felvétel)

Most viszont elsősorban a rendszerfelépítésére, illetve a megvalósított funkciók bemutatására fókuszálok, ehhez híven itt most egy rövid összefoglalót tüntetek fel a munkálatokról, az alapanyagokról, illetve a megépített rendszer funkcióiról.

2-7. táblázat: LED-es fénykabin alapanyagai, munkafolyamatai és a kész rendszer funkciói

Rendszerkomponensek	Megépítés munkafolyamatai	Kész rendszer funkciói
LED-ek (22 csatorna)	1) Bútormunka és alapanyagok összegyűjtése	- 22 egymástól függetlenül vezérelhető LED- csatorna
Rézlapok	2) LED-kiosztás, hűtőbordák furatainak elhelyezése	- Spektrális lefedettség UV + VIS tartományon
Hűtőbordák	3) LED-ek elhelyezése a rézlapra	- Fénybeállítások: D65, D55, D50, D75, UV

Elosztók	4) Hűtőbordák felszerelése	- Színoptimalizáláshoz, CCT szimulációkhoz alkalmas vezérlési kör
PWM vezérlőegységek	LED-ek vezetékezése és forrasztása	- WiFi-n keresztüli kommunikáció
Ellenállások	5) Diffúzorlapok elhelyezése	- Nagy vizsgálotér, benne két pannellel, melyek egymástól függetlenül is vezérelhetők
Ventilátorok	Munkaponti ellenállásbankok építése	- Diffúzorlappal homogenizált megvilágítás
Mikrovezérlők	6) Vezérlő elektronika elkészítése	
Tápszekrény tápokkal	7) Ventilátorok beüzemelése	
Vezetékek	Tápszekrény és tápok bekötése	
Diffúzorlapok	8) Konstrukció tesztelése	

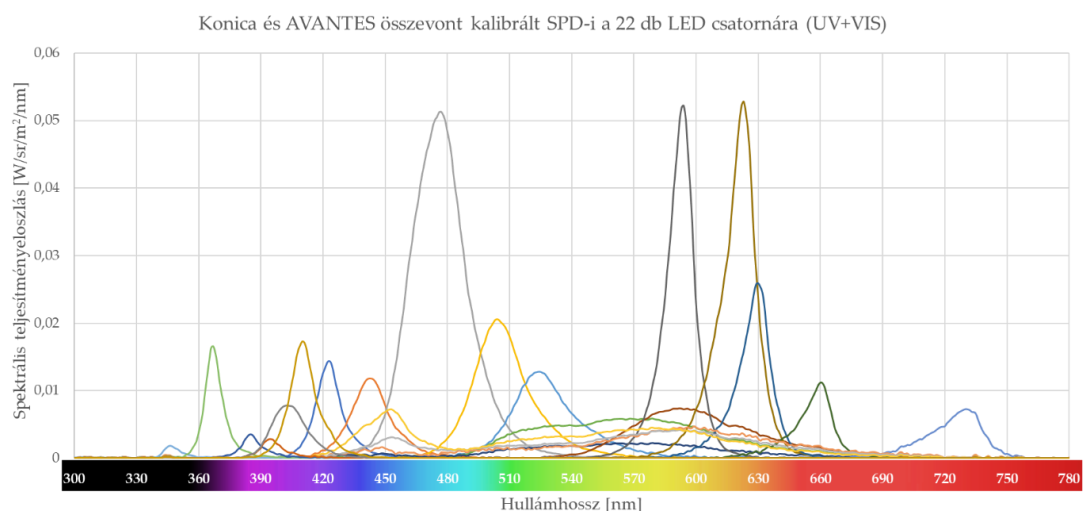
2.2.3.1. Kalibráció és eredményei

Ahhoz, hogy a LED-es fénykabin különböző kívánt megvilágításai rendelkezésre álljanak, ismerni kell a különféle LED-csatornák spektrális eloszlásait, valamint szintani jellemzőit. Emellett a megvalósított elektronikai vezérlés mellett produkált spektrális teljesítmények stabilitásáról is gondoskodni kell.

A kalibrációs mérések a következők:

- LED-csatornák spektrális teljesítményeloszlásának mérése külön-külön, illetve együttesen, különböző PWM-kitöltési tényezők mellett
- LED-ek spektrális torzulásainak vizsgálata különböző rendszerteljesítményeknél
- Fénytér spektrális reflexiójának és homogenitásának mérése

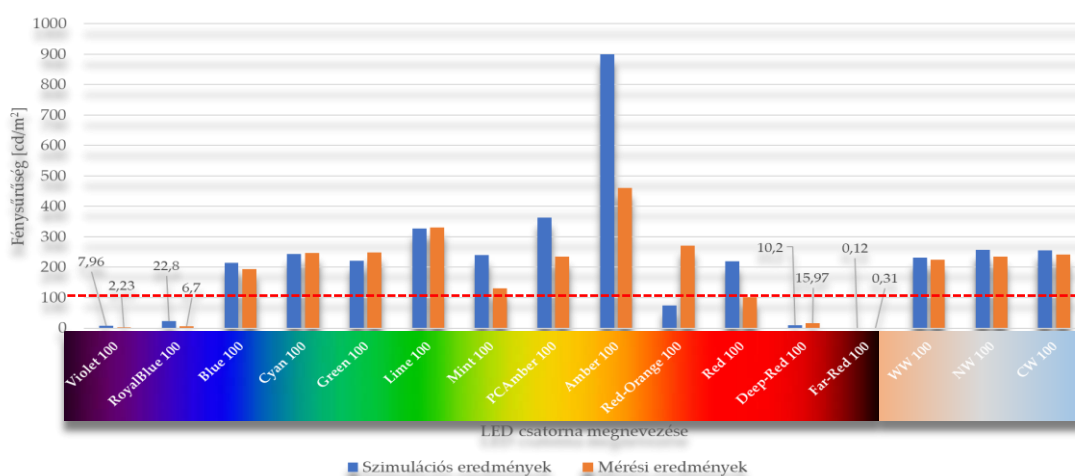
A mérések elvégzését követően az egyes LED-csatornák spektrális karakterisztikáit mutatja a 2-14. ábra.



2-14. ábra: Kalibráció után mért LED-csatornák spektrális karakterisztikái (OTDK 2023 PPT) [19]

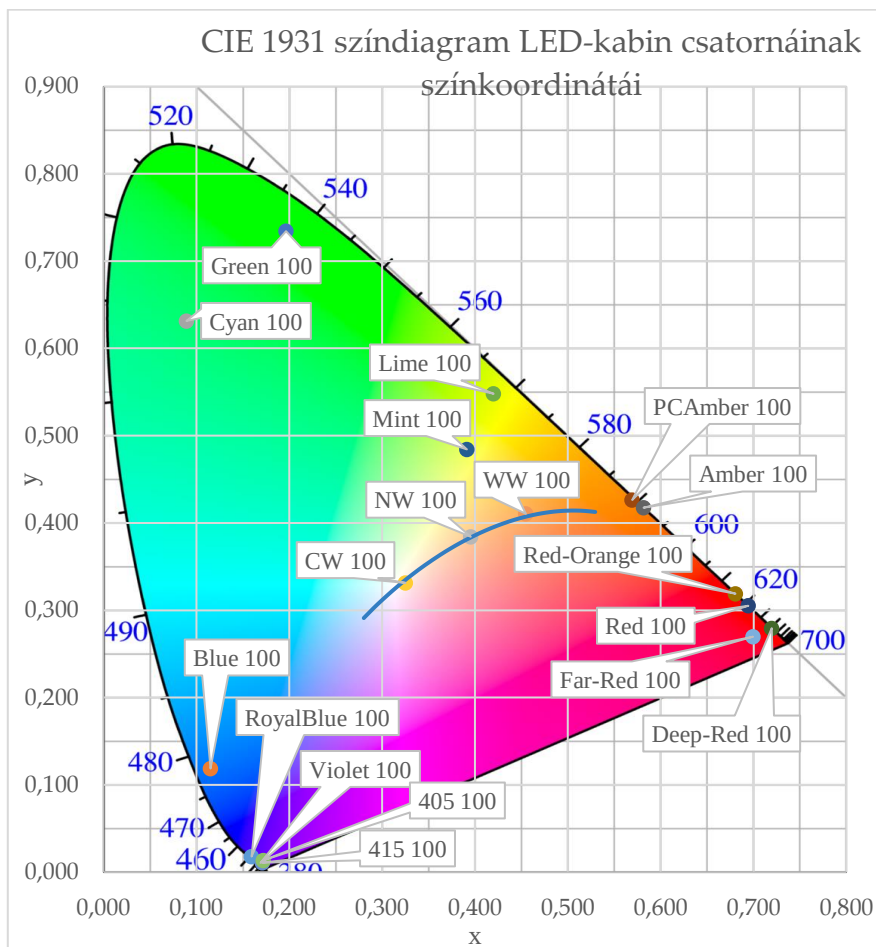
A spektrális eloszlások alapján a CIE 1931-es Yxy színtérbe átszámított színekoordináták értékeit pedig a 2-16. ábra szemlélteti. Ha a spektrum széleihez közel eső színpontokat összekötjük, megkapjuk a fénykabin gamutját, amely a monokromatikusnak tekinthető LED-csatornák színpontjai által kifeszített alakzaton belüli színek tartományát jelenti. Ezen az alakzaton belül található színárnyalatok elméletben végtelen finom hangolással kikeverhetők. Ennek részletes matematikai leírásáról a 2.3-as fejezetben esik szó.

A kalibráció utolsó lépéseként az előírt fénysűrűségek VIS tartományon belüli ellenőrzése került elvégzésre. Ehhez a szimulációs, illetve a mérések által kapott értékeket kellett összehasonlítani. A kapott fénysűrűségértékek a színszabályozó szoftver kulcsparaméterei, ezt a későbbiekben részletesen kifejtem. Az egyes LED-csatornák fénysűrűségértékeit tartalmazó diagramot a 2-15. ábra mutatja be.



2-15. ábra: LED-kabin csatornáinak szimulációs és mérések útján kalkulált fénysűrűségeinek összehasonlító diagramja (Forrás: saját diagram)

A fénysűrűség küszöbértékére a fénykabinok esetében a 100 cd/m^2 volt megadva, amelyet a látható tartományon a számunkra színkeverés szempontjából releváns csatornák mindegyike teljesít, így lényeges tényezőnek minősül.



2-16. ábra: LED-es fénykabin csatornáinak színpontjai a CIE 1931 Yxy színdiagramon feltüntetve [10]

2.3. Színoptimalizálás lehetőségei

A színterek definiált számítási során közös, hogy először a CIE X Y Z tristimulusos értékek meghatározásából indulnak ki, de ezt követően más és más transzformációval jutnak el a végeredményhez. Ennek részleteit 2.1-es fejezetben kifejtettem korábban.

A színoptimalizálás folyamatához először a probléma matematikai megfogalmazását szükséges elvégezni, majd pedig a megoldáskeresés lineáris, illetve nemlineáris jellegét javasolt megvizsgálni. Ennek függvényében pedig a megoldás vagy lineáris megoldási módszerekkel, vagy pedig egy regressziós optimumkeresési eljárással kapható meg. Ez LED-es rendszerekre nézve a szükséges számítások mennyisége erőteljesen függ az egymástól függetlenül spektrálisan hangolható csatornák számától.

Fölmerülhet a kérdés, hogy ha adódik egy jó megoldás, akkor az elegendő-e vagy létezik-e még több hasonlóan jó minőségű is. Ez a szintanban a metaméria, illetve az emberi színlátás mechanizmusa miatt szinte garantált, így ezek között valamilyen rangsorolási mechanizmust is be kell iktatni.

A megkülönböztetésben fehér fény esetén a referencia fényforráshoz képesti színvisszaadást jellemző színmetrikai paraméterek (CIE CRI (R_a , R_9) és TM-30 R_f , R_g , Duv, CCT, CQS), tetszőleges színpontra optimalizálás esetén pedig több megoldás esetén a spektrális eloszlások különbségeit jellemző paraméterek alkalmazása segítheti.

Látható, hogy a felvázolt probléma megoldása garantáltan többeleműnek várható, így ezek adatbázisszerű tárolására, kezelésére és rendszerezésére is hangsúlyt érdemes fektetni.

Ezen megfontolásokat figyelembe véve a következőkben kifejtem, hogy milyen megoldások léteznek jelenleg, ezekből a jelen esetben miket lehet hasznosítani és hogyan. Végül pedig a pontos megoldást zárt képlet formába öltve zárul ez a fejezet és következik az elmélet implementálása programozási környezetbe.

2.3.1. Színszabályozás a LED-es rendszerekben és erre használt eljárások

2.1-es fejezetben bemutatott szinterek, illetve színminősítő paraméterek mindegyikét integráló színoptimalizálási módszer megalkotásához alapos irodalomkutatás szükséges, amelyben elsősorban olyan cikkeket célszerű figyelembe venni, amelyek a színkeverést LED-es technológiákkal valósítják meg, illetve ennek elméletét alaposan kifejtik. Ezen kutatómunkám eredményét foglalják össze a következő bekezdések.

Egy több LED-csatornás fényforrás esetén a vizsgált fényforrás által kibocsátott fény színének meghatározása a CIE X, Y, Z tristimulusos értékekből levezethető attól függően, milyen színtérben történik a célszín szinkordinátáinak ábrázolása, illetve milyen egyéb színmetrikai jellemzőket vesz figyelembe az adott algoritmus.

2.3.1.1. Optimalizálási eljárás kiválasztása

Az általam elemzett tudományos cikkek számos megközelítést kínálnak erre a problémára. Közös bennük, hogy a LED-ek spektrális teljesítményeloszlásából indulnak ki, majd megalkotják azt a zárt matematikai képletet, amelyet valamilyen optimumkereső algoritmussal oldanak meg, hiszen egy adott színponthoz több lehetséges megoldás is létezhet. Itt a LED-re, mint színcsatornára hivatkoznak és a megfogalmazott célt spektrális hangolással oldják meg, elsősorban fehér fényre fókuszálva. A megoldás kereséshez a levezetésből kapott eredmény alakja, valamint a sokszabadságfokú bemenet révén a szerzők az úgynevezett négyzetes tört programozási eljárást használják fel, mint optimumkeresési eljárás.

A következőkben röviden áttekintem színszámítás általános számítási lépéseit polikromatikus fényforrásokra vonatkozóan. Ehhez a [13]-as forrásban található levezetést veszem alapul. Ebben a cikkben egy olyan módszert írnak le, amely polikromatikus fényforrások alatt megvilágított színes tárgyak színjavítását célozza meg, elsősorban fehér fényre optimalizálva. Ehhez a probléma megfogalmazását követően QFP (Quadratic Fractional Programming – Négyzetes Tört Programozás)

optimalizálási módszert használnak fel, amely eljárás igen komplex matematikai háttérismeretet kíván. Erről részletesebben a [14]-es forrásban írnak.

Legyen a polikromatikus fényforrás n darab különböző spektrálisan hangolható LED-csatorna együttese. Az egyes csatornák tristimulusos értékeit a tárgy színére a következőképpen definiálhatók:

$$X_0 = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \Phi_l(\lambda) \cdot \bar{x} \cdot d\lambda \quad (2.31)$$

$$Y_0 = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \Phi_l(\lambda) \cdot \bar{y} \cdot d\lambda \quad (2.32)$$

$$Z_0 = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \Phi_l(\lambda) \cdot \bar{z} \cdot d\lambda \quad (2.33)$$

Ahol:

- X_0, Y_0, Z_0 a tristimulusos értékeit jelölik a megvilágított tárgyszínek,
- λ [nm] a hullámhossz,
- $\Phi_l(\lambda)$ jelöli a fényforrás spektrális teljesítményeloszlását,
- k egy konstans arányossági tényező,
- $R(\lambda)$ a spektrális reflexióját jelöli megvilágított felületnek.

A LED-csatornák radiometriaival teljesítményértékeit tárolja a Φ_r vektor. Ekkor az i . csatornára vonatkozó tristimulusos értékek rendre:

$$X_0 = \mathbf{a}_x^T \cdot \Phi_r \quad (2.34)$$

$$Y_0 = \mathbf{a}_y^T \cdot \Phi_r \quad (2.35)$$

$$Z_0 = \mathbf{a}_z^T \cdot \Phi_r \quad (2.36)$$

Ahol az $\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z \in \mathbf{R}^n$, ahol n jelöli a LED-csatornák számát és az alábbiak szerint kerül definiálásra:

$$\mathbf{a}_x = \begin{bmatrix} k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \Phi_1(\lambda) \cdot \bar{x} \cdot d\lambda \\ \vdots \\ k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \Phi_n(\lambda) \cdot \bar{x} \cdot d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{a}_y = \begin{bmatrix} k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \Phi_1(\lambda) \cdot \bar{y} \cdot d\lambda \\ \vdots \\ k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \Phi_n(\lambda) \cdot \bar{y} \cdot d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\mathbf{a}_z = \begin{bmatrix} k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \overline{\Phi_1}(\lambda) \cdot \bar{z} \cdot d\lambda \\ \vdots \\ k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \overline{\Phi_n}(\lambda) \cdot \bar{z} \cdot d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Itt az $\overline{\Phi_{l_i}}(\lambda)$ az egyes LED-típusok relatív spektrális teljesítményeloszlását jelölik, amelyekre igaz, hogy $\int_{\lambda=380}^{780} \overline{\Phi_l}(\lambda) \Delta\lambda = 1$.

Ugyanezen elv mentén fényforrásra is felírhatóak ezek a mennyiségek:

$$\mathbf{b}_x = \begin{bmatrix} k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \overline{\Phi_{l_1}}(\lambda) \cdot \bar{x} \cdot d\lambda \\ \vdots \\ k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \overline{\Phi_{l_n}}(\lambda) \cdot \bar{x} \cdot d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{b}_y = \begin{bmatrix} k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \overline{\Phi_{l_1}}(\lambda) \cdot \bar{y} \cdot d\lambda \\ \vdots \\ k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \overline{\Phi_{l_n}}(\lambda) \cdot \bar{y} \cdot d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\mathbf{b}_z = \begin{bmatrix} k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \overline{\Phi_{l_1}}(\lambda) \cdot \bar{z} \cdot d\lambda \\ \vdots \\ k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \overline{\Phi_{l_n}}(\lambda) \cdot \bar{z} \cdot d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Ezekkel pedig a LED-csatornák aktuális kitöltési tényezőitől függően a színobjektum színekoordinátái (x, y) értékei a következők:

$$x_0 = \frac{X_0}{X_0 + Y_0 + Z_0} = \frac{\mathbf{a}_x^T \cdot \Phi_r}{(\mathbf{a}_x + \mathbf{a}_y + \mathbf{a}_z)^T \cdot \Phi_r} \quad (2.40)$$

$$y_0 = \frac{Y_0}{X_0 + Y_0 + Z_0} = \frac{\mathbf{a}_y^T \cdot \Phi_r}{(\mathbf{a}_x + \mathbf{a}_y + \mathbf{a}_z)^T \cdot \Phi_r} \quad (2.41)$$

Ugyanez a fényforrás színeire számítva:

$$x_l = \frac{X_l}{X_l + Y_l + Z_l} = \frac{\mathbf{b}_x^T \cdot \Phi_r}{(\mathbf{b}_x + \mathbf{b}_y + \mathbf{b}_z)^T \cdot \Phi_r} \quad (2.42)$$

$$y_l = \frac{Y_l}{X_l + Y_l + Z_l} = \frac{\mathbf{b}_y^T \cdot \Phi_r}{(\mathbf{b}_x + \mathbf{b}_y + \mathbf{b}_z)^T \cdot \Phi_r} \quad (2.43)$$

Ehhez az eredő fotometriai teljesítmény n csatornára nézve pedig általános alakban a bevezetett jelölésekkel:

$$\Phi_i = \Phi_{vi} \cdot \Phi_{ri}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.44)$$

Ahol:

- Φ_i az i . csatorna 1 W-os sugárzásból átszámított fényárama, amelyet a $V(\lambda)$ karakterisztikával, illetve a $k_m = 683,001 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ segítségével egy integrálással adható meg:

$$\Phi_{vi} = k_m \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \overline{\Phi}_i(\lambda) \cdot V(\lambda) \Delta\lambda, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.45)$$

Végül felhasználva, hogy a LED-es fényforrások eredő spektrális teljesítménye az egyes színcsatornák összege, a felületről visszavert színes fény tristimulusos értékének meghatározását a (2.46)-os, (2.47)-es és (2.48)-as egyenletek foglalják össze, ahol az egyes színcsatornák spektrális teljesítményeloszlás-vektorja, mint bemenet szerepel.

$$X_0 = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \sum_{i=1}^n \overline{\Phi}_i(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda = \sum_{i=1}^n X_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.46)$$

$$Y_0 = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \sum_{i=1}^n \overline{\Phi}_i(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda = \sum_{i=1}^n Y_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.47)$$

$$Z_0 = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} R(\lambda) \cdot \sum_{i=1}^n \overline{\Phi}_i(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda = \sum_{i=1}^n Z_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.48)$$

A felületi reflexiót elhagyva pedig a fényforrásra vonatkozó tristimulusos értékeket kapjuk (2.49 – 2.51). A dolgozat témája szempontjából ez a lényegesebb most.

$$X_l = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \sum_{i=1}^n \overline{\Phi}_i(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda = \sum_{i=1}^n X_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.49)$$

$$Y_l = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \sum_{i=1}^n \overline{\Phi}_i(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda = \sum_{i=1}^n Y_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.50)$$

$$Z_l = k \cdot \int_{\lambda=380}^{780} \sum_{i=1}^n \overline{\Phi}_i(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda = \sum_{i=1}^n Z_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.51)$$

A kapott általános formula alakja mind a CIE L*a*b*, mind a CIE L*u*v* szintérre átszámítható. A kérdés, hogy az optimalizálás során a célszintől való távolság hogyan és melyik színrendszerben kerüljön optimalizálásra, befolyásolja-e ez az optimalizálás sebességét, illetve a robusztusságát.

A CIE L*a*b* szintér színárnyalatának különbségei egy adott egyenes mentén közel egyenletesnek tekinthetők, ahogy erről a 2.1.1-es fejezetben szó esett. Ennek jellemzésére a színingerkülönbséget használhatjuk, a teljesség igénye nélkül álljon itt ennek képletes alakja:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_A^* - L_R^*)^2 + (a_A^* - a_R^*)^2 + (b_A^* - b_R^*)^2} = f(k_1 \cdot (\Phi_1(\lambda), \dots, k_n \cdot \Phi_n(\lambda)) \quad (2.52)$$

Ahol:

- $k_1, \dots, k_n$: a LED-csatornák PWM értékéből kapott arányszám, amely megmutatja, hogy a maximálisához képest mekkora teljesítményen üzemel a LED. A spektrális hangolás ezek változtatásával érhető el,
- ΔE_{ab}^* : színinképpeltérés a CIE $L^*a^*b^*$ színtér kívánt (R alsóindexű), illetve aktuális (A alsóindexű) koordinátaival kifejezve.

Ezzel egy olyan függvény írható fel, amelynek bemenete n darab színcsatorna, kimenete pedig a színinképpeltérés adott etalon vagy célszínre viszonyítva. Ennek alakjából következik, hogy megoldására komplex matematikai módszerekre van szükség.

A QFP-féle probléma megközelítés mellett találtam egyszerűbben kivitelezhető optimumkeresési eljárást is.

A [15]-ben egy szemléletes és a dolgozat témája szempontjából releváns alkalmazási példát hoznak a DE (differenciális evolúciós) algoritmus alkalmazására. Ebben a cikkben a szerzők egy korábbi négycsatornás LED-es fényforrással kivitelezett fehér fény optimalizálását egészítik ki elméleti fényforrások kutatásával. A céljuk ezzel egyrészt az, hogy a spektrális hangolással úgy növeljék a fényhasznosítást, hogy közben a színvisszaadási mutatók is kellően jók maradjanak. A kapott elméleti eredmények ismeretében a gyártók később olcsóbb és energiahatékonyabb LED-típusokat fejleszthetnek ki.

Ezen kívül említést érdemel, hogy a szerzők a DE algoritmus választását többek között a korábbi munkájukban kapott eredményekre alapozták, ahol valós LED-csatornákra hatékonyan működött. A cikkben emellett kifejtik röviden a DE algoritmus elméleti felépítését, illetve a fitness függvény fontosabb paramétereit és súlyait, amelyek rendre a CQS, illetve a CIE CRI színvisszaadási indexei, illetve a fényhasznosítás paramétere. Ezek különböző súlyozással szerepelnek a modellben. A differenciális evolúciós algoritmusra vonatkozóan feltüntetik továbbá a generációk számát, a populáció számát, a mutáció számát, illetve a keresztezés paraméterét is.

A cikk konklúziójában a kapott eredmények az elméleti fényforrásokra vonatkozóan biztató képet jósolnak olyan LED-es fényforrásokra, amelyek kedvező színvisszaadást adnak 3000-4000 K-es CCT-tartományon. Mindez pedig csupán 4 színcsatornás esetben is már megoldható lehet a szerzők szerint. Ezen tények a saját munkámban is hasznosíthatóak a DE modell alapvonásaival együtt.

A [16]-os cikk az előbbiekhöz képest sokkal tágabb képet ad a színterminál lehetséges módszereiről, így az előbbieket kiegészítve meg kell említenem az úgynevezett *interior-points* algoritmust, mint nemlineáris problémákra alkalmazható eljárást. A cikk egy zárt szabályozókörrrel rendelkező komplex szoftveres és hardveres rendszert mutat be, amelyben az említett algoritmus hatékonyan szabályozza a 6 csatornás LED-fényforrás működését úgy, hogy megőrzi a kívánt fény színét, illetve CCT értékét,

miközben a környezeti fényviszonyokra, illetve a hőmérsékletváltozására és az ezekből fakadó spektrális eltolódásra is reagál.

A cikkből egyértelműen kiderül, hogy egy ilyen szabályozókörhöz igen pontos és fejlett technológiájú eszközök kellene, különösen a visszacsatolás ágában lévő multispektrális szenzor esetében. Az algoritmus ugyan lineáris problémákra is alkalmazható, de ha több mint 3 LED-csatornát alkalmazunk, abban az esetben a rendszer alulhatározottá válik és a nemlineáris módszereket szükséges alkalmazni. Jelen esetben a LED-es fénykabin 22 csatornával rendelkezik, így alulhatározott jellegéből adódóan nemlineáris problémaként kell kezelni a spektrális hangolását.

Mivel egy zárt szabályozókört megtervezése igen bonyolult, ráadásul a spektrális visszacsatolást a [16] és [17] alapján nem a legegyszerűbb RGB szenzorokkal érdemes elkészíteni, így a feladatot egyelőre egy nyílt körben visszacsatolás nélkül oldottam meg, amelyhez a DE algoritmus implementálása mellett döntöttem. Ezt többek között az indokolta, hogy ezt a módszert viszonylag egyszerű implementálni, továbbá hatékony és az egyedi szempontok szerinti átalakítása is egyszerű. A későbbiekben egy jól megtervezett szabályozókört esetében viszont indokolt lehet áttérni az *interior points* algoritmusára.

2.3.1.2. Evolúciós algoritmusok általános elmélete

A 2.3.1.1-es alfejezetből kiderült, hogy a 22 csatornás LED-es fénykabin színoptimalizálása lineárisan nem megoldható, illetve nemcsak egy megoldást adó probléma. Emiatt a differenciális evolúciós algoritmus alkalmazása mellett döntöttem. A következő bekezdések az evolúciós algoritmusokról adnak rövid áttekintést, amelyhez a [17] és [18] forrásokra támaszkodom.

Az evolúciós algoritmusok a természetben lezajló folyamatokat utánozva keresik meg több generáción keresztül az aktuális populációt vizsgálva a legjobb megoldást vagy megoldásokat. A folyamat során az adott problémára egyszerre több lehetséges opciót is tesztelünk, ezek az adott generációt alkotó populáció egyedei.

Attól függően, hogy az egyes tagok egy populációban milyen megoldást adnak, a jobbak kiválasztódnak valamilyen elv alapján (fitness értékkel arányosan vagy véletlenszerűen), míg a rosszabbak kikerülnek a fejlődési láncból. A következő generációban a kiválasztottak mellett úgynevezett leszármazott egyedek is megjelenhetnek, őket az előző generációból véletlenszerűen kiválasztott néhány egyed keresztezésével, majd mutációjával alkotjuk meg. Ennek eredményeképpen generációról generációra minden populáció egyre jobb eredményeket produkál, vagyis evolúción megy keresztül. Az optimalizálás akkor ér véget, amikor az N generáció lefut vagy valamilyen leállási kritérium be nem következik. A procedura a legtöbb, megoldható problémára konvergens megoldást ad, viszont a populáció, illetve a generációk számától függő számítási időt kapunk. Ezen hátrány egy előre programozható szimuláció esetén viszont nem probléma, kivéve, ha valós idejű optimalizálást kíván az ember megvalósítani. Ennek javítására a megvalósított DE algoritmus teljesítményértékelését követően térek ki.

Belátható, hogy a folyamat erősen sztochasztikus jelleget mutat, így előfordulhat, hogy a legjobbnak ítélt egyed nem a globális optimummal egyezik meg. Másrészt sosem ugyanonnan indul az optimumkeresés, így nagy valószínűséggel az addig legjobbnak hitt eredménynél még alkalmasabbat hoz ki az algoritmus, ha elég hosszan futtatjuk. Ennek minimalizálását segíti elő, ha több helyről is elindítjuk a folyamatot, vagy több egyedet adunk meg egy populációnak, illetve, ha a generációk számát növeljük. Ezzel azonban a számítások komplexitását és futási idejét is jelentős mértékben megnöveljük, így a garantáltan globális optimum eléréséhez nagyobb számítási kapacitásokra lehet szükség adott problémától függően. A kihívást ennél a módszernél így az optimális komplexitás, valamint a kezdeti és leállási feltételek helyes megadása jelenti.

Az evolúciós algoritmusok típusait három csoportba sorolják. A [18]-as forrás szerint ezek rendre:

- Evolúciós programozás
- Evolúciós algoritmusok:
 - Genetikus (GE)
 - Bakteriális evolúciós (BE): baktériumok evolúcióját követi, gyors konvergencia jellemzi, kvázi optimum eljárásnak minősül. [18]
 - Differenciális evolúciós (DE)
- Evolúciós stratégiák: optimális programok létrehozásánál használják, típusaik:
 - $(\mu + \lambda)$ – es: keresés,
 - $(1 + 1)$ – es: véletlen keresés,
 - $(1 + 1)$ – es: hegymászó algoritmus,
 - $(1 + \lambda)$ – es: többpontos szomszédos keresés,
 - $(\mu + 1)$ – es állandósult állapotú GA (genetikus algoritmus).

Ezeket összeköti, hogy alapvetően az alábbi eljárások történnek meg alkalmazásuk során, csupán részletekben rejlő különbségek választják el őket egymástól [18]:

- Mutáció: A kiválasztott egyed véletlenszerű megváltoztatását jelenti. Ezt általában az elem bináris formáján hajtják végre.
- Keresztezés: random két szülő egyed kiválasztása után annak azok random bináris részeit kicserélve kapható meg az új egyed. A folyamatot a keresztezési pont jellemzi.
- Kiválasztás/szelekció: minél jobb az adott megoldás, annál nagyobb értéket kap a fitness függvény kiértékelésénél. Ennek folyamatát gyakran a Rulett-kerék elv szerint valósítják meg, ahol a nagyobb fitness értékű megoldások nagyobb eséllyel választódnak ki a következő generáció megalkotásához. Emellett léteznek más kiválasztási eljárások is, amelyek nem feltétlen veszik figyelembe az adott egyed fitness értékét.

- Kiértékelés/visszahelyettesítés: Adott megoldást jelképező populációegyedre a megalkotott fitnessz függvényt kiértékelve előáll a populáció összesített eredménye, amely alapján a kiválasztást, illetve az optimum keresésénél használt összehasonlítást végre lehet hajtani.

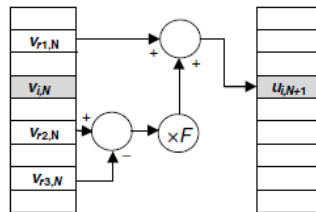
A téma szempontjából a DE algoritmus felépítését mutatom be a következő bekezdésekben a [17]-ban található leírásnak megfelelően.

Adott egy probléma, amelynek megoldását egyszerű analitikus úton nem lehetséges megtalálni. Ehhez a DE típusú algoritmus hatékony megoldást kínál, amelyhez egy úgynevezett fitnessz függvényt kell definiálni, amely egy súlyvektor felhasználásával veszi figyelembe a vizsgált probléma megoldását meghatározó kritériumokat. A szintani optimalizálás esetében ez úgy valósul meg, hogy a kívánt színmétrikai jellemzők optimális értékétől való eltérését adjuk meg ennek a függvénynek és ezt minimalizáljuk. A korábban leírt populációk azon elemei, amelyek rosszabb eredményt adnak ezen függvények kiértékelése során, kiesnek a folyamatból, míg a meglévőkből új elemeket képez az eljárás az alábbi módon:

$$u_{i_{N+1}} = v_{r_1, N} + F \cdot (v_{r_2, N} - v_{r_3, N}) \quad (2.53)$$

Ahol:

- $v_{r_1, N}$: az N . generáció egy szülő egyede,
- $r_1, r_2, r_3 \in [1, P]$, azaz azon random kiválasztott elemek indexei, amelyek a korábbi populációból kerülnek ki,
- $v_{r_2, N}, v_{r_3, N}$: random kiválasztott egyedek az N . generációból, amelyekre a mutációt a különbségükből képzett, illetve $F \in [0, 2]$ mutációs súllyal beszorzott értékkel hajtjuk végre a (2.53)-as képletnek megfelelően. Ez tulajdonképpen a differenciális evolúciós algoritmus lényege.



2-17. ábra: DE algoritmus mutációjának folyamata az újabb generáció megalkotásánál [17]

Az új generáció képződését a [17]-es forrásban található ábra szemléletesen mutatja be, amelyet itt a 2-17. ábra **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** jelöl. Ez alapján a következő generáció példányait az azt megelőző generáció adott szülő egyedéből, illetve a hozzá véletlenszerűen kiválasztott, megadott mutációs paraméterrel képzett két példány különbségével határozza meg az eljárás. Az újabb populációban természetesen a legjobb fitnessz értékekkel szereplő megoldás is szerepel.

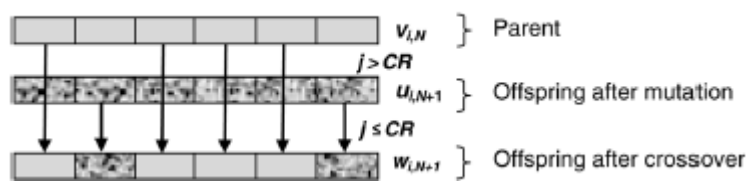
A keresztezés eljárásának általános folyamatát a 2-18. ábra mutatja be a [17]-es forrásnak megfelelően:

$$w_{ji,N+1} = \begin{cases} u_{ji,N+1}, & \text{ha: } j \leq CR \mid j = i \\ v_{ji,N}, & \text{ha: } j > CR \mid j \neq i \end{cases} \quad (2.54)$$

Ahol:

- $i \in [1, 2, \dots, P]$ és $j \in [0, 1]$: véletlenszerűen választott értékek,
- $CR \in [0, 1]$: keresztezést befolyásoló tényező, amely valós értékű (például: 0,5).

Az algoritmus végrehajtása során a leszármaztatott elemekkel kiegészített újabb, valamint a korábbi generációra vonatkozó fitnessz értékek kerülnek összehasonlításra. Ezután a szelekció következik. Így valósul meg a jobb eredményt adó elemek tulajdonságainak továbbvitele.



2-18. ábra: DE algoritmus keresztezésének folyamata az újabb generáció megalkotásánál[17]

Ez a színoptimalizálás tekintetében a kisebb színingerkülönbség, illetve az ideálistól kisebb mértékben eltérő színvisszaadási indexeket adó eredmények felkutatását segítheti elő. Ezen mennyiségek kapcsolatát érdemes valamilyen súlyvektorral is figyelembe venni. Ennek egy koncepció megvalósítását mutatja be a (2.55)-ös egyenlet:

$$f_{fit}(\Delta E_{ab}, L_v, CRI, R_a, R_f, R_g, D_{uv}, CCT) = w_1 \cdot \Delta E_{ab} + w_2 \cdot \Delta L_v + \dots w_n \cdot \Delta E_m \quad (2.55)$$

Ahol:

- ΔE_{ab} : színingerkülönbség, CIE $L^*a^*b^*$ színtérben definiálva,
- L_v : fénysűrűség $\left[\frac{cd}{m^2}\right]$ -ben megadva,
- CRI, R_a, R_f, R_g : CIE CRI színvisszaadási, valamint a IES TM-30-as szabvány színvisszaadási indexei,
- D_{uv} : Planck-görbétől való távolságot jellemző mennyiség, lásd: Színterek-es fejezetet.
- CCT : korrelált színhőmérséklet, részletek a Színterek-es fejezetben.

Ebben a fitnessz függvényben számos olyan paraméter szerepel, amelyek egymásból analitikus módon átszámíthatóak, de a későbbiekben kifejtem, miért emellett az alak mellett döntöttem.

Külön említést érdemel, hogy az N generáció után kapott optimum nem biztos, hogy egyúttal a globális optimumnak felel meg, így további feltételek megadása is szükséges lehet, amelyek garantálják, hogy a kapott eredmény minden kritériumot kellő mértékben kielégít. Ennek megvalósítása problémától függően különféle utakon lehetséges, így a színkoordináták optimalizálására vonatkozó megoldást külön fejezetben térek ki részleteibe menően.

3. SZÍNSZABÁLYOZÓ ALKALMAZÁS ÉS ALGORITMUS BEMUTATÁSA

3.1. Módosított DE modell felépítése színszabályozásra

A 2.3-as fejezetben bemutatott módszerek ismertetése során a DE algoritmus implementálása mellett döntöttem annak egyszerűsége, valamint stabil működése miatt. Ezt az is indokolta, hogy egyelőre nem áll rendelkezésre zárt szabályozókör a LED-es fénykabinon belül, így egyszerűbb, visszacsatolás nélküli megoldások is szóba jöhetnek, amelyeknél az optimalizálási idő annyira nem lényeges, ha csak a végeredmények visszajátszása a cél.

A differenciális evolúciós algoritmus szintani problémára való átalakításához legelőször egy kellően robusztus fitness függvényt kellett definiálnom, amely az összes optimalizálni kívánt paramétert tartalmazza, miközben lehetőséget biztosít a hibatagok eltérő súlyokkal való számítására. Emellett arra is figyelni kellett, hogy a hibafüggvény a bemeneti színcsatornák spektrális eloszlásától, valamint a színterek számítási eljárásaitól függő számítási idővel rendelkezik, amely a valós idejű és gyors optimalizálást korlátozhatja. Ettől egyelőre eltekintettem az első bekezdésben említett indokok miatt.

3.1.1. Fitness függvény felépítése

A szíinkoordináták mellett a fénysűrűsége, valamint a korrelált színhőmérsékletre is optimalizálni képes algoritmust hoztam létre, amelyben a kívánt színmetrikai jellemzők eltéréseit vettem figyelembe különböző súlyokkal, a korábbiakban leírtaknak megfelelően. Az, hogy ezek közül melyeket vesszük figyelembe, a kezelőfelületen adhatjuk meg, ezzel az egyes paraméterek hatása is nyomon követhető a fejlesztés során. A megalkotott fitness függvényt a (2.56)-os egyenlet mutatja be:

$$f_{fit}(\mathbf{S}_k \cdot \Phi_{LEDs}(\lambda))$$

$$= \frac{\mathbf{O} \circ \underbrace{[w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6 \ w_7 \ w_8]}_{\mathbf{W}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta E_{CIE_{Yxy}} | \Delta E_{CIE_{uv}} | \Delta E_{CIE_{uv'}} | \Delta E_{CIE_{Lab}} \\ \Delta E_{L_v} \\ \Delta E_{CCT} \\ \Delta E_{TM30_{Rg}} \\ \Delta E_{TM30_{Rf}} \\ \Delta E_{TM30_{Duv}} \\ \Delta E_{CIE_{Ra}} \\ \Delta E_{CIE_{Rf}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{E}}}{\sum_{i=1}^8 o_i \cdot w_i} \quad (2.56)$$

Ahol:

- $i = 1 \dots M$: adott hibatagot jelölő sorszám, M: a hibatagok száma,
- $\mathbf{W}$: súlymátrix, amelynek w_i hibatagok súlyai,

- $\sum_{i=1}^M o_i \cdot w_i$: a hibatagok súlyainak, illetve a hozzájuk tartozó engedélyező mátrix elemeinek szorzatösszegét jelöli, $M=8$,
- **O**: a kiválasztott optimalizálási beállításhoz rendelt engedélyező mátrix, elemei M darab 0 vagy 1, a súlymátrixot ezzel elmentként kell beszorozni,
- **E**: hibatagokat tartalmazó mátrix. A két mátrix skaláris szorzatának és a súlyvektor elemeinek összege adja a fitness függvény értékét, amelyet az algoritmus minimalizálni törekszik.

Az egyes hibatagokat a 3-1. táblázat foglalja össze:

3-1. táblázat: A DE algoritmus fitness függvényének hibatagjai

Hibatag megnevezése	Hibatag matematikai képlete
Általános szinkordinátákra vonatkozó hibatag	$\Delta E_{ab_{\text{ált}}} = \sqrt{(x_{akt} - x_{cél})^2 + (y_{akt} - y_{cél})^2 + (z_{akt} - z_{cél})^2}$
Fénysűrűség célértékére vonatkozó hibatagja	$\Delta E_{L_v} = \frac{L_{v_{aktuális}} - L_{v_{kívánt}}}{L_{v_{kívánt}}}$
Fehér fény esetén értelmezett korrelált színhőmérsékletre vonatkozó hibatag	$\Delta E_{CCT} = \frac{CCT_{aktuális} - CCT_{kívánt}}{CCT_{kívánt}}$
Az IES TM-30-as szabvány gamut indexének hibatagja	$\Delta E_{TM30_{R_g}} = \frac{R_{g_{aktuális}} - R_{g_{kívánt}}}{R_{g_{kívánt}}}$
Az IES TM-30-as szabvány színhűség indexének hibatagja	$\Delta E_{TM30_{R_f}} = \frac{R_{f_{aktuális}} - R_{f_{kívánt}}}{R_{f_{kívánt}}}$
A D_{uv} hibatagja	$\Delta E_{TM30_{D_{uv}}} = \frac{D_{uv_{aktuális}} - D_{uv_{kívánt}}}{D_{uv_{kívánt}}}$
A CIE eredeti színvisszaadási indexének hibatagja	$\Delta E_{CIE_{R_a}} = \frac{R_{a_{aktuális}} - R_{a_{kívánt}}}{R_{a_{kívánt}}}$
A CIE módosított színvisszaadási indexének hibatagja	$\Delta E_{CIE_{R_f}} = \frac{R_{f_{aktuális}} - R_{f_{kívánt}}}{R_{f_{kívánt}}}$

A 3-1. táblázatban szereplő képletek mennyiségeinek részletes számításait a 2.1.4-es fejezet tartalmazza. Meghatározásukhoz a LED-csatornák abszolútérték helyes spektrális teljesítményeloszlásaira, valamint a CIE színmegfeleltető függvényeire van szükség. Ezt követően a különféle szinkordináta számítások vagy színvisszaadási indexek kalkulálási következik, majd a hibatagok képzése és értékelése.

A megvalósítani kívánt színárnylatot a különféle színterek színekoordinátái (CIE 1931 Yxy, CIE 1960 UCS u, v, CIE 1976 UCS u',v', CIE Lab, CIE Luv), a fehér fényt pedig a korrelált színhőmérséklet, illetve a referencia fényforrásától függően a különféle szabványok által definiált színvisszaadási indexek jellemzik, így a LED-es fénykabin teljes gamut tartományán alkalmazható a modell. Mindezt az irodalomkutatásom során feldolgozott, az evolúciós algoritmusok alkalmazására vonatkozó kutatások is alátámasztják, például a [13] és a [17] forrás.

A hibatagokhoz tartozó súlyvektor elemei a 3-1. táblázat elemeinek sorrendjét követve:

$$W = [10 \ 5 \ 10 \ 3 \ 3 \ 2 \ 1 \ 1] \quad (2.57)$$

A súlyokat 1-10-es skálán adtam meg. Látható, hogy a CCT és a színekoordinátákhoz rendelt színíngerkülönbségre adott súlyok 10-es értékkel a legnagyobb prioritással rendelkezők. Ezt követi a fénysűrűség 5-ös, majd az IES TM-30-as színhűség (R_f), illetve gamutindex (R_g) értékei, utána a D_{uv} , végezetül pedig a két CIE színvisszaadási index R_a és R_f . A fénysűrűség mind a CCT, mind a színekoordináta optimalizálásban fontos kiegészítő elem, így annak súlyát a második legnagyobbra állítottam a listában.

Ezen megfontolásokat az is indokolja, hogy a tetszőleges szín, illetve a fehér fény kikeverését a fénysűrűségértékek figyelembevételével együtt ajánlatos javítani, például színmaszkolósos színtani kísérletek esetében [11].

A fitness függvény kiértékeléséhez a számításokat nagy vonalakban az alábbi lista foglalja össze:

- Tristimulusos értékek, majd színekoordináták számítása CIE Yxy, CIE 1960 UCS uv és 1976 UCS u'v'-ben, illetve sRGB-be, CIELab-ba, valamint CIELuv-ba.
- Színvisszaadási indexek számításai – referenciákkal való összevetés, eredő indexértékek számítása.
- Hibatagok képzése, majd súlyaikkal való összegzés, minden populációegyedre.
- Egyedi paraméterek küszöbértékeinek külön vizsgálata az aktuális megoldások kimentésének eldöntésére, adott esetben egyed kimentése megoldási adatbázisba.

Az utolsó pontban említett kiválasztási feltételek küszöbértékeit foglalja össze a 3-2. táblázat. Ezek értékeit tapasztalati úton választottam meg úgy, hogy az aktuális optimalizálásnál aktív paraméterek egyenlő eséllyel legyenek figyelembe véve. A lehetséges esetek:

- Színekoordináta és fénysűrűség egyidejű optimalizálása,
- Korrelált színhőmérséklet és fénysűrűség egyidejű optimalizálása.

Ebből látszik, hogy a színekoordináta-korrelált színhőmérséklet páros nem szerepel ebben az összerendelésben, mivel a kettő részben összefügg, de a színekoordináta nagyobb halmazt jelent a megoldások terén.

3-2. táblázat: Megoldásokat tartalmazó buffer kimentési küszöbértékek

Vizsgált paraméter megnevezése	Küszöbérték
Színíngerkülönbség adott szintekre nézve	0,005
Fénysűrűség relatív hibája a kívánt értéktől	0,01
Színhőmérséklet relatív hibája a kívánt értéktől	0,05

Az differenciális evolúciós algoritmusok működését a 2.3.1.2-es fejezetben már bemutattam, most inkább a saját modellem egyedi, hozzáadott vonásait ismertetem. Ezek programozástechnikai részleteire majd a 3.2-es fejezetben térek ki.

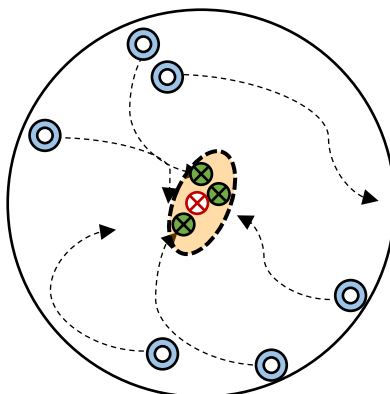
3.1.2. Optimalizálás menete és egyedi vonásai

A modellben optimalizálható paraméterek listáját a 3-3. táblázat foglalja össze:

3-3. táblázat: Optimalizálható paraméterek csoportosítása

Színkoordináták	Fehér fény paraméterek
CIE 1931 Y_{xy} , CIE 1960 UCS u, v , CIE 1976 UCS u^*, v^*	CCT CIE R_a, R_f , IES TM-30 R_f, R_g, Duv

A kívánt színkoordináta elérését az adott szintérben egy pont köré rajzolható gömb (térbeli szinterek, például CIELab, CIELuv), vagy pedig egy körlap (síkbeli, harmadik koordináta fixen tartásával), mint megoldási halmaz pontjai adják. Ezen pontokat további osztályozás alá érdemes vetni attól függően, hogy milyen összesített és egyedi színmetrikai tulajdonságokkal rendelkeznek.



3-1. ábra: Színkoordináta optimalizálás elvi megközelítése (saját ábra)

A 3-1. ábra alapján az algoritmus legelején a kezdeti populáció elemei (kék körök) közül néhány tovább fejlődik (konvergálás irányát jelző nyíl befelé mutat), majd idővel bekerül a megoldás környezetébe, míg van, amelyek nem (nyíl kifelé mutat) és kiesik az evolúciós folyamatból. A 3-1. ábra

alapján a szaggatott vonallal jelzett, MacAdam féle ellipszisekre hasonlító területen belül (ez például a CIELab színtérben L fixen tartása mellett kvázi kör) minden megoldás ekvivalensnek tekinthető, mivel az emberi szem ezek árnyalatait már nem képes megkülönböztetni. Ezen tartományt én körrel közelítettem, és egy sugár küszöbértékkel adtam meg ennek a méretét (színingerkülönbség értéke, lásd: 3-2. táblázat). A végeredmények ezen tartomány elemei közül kerülhetnek ki. Amennyiben nincs ilyen, akkor a tartomány határához legközelebb eső pontokból válogat az eljárás.

Egy adott színpontot, amely nem a LED-csatornák színekoordinátaival egyezik meg, megkaphatunk legalább 2 színcsatorna kombinációjából attól függően, hogy a kiválasztott alapszínek által kifeszített egyenes vagy sokszög (háromszög, négyszög vagy N csúccsal rendelkező sokszög, ahol N a LED-csatornák száma) vonalaira (két szabadsági fok) vagy belső tartományaiba ($N > 2$ szabadsági fok) esik-e. Ezt, mint geometriai feltételt a LED-csatornák kiválaszthatóságával vettem figyelembe.

Másrészt a megoldáskeresésnek nemcsak az optimumok elérése, hanem a sokféle, spektrálisan minél inkább különböző beállítások felkutatása is a célja. Erre egyelőre a véletlenszerű egyedgeneráláson, valamint a mutációkon kívül nem alkalmaztam más, egzakt módszert, de a továbbfejlesztési lehetőségeknél erre röviden ki fogok majd térni.

Végül az optimalizálás leállási feltételeit aszerint határoztam meg, hogy az eredmények adatbázisába mikor került kimentésre a kívánt $L=10$ darab megoldás. Ez egyrészt biztosítja, hogy az eredmények keresése ne vegyen igénybe az indokoltnál hosszabb időt, ugyanakkor, ha nincs gyors konvergencia, kellő időt ad ahhoz, hogy átvizsgálja a teljes értelmezési tartományt. Megjegyzendő, hogy 22 színcsatorna esetén ez rendkívül nagynak tűnhet, de amennyiben a LED-csatornák színpontjai által meghatározott gamut területén belül választunk pontokat, biztosan találunk olyan megoldást, amely a kívánt színpont MacAdam ellipszisében belül helyezkedik el, így az emberi szem számára ekvivalens megoldásnak minősül.

A teljes algoritmus felépítését és folyamatát a (2.58) - (2.65.) egyenletei mutatja be:

- Optimalizálás engedélyező (**O**), valamint a súlymátrixának (**w**) és a kezdeti populációjának inicializálása, majd az aktív LED-csatornák spektrális eloszlásainak meghatározása: (2.58) - (2.59.)
- Mutáció, illetve keresztezés folyamata, ahol a mutációs faktort (F) és keresztezési konstanszt pedig CR jelöli: (2.60) - (2.61.), részletek a 2.3.1.2-es fejezetben.
- Aktuális és a mutáció + keresztezés által kapott egyed összehasonlítása, a jobbik kiválasztása (2.62).
- Küszöbértéken belüli fitness érték esetén eredmény kimentése a bufferbe (2.63.)
- Ha a buffer az előírt számú ($L=10$) jó eredményekkel megtelik, leáll a ciklus, egyébként G_{max} generáción keresztül fut *for* ciklus formájában.

$$\Phi_{aktív}(\lambda) = \mathbf{K} \circ \Phi_{LEDs}(\lambda), \quad \mathbf{O} = [o_1 \dots o_8], \quad \mathbf{w} = [w_1 \dots w_M] \quad (2.58)$$

$$PWM_{pop_k} = \begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{P1} & \dots & S_{PN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,k} \\ \vdots \\ S_{P,k} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

for ciklus
k=1...G_{max}

$$Mutáció: S_{i,k} \xrightarrow{F} C_{i,k+1} \quad (2.60)$$

$$Keresztezés: \begin{bmatrix} C_{1,k+1} \\ \vdots \\ C_{P,k+1} \end{bmatrix} \& \begin{bmatrix} S_{1,k} \\ \vdots \\ S_{P,k} \end{bmatrix} \xrightarrow{CR} \begin{bmatrix} X_{1,N+1} \\ \vdots \\ X_{P,N+1} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

$$\min \begin{cases} f_{fit}(S_{i,k} \cdot \Phi_{aktív}(\lambda)) \\ f_{fit}(C_i \cdot \Phi_{aktív}(\lambda)) \end{cases} \rightarrow PWM_{BEST} = S_{i,k} | C_{i,k+1} \quad (2.62)$$

$$PWM_{BEST} \xrightarrow{\Delta E_{ab_{ált}} < \Delta E_{ab_{th}} \mid \Delta CCT_{akt} < \Delta CCT_{th} \mid \Delta L_{v_{akt}} < \Delta L_{v_{th}}} buff \ll PWM_{BEST} \quad (2.63)$$

$$méret(buff) \geq L \rightarrow optimalizálás vége \quad (2.64)$$

A bemutatott algoritmust így általánosan a mutációs ráta (F), a keresztezési konstans (CR), a generációk száma (G_{max}), a populáció mérete (P) jellemzi. Ehhez jönnek hozzá az általam definiált kiegészítő leállási, illetve értelmezési tartományra, valamint a kimentésre vonatkozó feltételek: $\mathbf{K}$ az optimalizálásban részt vevő LED-csatornák 0/1-es értékekből álló engedélyező mátrixa, $\mathbf{O}$ az optimalizálás típusától függően a fitness függvény aktuálisan figyelembe vett súlyainak engedélyező mátrixa (szintén 0/1-es értékekkel), végül a $\mathbf{w}$ a fitness függvény paramétereinek súlymátrixa (2.57)-es egyenletnek megfelelően.

Felmerül a kérdés, hogy mekkora számítási kapacitásra van szükség ahhoz, hogy garantáltan legyen legalább egy optimális megoldás a kiválasztott feltételeknek megfelelően. Erre az alábbi részsámítások lehetnek hatással:

- Színcsatornák spektrális eloszlásaiból a színmetrikai jellemzők számítása, ahol számos mátrixművelet, zárt ciklus lefutása történik,
- Kiválasztás, kiértékelés, mutáció és keresztezés számításai, generációról generációra, hozzávetőleges N²-es komplexitással jellemezhető,
- Optimalizálás során legjobb eredmények rendszerezése és külön kiválogatása többszöri összehasonlítást igényel.

Ezzel a módosított differenciális evolúciós algoritmus modell bemutatásának végére érkeztünk. A 3.2-es fejezetben a létrehozott alkalmazás részletes felépítéséről és működéséről esik szó.

3.2. GUI felépítése és funkciói

A 3.1.2-es fejezetben bemutatott eljárást Pythonban programozott alkalmazásba implementáltam. Az applikáció elkészítésének menetét, a fejlesztés során tapasztalt problémákat, illetve azok megoldásait, valamint a megvalósított felhasználói funkciókat mutatja be ez a fejezet.

Elsőnek egy általános leírást adok a programról, létrehozásának motivációjáról, majd a program rendszerszintű felépítését ismertetem. A különféle nézetekről, illetve az egyes funkciókat megvalósító függvényekről illusztrációkat csatolok a programból.

A tanszéken korábban megépített LED-es fénykabin, mint eszköz potenciális lehetőségeket rejt a szintani kutatások területén. Ahhoz viszont, hogy ezeket maradéktalanul ki lehessen használni, egyedi, a fizikai rendszer felépítését is figyelembe vevő vezérlő szoftver elkészítésére vállalkoztam.

A megvalósítani kívánt főbb funkciókat, valamint kutatásban betöltött szerepüket a 3-4. táblázat foglalja össze:

3-4. táblázat: Színoptimalizáló alkalmazás célkitűzései és funkciói

Kívánt funkció megnevezése	Kutatásban betöltött szerepe	Fejlesztés állapota
Két oldali LED-panel együttes és független különálló vezérlése	Metamériai kísérletek	✓
Fénysűrűsége normált színcsatorna állíthatóság	Színmaszkolások kézi hangolásának támogatása	✓
Radiometriai/fotometriai megjelenítés	Alapfunkció.	✓
WiFi kommunikáció a LED-kabinnal	Gyors kommunikáció, hatékony adatküldés.	✓
Beállítások kimentése, betöltése, küldése	Kutatási adatbázis létrehozását támogatja.	✓
Színdiagramon való ábrázolás, spektrális eloszlások szemléltetése	Tudományos kiértékelés támogatása.	✓ Térbeli szánábrázolásra kibővíthető a jövőben.
LED-csatornák kalibrációs adatbázisának létrehozása, adatok betöltése és megjelenítése	Szoftver hardvertől független alkalmazása akár elméleti fényforrások optimalizálására.	✓
Szintani számítások eredményeinek ábrázolása.	Színrendszerekben folytatott kutatások elősegítése.	✓
Színkoordináta és fehér fény optimalizálása, több megoldás kimentése	Fényforrástervezés támogatása színmaszkoláshoz, illetve napfény szimulátorokhoz.	✓
Fényprogramok definiálása és szimulálása	Napszakos megvilágítás szimulálása – cirkadián ritmus	✗

	kutatása, emberközpontú megvilágítás tesztelése	A koncepció már megvan, implementálásra nem jutott idő.
Optimalizálási feltételek interaktív módosítása	Robusztusabb megoldáskeresés támogatása, egyszerűsített modellek kidolgozása.	 Idő szűkében csak részben került implementálásra.
Optimalizálási eredmények rendszerezése, válogatása.	Kutatási anyagok készítése, fényforrástervezést is támogatják.	 Adatbázis létrehozás lekérdezésekkel és szűrőkkel, még hátra van.
Felhasználóbarát kezelési felület megalkotása	Alapvető követelmény, áttekinthető eredmények gyors elemzését segíti elő.	 Részben megoldott. Stílus nem végleges.

A felsorolt funkciók több mint 2/3-át már sikerült nagyrészt implementálnom, ezek részletes bemutatásáról szólnak a következő alfejezetek.

3.2.1. Alkalmazás rendszerterve

A GUI három fő oldalból épül fel, mindegyik rendelkezik kiegészítő háttérosztályokkal, amelyek az egyes funkciókat látják el. A teljes alkalmazás mintegy 10 fájlból épül fel, ezek elnevezései, valamint rövid leírásukat a foglalta össze.

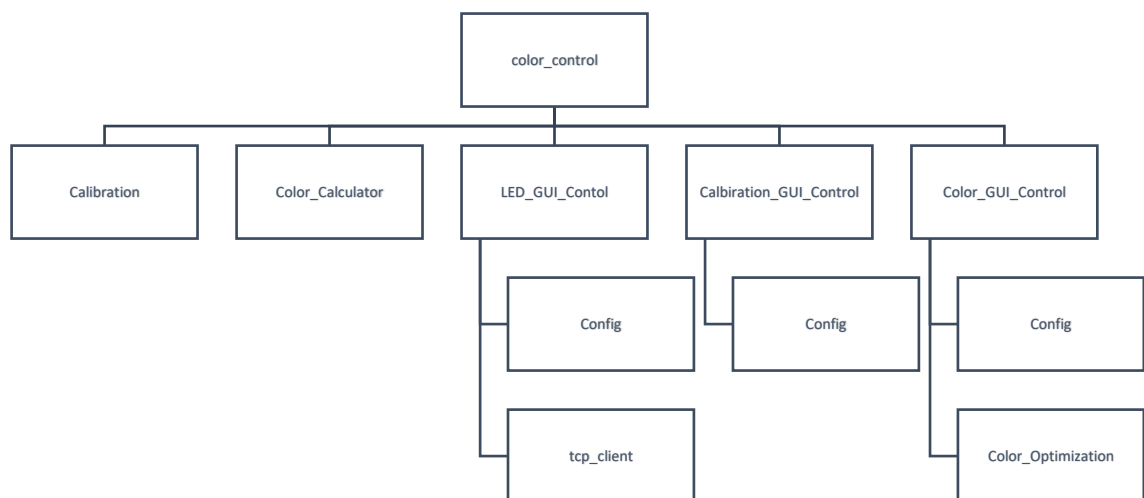
3-5. táblázat: Alkalmazás szoftverkomponenseinek jellemzői

Program megnevezése	Rövid leírás	Mely programokat használja
Calibration.py	Kalibrációs adatokat, ehhez tartozó kezelőfüggvényeket tartalmazza.	Config.py
Calibration_GUI_Control.py	Kalibráció beolvasásának, illetve a beolvasott adatokból képzett adatbázisának megjelenítéséért felel.	Config.py
Color_Calculator.py	Szintani számításokat végez (színkoordináták, színvisszaadási indexek), a luxpy könyvtár függvényeit használja fel.	Config.py
color_control.py	Alkalmazás főprogramja, események lekezelését, interfész funkcióit végzi.	Calibration.py, Calibration_GUI_Control.py, Color_Calculator.py, Color_GUI_Control.py,

		Color_Optimization.py, Config.py, form.ui
Color_GUI_Control.py	Színoptimalizálás kezelőfelületét, valamint az optimalizálás eredményeinek adatbázisát tartalmazza.	Config.py, Color_Optimization.py
Color_Optimization.py	A szintani optimalizálásokat támogató módosított DE algoritmust tartalmazza.	Config.py
Config.py	Az összes alprogram számára hozzáférhető globális változókat, konstansokat, illetve összetett változókat tartalmaz.	–
LED_GUI_Control.py	A LED-es fénykabin kezelőfelületét tárolja és kezeli.	tcp_client.py, Config.py
tcp_client.py	WiFi kommunikáció háttérfüggvényeit tartalmazó osztályt tartalmaz.	–
form.ui	Alakalmazás grafikus felépítését tartalmazza.	–

A szintani számításokat a *luxpy* könyvtárát felhasználva valósítottam meg, míg a színdiagramokat *matplotlib* és a *colour-science* könyvtárai segítségével ágyaztam be az alkalmazásba.

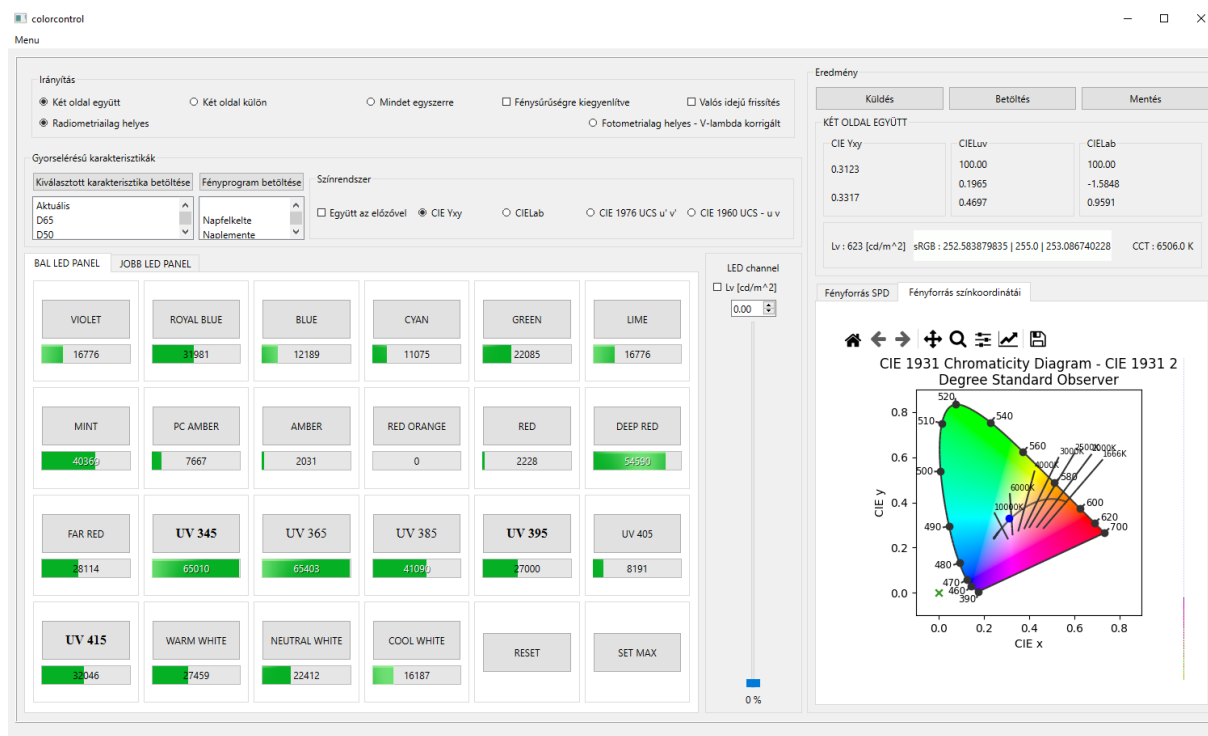
A kódok legtöbbje meghaladja az 1000 sort is, így az azonos feladatkört ellátó, de sokszor felhasználandó függvényeket igyekeztem egy osztály alá rendelni. Ennek eredményeként a létrejött rendszerarchitektúra a 3-2. ábra szerint néz ki.



3-2. ábra: Az alkalmazás rendszerszintű felépítése (saját ábra)

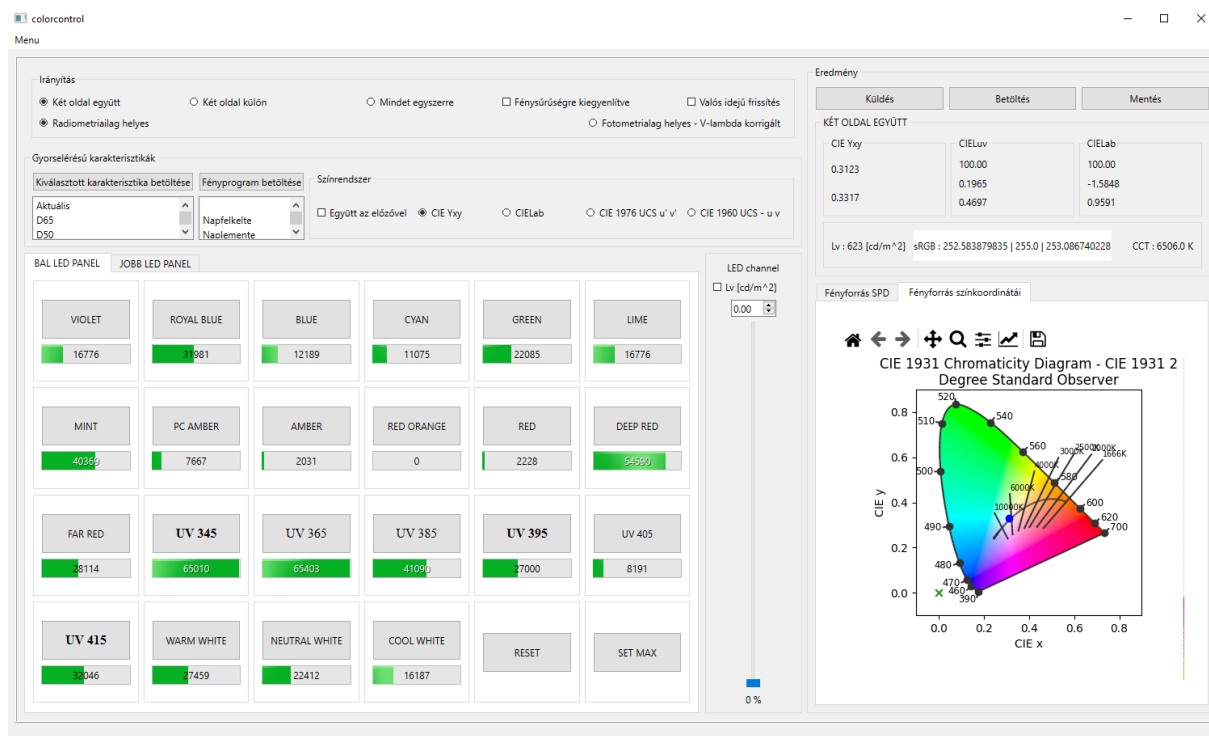
3.2.2. A fénykabint irányító nézet bemutatása

A címben foglalt felület futás idejű kinézetét a mutatja be a



3-3. ábra. A LED_GUI névre hallgató oldal a következő funkciókat valósítja meg az alkalmazáson belül:

- LED-es fénykabin bal és jobb fénypaneljének vezérlése számérték, csúszka vagy léptetőnyilak segítségével,
- Aktuális fénybeállítások színkoordinátáinak, fénysűrűségének, valamint spektrális teljesítményeloszlásának szemléltetése (CIE Yxy, CIE Lab egyszerűsített, valamint CIE uv és CIE u'v' szintereken),
- Adott fénybeállítás mentése, betöltése és küldése,
- LED-fénypanelek két oldali független és együttes vezérlésénke lehetősége,
- Radiometria/fotometria megjelenítés lehetősége,
- Fénysűrűsége normalizált hangolás lehetősége,
- Valós idejű adatfrissítés a fénykabin felé



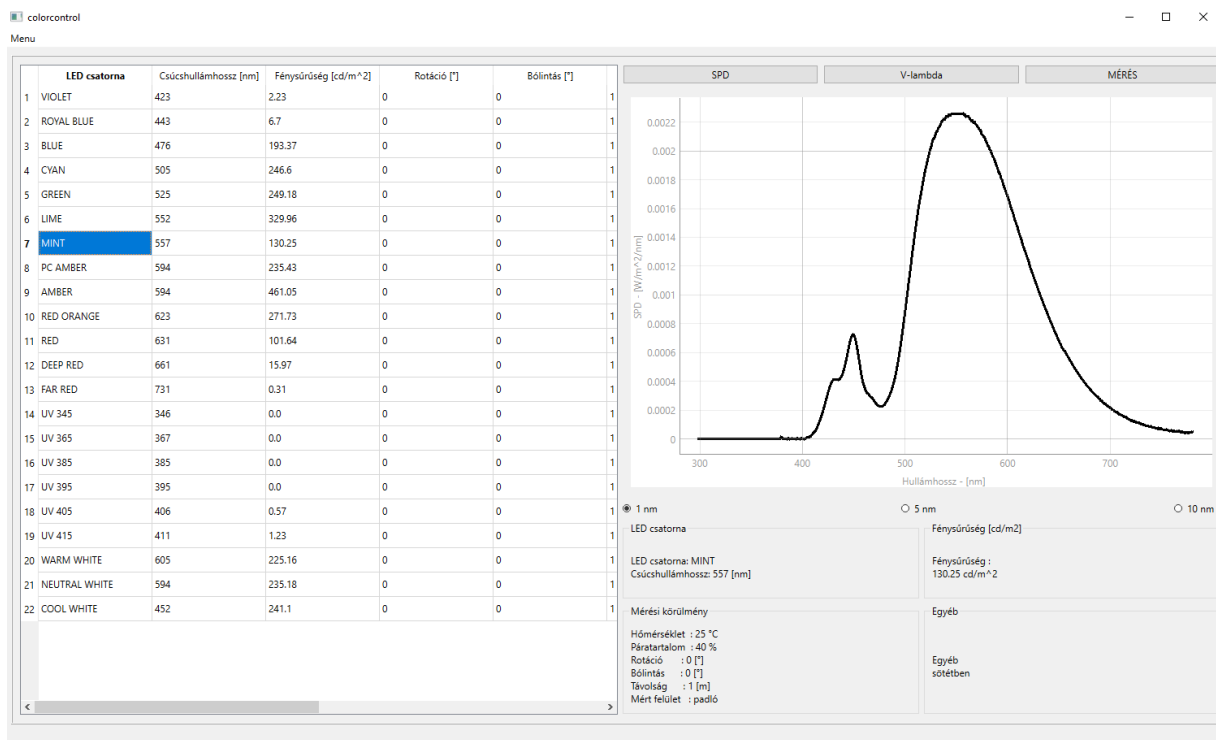
3-3. ábra: a LED_GUI nézet felépítése és működése (forrás: Python Qt alkalmazás)

A felületen minden LED-csatorna bal és jobb oldali panelhez rendelt állítható, miközben az aktuális beállítást valós időben mutatja be a jobb oldali paraméterlista (színkoordináták, CCT, fénysűrűség, beállítás színe sRGB-ben). A vezérlési opciókat legfelül rádiógombok, valamint checkbox-ok révén lehet kombinálni, módosítani, akárcsak az aktuálisan megjeleníteni kívánt színteret.

A fényprogramok GUI-s felületen történő működését még nem sikerült implementálni az idő szűkében, de az elve viszonylag egyszerű. Ezt lényegében adott fénybeállítást időintervallumokhoz rendelve időben változó, de mégis kontrollált adatsornak kell elképzelni, amelynek két fő eleme az aktuális beállítás, valamint egy kezdeti időpont és egy időtartam, amelyek annak aktiválását és leállítását jellemzik. Ezekből szekvenciákat alkotva napszakos megvilágítások, változtatható színes effektek is létrehozhatóak, amelyek elsősorban adaptációs folyamatok kutatásában játszhatnak szerepet.

3.2.3. A kalibrációs ablak bemutatása

A kalibrációs nézet felépítését a 3-4. ábra mutatja be. A felület bal szélén elhelyezkedő táblázat fizikai rendszer 22 LED csatornájának mérési adatait tartalmazza. Ezek között szerepel az adott csatorna csúcshullámhossza, fénysűrűsége, illetve a mérési körülményeket leíró adatok (hőmérséklet, páratartalom, mérési elrendezés, mért felület). Mindezek mellől nem maradhat el a LED-ek spektrális teljesítményeloszlása sem, valamint a számítások zöméhez, illetve a radiometriai-fotometriai megjelenítéshez alkalmazott V-lambda adatsora sem. A megjelenítő annak a csatornának ábrázolja az SPD görbét, amelyet kiválasztunk (az 3-4. ábra éppenséggel a MINT csatornát mutatja)



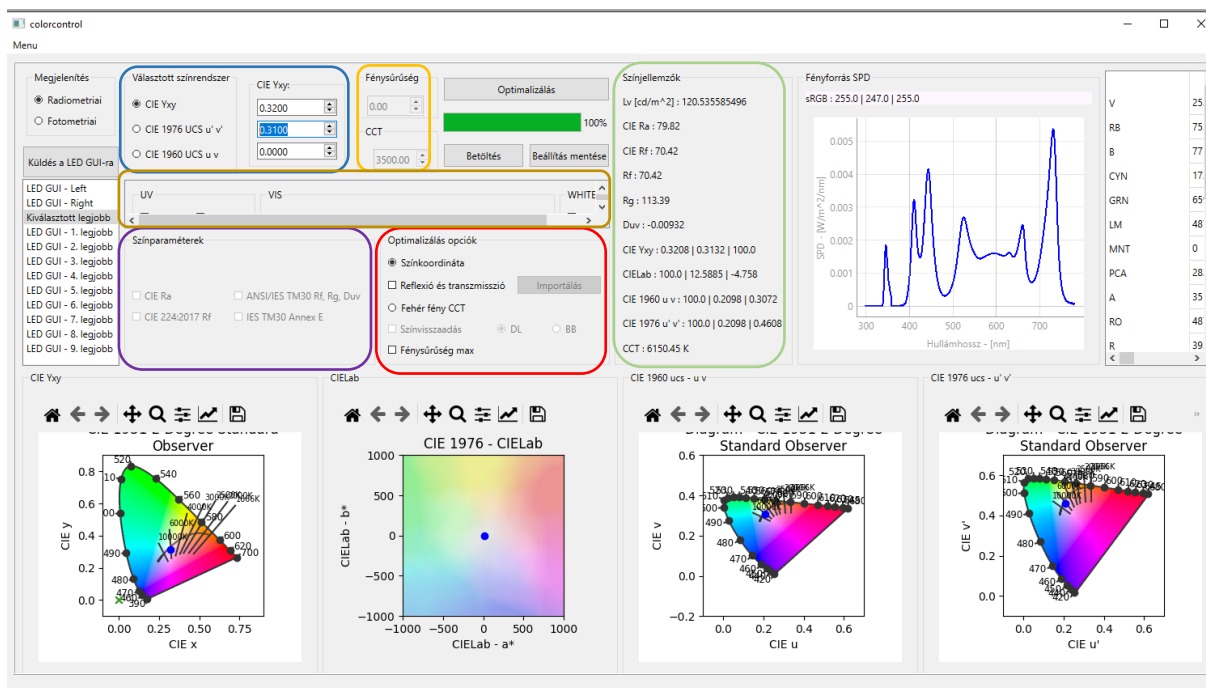
3-4. ábra: A kalibrációs oldal felépítése és működése (forrás: Python Qt alkalmazás)

3.2.4. A színoptimalizálás oldalának bemutatása

A színoptimalizációs felület felépítését a 3-5. ábra foglalja össze. Ez az alkalmazás legfontosabb nézete, mivel itt zajlik az optimalizálás, és annak kiértékelése. Az itt elvégzett számítások külön szálon futnak, így nem lassítják be a programot, illetve az optimalizálás végeztével az eredmények felkerülnek automatikusan a jobb oldalon szándékosan csak részben látható táblázatba, ahová 10 ígéretes eredményt ment ki minden keresés után az algoritmus. Ezeket egyenként a bal oldalon található listaelemekre kattintva vissza lehet tölteni a szinterekre, illetve az eredő spektrális teljesítményeloszlást ábrázoló grafikonra egyaránt. Mindezek mellett a szíenkoordináták, valamint a fénysűrűség értékei is áttekinthetőek a középső résznél.

Lehetőség van arra is, hogy már korábban kimentett optimalizálási eredményeket tartalmazó adatbázist is visszatöltsünk. Emellett kényelmi funkcióként az aktuálisan vizsgált adatokat a „Küldés a LED GUI-ra” gombbal átemelve ott további hangolások vagy kiküldést, egyéni mentést hajthatunk végre.

Maguk a színdiagramok interaktívan kerültek beágyazásra, így a toolbar funkciói elérhetők igény szerint: az ábrák nagyíthatóak, illetve állítható a felbontása is. A szinterek koordinátáit a bal felső tartományánál, a megfelelő gombokat kiválasztva lehet módosítani.



3-5. ábra: A színoptimalizálást megvalósító kezelőfelület felépítése és az adatbázis (forrás: Python Qt alkalmazás)

Az optimalizálásnál a két típus (színkoordináta, illetve fehér fény jellemzői) kiválasztáskor csak azok a beviteli mezők maradnak aktívak, amelyek oda vonatkoznak:

- Színkoordináták és opcionálisan a fénysűrűség beviteli mezői (3-5. ábra *piros* kerettel jelzett területe ezek engedélyezését, a *kék* az aktuálisan kiválasztott színkoordináták, a *narancssárga* pedig a fénysűrűség és CCT beviteli helyét jelölik),
- Fehér fény vagy hőmérsékleti sugárzó esetén annak színhőmérséklete a fő paraméter, de opcionálisan hozzárendelhető a fénysűrűség, valamint a CIE és IES TM-30 szerinti színvisszaadási indexek (*lila* kerettel jelzett rész), illetve megadható a referencia fényforrás családja (DL: napfény, BB: fekete test)

Végül a *barna* keret területén elhelyezkedő legördülő lista a kereséshez részt vevő LED-csatornák engedélyező checkboxait foglalja össze, egyelőre a hely szűke miatt csak részben látszódnak ezek, de a görgetés révén mindegyiket lehet állítani.

A *zöld* keret az összes olyan színmetrikai jellemzőt tartalmazza, amelyek megjelenítésre kerülnek a lenti sávban található CIE Yxy, CIELab, CIE 1960 UCS u,v, valamint 1976-oes u'v' diagramon.

3.2.5. Alkalmazásfejlesztés rövid összefoglalása

A kész szoftver elkészítéséhez az alábbi feladatokat végeztem el:

- Szoftver rendszerarchitektúrájának megalkotása:
 - Funkciók különálló függvényekbe, majd osztályokba rendezése,

- Lokális és globális változók rendszerezése,
- Interfész kialakítása,
- GUI kezelőfelületeinek funkcióorientált megtervezése
- Funkciófejlesztések kivitelezése:
 - TCP-kommunikáció kidolgozása és összehangolása a kezelőfelülettel,
 - Kalibrációs adatbázis feltöltésének és megjelenítésének kivitelezése,
 - Keresési algoritmus front és backend oldali fejlesztése
- Bugok keresése és javítása:
 - Szálkezelések ellenőrzése és összehangolása a grafikus interfész műveleteivel (például: grafikonok frissítése a módosítások vagy az optimalizáló algoritmus részeredményei alapján),
 - Grafikonok frissítési sebességének gyorsítása és megfelelő megjelenítése (ezzel volt a legtöbb baj),
 - Adatok frissítési rátájának beállítása úgy, hogy az alkalmazás ne fagyjon ki

3.3. Modell tesztelése és eredményei

Az elkészült alkalmazást a LED-es fénykabin néhány véletlenszerűen választott színpontjára teszteltem. Az eredményeket táblázatos formában rendeztem, majd kiértékeltem. Ennek összesítését a foglalta össze a 3-6. táblázat:

3-6. táblázat: Optimalizálási teszteseteket összesítő táblázat

Optimalizálás típusa	OPT 1	OPT 2	OPT 3	OPT 4
Színkoordináta	(0,313; 0,329)	(0,2; 0,6)	(0,20; 0,18)	(0,6; 0,3)
Színkoordináta+	(0,313; 0,329) &	(0,2; 0,6) & 300	(0,20; 0,18,) &	(0,6; 0,3)
Fénysűrűség	300		300	& 300
CCT	6500	7500	4000	5500
CCT + Fénysűrűség	6500 & 300	7500 & 300	4000 & 300	5500 & 300
CCT + Rf, Rg, Duv	6500 & TM30	7500 & TM30	4000 & TM30	5500 & TM30
CCT + Rf, Rg, Duv + Fénysűrűség	6500 & 300& TM30	7500 & 300& TM30	4000 & 300& TM30	5500 & 300& TM30

Az egyes teszteseteket úgy állítottam össze, hogy a gamut minden tartományából kerüljön ki legalább egy érték. Az optimalizálás algoritmusának paramétereit a teljes teszt során az alábbi beállításoknak megfelelően határoztam meg:

- Generációk száma – G=200
- Populáció mérete – P=20
- Mutációs konstans – F=0,5
- Keresztezési ráta – CR=0,7
- Leállási kritérium a buffer maximális méretével megadva: L=10
- Kimentési kritériumok: lásd 3-7. táblázat tartalmazza.

Mivel 20 tesztesethez tartozóan nagyon sok adatot szolgáltatott az optimalizálás, így ezeknek az összesített statisztikáját mutatom csak be, a CRI-s optimalizálásokat kihagyva, mivel azok működése még nem konzisztens:

3-8. táblázat: Tesztesetekre vonatkozó statisztika

Teszteset	Kívánt érték	Elmentett ideális eredmények száma	Legjobb megoldás adatai	Minősítés
Színkoordináta	<i>(0,313; 0,329)</i>	10	<i>(0,3131; 0,3288)</i>	Kiváló
	<i>(0,2; 0,6)</i>	8	<i>(0,2000; 0,6000)</i>	Kiváló
	<i>(0,20; 0,18)</i>	8	<i>(0,2001; 0,1800)</i>	Kiváló
	<i>(0,6; 0,3)</i>	10	<i>(0,6001; 0,3001)</i>	Kiváló
Színkoordináta & Fénysűrűség	<i>(0,313; 0,329) & 300</i>	10	<i>(0,3131; 0,3300) & 300,52</i>	Kiváló
	<i>(0,2; 0,6) & 300</i>	10	<i>(0,1985; 0,5999) & 299,22</i>	Megfelelő
	<i>(0,20; 0,18,) & 300</i>	10	<i>(0,1997; 0,1803) & 300,16</i>	Megfelelő
	<i>(0,6; 0,3) & 300</i>	10	<i>(0,6001; 0,3001) & 299,89</i>	Kiváló
CCT	<i>6500</i>	8	<i>6500,12</i>	Kiváló
	<i>7500</i>	4	<i>7499,92</i>	Kiváló
	<i>4000</i>	5	<i>3999,63</i>	Kiváló
	<i>5500</i>	10	<i>5499,98</i>	Kiváló
CCT & Fénysűrűség	<i>6500 & 300</i>	8	<i>6499,95 & 299,67</i>	Kiváló
	<i>7500 & 300</i>	10	<i>7501,97 & 298,61</i>	Kiváló

	<i>4000 & 300</i>	10	<i>4000,14 &301,94</i>	Kiváló
	<i>5500 & 300</i>	10	<i>5504,33 &302,29</i>	Kiváló

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a különféle optimalizálási feladatok közül a legtöbbet megfelelően teljesítette az alkalmazás, ráadásul legalább 3 eredményt minden tartományra adott az eljárás, így a módosított evolúciós algoritmust sikeresen alkalmazható a dolgozatban kitűzött célokra. Ezt a megoldások megléte mellett azok különbözősége, valamint darabszáma is indokolja.

Ennek megfelelően az alkalmazás már implementált funkciói sikeresen helyt álltak az első teszteléseknél, amely biztató képet fest a jövőre nézve. A lehetséges továbbfejlesztési lehetőségekről az 5.1 -es fejezetben lesz szó.

4. KUTATÁSI TERÜLETEK

A létrehozott alkalmazás a LED-es fénykabintól függetlenül is alkalmazható kutatásokra, hiszen a kalibrációs fájlok adatait akár fiktív, tervezés, fejlesztés alatt álló fényforrások modelljeivel lehet helyettesíteni. Természetesen a valós fizikai rendszerrel együtt is sok lehetőség adódik. Ezekről fog szólni ez a rövid fejezet.

A LED-es fénykabinról szóló [11]-es forrásban részletes képet adok a lehetséges kutatási területekről, itt most csupán egy rövidebb összefoglalást közlök.

A lehetséges kutatási területek listája következő:

- Emberközpontú megvilágítási környezetek kutatása,
- Élelmiszeripari termékekre specifikus megvilágítási környezetek tesztelése színmaszkolás céljából,
- Színhőmérséklet átmenetek szimulálása napszakoknak megfelelő fényviszonyok szimulációja céljából,
- Szensorok dinamikatarományának tesztelése eltérő napszakú megvilágítások alatt
- Emberi szem fehér fény adaptációjának vizsgálata

5. KONKLÚZIÓ

Ebben a dolgozatban LED-es fényforrások spektrális hangolását alkalmazó Python Qt-ban megírt alkalmazást, illetve ehhez tartozóan egy egyedi igényekre átalakított differenciális evolúciós algoritmust mutattam be szintani optimalizálására.

Az alkalmazás egy korábban megépített LED-es fénykabinhoz készült el, amelyet a MATE (Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem) és a BME (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) közös projektjének keretein belül épült meg. Az eszköz kalibrációjának eredményeit felhasználva a szoftver képes színhőmérsékletre, színkoordinátákra, valamint fénysűrűsége és színmetrikai jellemzőkre is képes optimalizálni. Ezen szempontokat egymással kombinálva pedig fehér fény, illetve színes fény jellemzőinek javítása elérhető.

A kutatási lehetőségekről szóló fejezetben bemutattam, hogy mint kutatási eszközt támogató, és mint önálló szimulációs szoftver is használható, amellyel az emberi színadaptációt, a különféle élelmiszerek és színes termékek színmaszkolását, valamint napszakos megvilágításokat és azok hatásait is lehetőség nyílik ezzel az eszközzel kutatni.

5.1. Alkalmazás továbbfejlesztési lehetőségek

Ahogy a korábbi fejezetekben láthattuk, az alkalmazás a legtöbb elvárt előírásnak megfelelt. Ugyanakkor, mint minden modellnél, úgy ez esetben is szükséges lehet a továbbfejlesztés.

Ezeket egy részletesebb lista formájában adom meg:

- Fényprogramok futtatásának és optimalizálásnak lehetősége,
- Részletes optimalizálási statisztika készítése külön oldalon, amelynek részei:
 - IES TM-30 jelentés,
 - Adott optimalizálásra javasolt megoldások statisztikája (hány darab megoldást talált, milyen spektrális paraméterei vannak az adott megoldásnak)
- Primer színcsatornák színkoordinátáinak betöltése a CIE színdiagramjaira, ezek összerendelése az optimalizálási feltételekkel,
- Külön felugró ablak implementálása a modell paramétereinek felhasználó általi módosítására (optimalizálásban részt vevő LED-csatornák kiválasztása, DE modell leállási és futási paramétereinek hangolása),
- Előre elmentett, standardizált fénybeállítások betöltése gombok vagy lista segítségével,
- Optimalizálás részeredményeinek kiküldése fénykabinra,
- Színvisszaadási index számításánál a referencia, valamint az aktuális fényforrás spektrális eloszlásának grafikus megjelenítése,
- Felület stílusának modernizálása:
 - Optimalizálási paraméterek színezése a hiba mértékétől függően,

- Spektrális teljesítményeloszlások alatti terület spektrum szerinti színezése,
- Alkalmazás téma implementálása

5.2. Módosított DE modell fejlesztési opciói

Az első tesztelések alapján a DE algoritmus igen jó eredményekkel szolgált a legtöbb esetre. Valós idejű optimalizálásra viszont ilyen sebességmutatók mellett még nem alkalmas, így ennek növelése a legfontosabb elkövetkező feladat.

Erre több ötletem is lenne. Egyrészt a tesztesetekhez mérten, a DE modell generációs számát változtatnám attól függően, hogy hol található a színpont a gamuton belül. Minél közelebb a határoló egyenesekhez, annál több időre van szükség ugyanannyi darab megoldás megtalálására, mint ha bentebb helyezkedne el a színtérben. Ezt a tesztelések során tapasztaltam.

Másrészt, amennyiben csak színt akarunk keverni fénysűrűség nélkül, elég csupán azt a 3 színcsatornát kiválasztani, amely által kifeszített háromszög területén belül a kívánt színpont elhelyezkedik. Ezzel azonban a megvalósítható fénysűrűség értéke csökken és a fehér fény esetén rosszabb színvisszaadás kapható. Emiatt ezt egy komplex feltételrendszer megalkotását követően tartom érdemesnek implementálni.

Ennek feltérképezésében az alkalmazás funkcióbővítése, és további optimalizálások statisztikai elemzése segíthet a jövőben.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] G. Dr. Ábrahám, Dr. Wenzelné Gerőfy Klára, Á. Dr. Antal, and G. Dr. Kovács, "Műszaki Optika." Accessed: Dec. 08, 2023. [Online]. Available: https://mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki_optika/index.html
- [2] Wikipedia, "CIE 1931 color space," [wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space). Accessed: Dec. 08, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space
- [3] Adoniscik, "CIE 1960 UCS. MacAdam (u,v) chromaticity diagram," [wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1960_UCS_MacAdam_diagram). 2008.
- [4] Adoniscik, "(u',v') chromaticity diagram from CIELUV using the 1931 standard observer," [wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1960_UCS_MacAdam_diagram). 2008.
- [5] A. Delazio, A. Israr, and R. L. Klatzky, "Cross-modal correspondence between vibrations and colors," in *2017 IEEE World Haptics Conference, WHC 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2017, pp. 219–224. doi: 10.1109/WHC.2017.7989904.
- [6] Y. Ohno, "Calculation of CCT and Duv and Practical Conversion Formulae," 2011.
- [7] W. Davis, "Color quality scale," *Optical Engineering*, vol. 49, no. 3, p. 033602, Mar. 2010, doi: 10.1117/1.3360335.
- [8] Illuminating Engineering Society, "Method of Evaluating LightSource Color Rendition - ANSI/IES TM-30-20+E1." 2020. Accessed: Dec. 08, 2023. [Online]. Available: <https://store.ies.org/product/tm-30-20-ies-method-for-evaluating-light-source-color-rendition/?v=35b5282113b8>
- [9] LEDVANCE GmbH, "AMENDMENTS TO EU ROHS DIRECTIVE 2011/65/EU ROHS AT A GLANCE: ALL THE CHANGES, ALL THE ALTERNATIVES." Accessed: Dec. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.ledvance.com/professional/services/eu-legislations/rohs>
- [10] Csujá Zoltán and Dombi Zoltán, "Spektrálisan szabályozható napfénysszimulátor minősítésű LED fénykabin tervezése, építése és kalibrációja," BME, Budapest, 2022.
- [11] L. Sipos, Á. Nyitrai, D. Szabó, Á. Urbin, and B. V. Nagy, "Former and potential developments in sensory color masking – Review," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 111. Elsevier Ltd, pp. 1–11, May 01, 2021. doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.050.
- [12] Dombi Zoltán, "Világítódoboz modulok tervezése, vezérlése és mérése," BME, Budapest, 2021.
- [13] H. Wu, J. Dong, G. Qi, and G. Zhang, "Optimization of LED light spectrum to enhance colorfulness of illuminated objects with white light constraints," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 32, no. 7, p. 1262, Jul. 2015, doi: 10.1364/josaa.32.001262.
- [14] H. A. E. W. Khalifa, M. Alharbi, and P. Kumar, "A new method for solving quadratic fractional programming problem in neutrosophic environment," *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 880–886, 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0088.
- [15] Jim, "Lighting for poultry with light-emitting diodes (LEDs)," poultry-producer.
- [16] A. Goudjil *et al.*, "An interior-points algorithm for color and CCT control of multichannel LED lighting system using a Smart 18-Channel Spectral Sensor," *Energy and Buildings*, vol. 298. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2023. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113541.
- [17] A. Chalmers, "Light source optimization: spectral design and simulation of four-band white-light sources," 2012, doi: 10.1117/1.OE.51.4.
- [18] Botzheim János, "Evolúciós algoritmusok." BME MOGI, Budapest, 2022.

7. SUMMARY

Keywords: *evolutionary algorithm, Python Qt, light box, color science*

In this paper, I presented an application developed in Python Qt using libraries supporting color science calculations. The other main topic is a customized differential evolution algorithm designed to optimize colorimetry based on specific requirements. The application was created for a previously built LED light booth in a collaborative project between the Hungarian University of Agriculture and Life Sciences (MATE) and the Budapest University of Technology and Economics (BME). Utilizing the calibration results of the device, the software is capable of optimizing for color temperature, color coordinates, as well as luminance and colorimetric characteristics. By combining these aspects, improvements in the characteristics of both white and colored light can be achieved. This is proved with test simulations and their evaluation.

In the chapter discussing research opportunities, I demonstrated that the research software can be used both as a research-supporting instrument and as an independent simulation environment for new LED-based light source developments. It allows the researcher the investigation of human color adaptation, color masking of various foods and colored products, as well as the study of the effects of daylight illumination and its variations.