



Garai Lőrinc

Kísérőjelenség az emberi látásban:
utóképek szimulációs és kísérletes vizsgálata

Doktori értekezés

Témavezető

Dr. habil. Horváth András

Széchenyi István Egyetem Gépészmérnöki és Villamosmérnöki Kar, Fizika és
Kémia Tanszék

Széchenyi István Egyetem
Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése Multidiszciplináris
Műszaki Tudományi Doktori Iskola
Győr
2022

Összefoglalás

Az utókép olyan vizuális jelenség (hagyományos megfogalmazásban vizuális illúzió, mai ismereteink tükrében retina és látókéreg szinten meghatározott jelenség), amikor a szem látóterében továbbra is jelen van az a kép, amely mint eredeti kép már megszűnt. Az utókép egyik kiemelt társadalmi vetülete a közlekedésbiztonság kérdése. Például, éjszakai közlekedés során lényeges, hogy a színes reklámtáblák utóképe mennyi ideig, és milyen mértékben okoz szubjektív eltérést (virtuális színérzetet), akár zavart a látásviszonyokban.

Kutatásom első részében numerikus kinetikai modellt dolgoztam ki, amellyel szimulációsan meghatároztam a beeső fény hirtelen színátmenetével kiváltott virtuális színérzet (utókép) erősségét és időtartamát. E munkámhoz a csapok érzékenységi dinamikáját leíró korábbi kinetikai modellből merítettem. A szimulációs számítások ellenőrzésére a hirtelen színátmenettel kiváltott virtuális színérzet erősséget és időtartamot szimulációs számításokkal és a saját magamon, saját magam által végzett önméréses vizsgálataimmal meghatároztam.

Megállapítottam, hogy numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulált hirtelen színátmenetekkel a vizsgálatba bevont megjelenítők mindegyikén érzékelhető hirtelen színátmenettel kiváltott utókép, azaz virtuális színérzet.

Megállapítottam, hogy numerikus kinetikai modellel végzett szimulációs számítások alapján a régebbi sorozatú megjelenítőhöz képest az újabb sorozatú megjelenítőn a virtuális színérzet szignifikánsan erősebb.

Kutatásom második részében a virtuális színérzet (utókép) erősségét és időtartamát Témavezetőmmel együtt *színes-színes* és *színes-szürke* méréssorozatokban határoztam meg az életkor és a nem befolyásának megállapítására.

Megállapítottam, hogy a *színes-színes* méréssorozat részletes statisztikai elemzése szerint az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége független az életkortól és a nemtől. Ezen eredményeket a *színes-szürke* méréssorozat megerősítette.

Megállapítottam, hogy a *színes-színes* méréssorozat teljes mintahalmazának statisztikai elemzése alapján az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama független a nemtől. A teljes mintahalmaz statisztikai elemzésében a 40 év feletti tesztalanyoknál a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama mindkét nemnél átlagosan 45%-kal rövidebb volt a legfeljebb 40 éves tesztalanyoknál tapasztalt utókép időtartamoknál. Ezen eredményeket a *színes-szürke* méréssorozat megerősítette.

Summary

Afterimage is a visual phenomenon in which the perceived image still exists after the disappearance of the original one. In traditional descriptions, afterimage is a visual illusion. According to nowadays knowledge, afterimage covers a phenomenon resolved at retinal and cortical levels. A highlighted social dimension of afterimage is the study of road safety. For instance, when at night and in traffic, the subjective differences in strength and duration of afterimage (virtual colour perception) due to roadside billboards, may act more than disturbing only.

In the first part of my research work, I elaborated a numerical kinetic model to determine the strength and duration of virtual colour perception (afterimage) provoked by sudden colour transition in the incident light. My numerical kinetic model is based on earlier kinetic models describing the dynamics of sensitivity of human cones. To verify the simulation results obtained by the numerical kinetic model as above, the strength and duration of afterimage provoked by sudden colour transition were further confirmed by series of self-measurements.

In results I found that afterimage (virtual colour perception) provoked by sudden colour transition is a phenomenon perceived on all displays involved in my research work. Moreover, the simulation use of my numerical kinetic model resulted in significantly stronger virtual colour perception on newer type of display as compared to older type of display in my research work.

In the second part of my research work, series of *colour-colour* and *colour-grey* measurement tests were run by both of us with my Tutor to determine the strength and duration of virtual colour perception as influenced by age and gender.

In results I found that in *colour-colour* measurements the strength of afterimage provoked by sudden colour transition in same conditions, is independent of age and gender according to statistical analyses. These results were further confirmed by the *colour-grey* measurement tests. Moreover, in *colour-colour* measurement tests the duration of afterimage provoked by sudden colour transition in same conditions, is independent of gender, according to statistical analyses. Moreover, in the complete set of *colour-colour* measurement test results, the average duration of afterimage provoked by sudden colour transition in same conditions, was 45% shorter in test subjects aged above 40 years compared to those aged up to 40 years. Results of above were further confirmed by the *colour-grey* measurement tests.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Mindazoknak, akik segítettek a kutatómunka elvégzésében és az értekezés elkészítésében.

Ezúton is nagyon köszönöm Témavezetőmnek, Dr. habil. Horváth András egyetemi docensnek a szakmai irányítást és a közös mérések megoldását.

Megtisztelő volt Molnár Zsolt Szakcsoportvezető támogatása, amely az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Műszertechnikai és Automatizálási Intézet világítástechnikai laboratóriumában biztosított számomra mérési lehetőséget.

Köszönöm a munkámba bevont Vizsgálati Alanyok idejét és lelkes, önkéntes részvételét.

Nem utolsó sorban köszönöm Családomnak a kitartó támogatást, a türelmet és a biztatást, amivel lendületet adtak a munkám elkészítéséhez.

Köszönettel tartozom a házi védés opponenseinek, Dr. Wenzel Klára Professzor Asszonynak és Dr. Sávoli Zsolt Tanár Úrnak a bírálatukban megfogalmazott meglátásokért.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	8
1.1. A disszertáció témaköre	8
1.2. Motiváció	8
1.3. Célkitűzések	13
1.4. A téma aktualitása	13
1.5. A disszertáció szerkezete, a kutatómunka elemei	14
2. Előzmények.....	16
2.1. Az utókép jelensége	16
2.2. Az emberi szem felépítése	16
2.3. A látás folyamata.....	21
2.4. Az utókép jelensége részletesen.....	22
2.4.1. Fotoreceptorok érzékenységi kinetikája	26
2.4.2. Adaptációs mechanizmusok az utókép létrejöttében.....	28
2.4.3. Öregedés és színérzet.....	31
2.4.4. Korábbi utókép mérések	33
2.5. Színrendszerek, megjelenítő típusok és gamut	36
2.5.1. A színes megjelenítőkről általában	41
2.5.2. A színes megjelenítők gamutja	42
2.6. Utókép, virtuális színérzet.....	44
2.7. Utókép meghatározási célok	46
2.8. A fotoreceptorok egyes biokémiai jellemzői	46
2.8.1. Margarin mátrix elszappanosítós előkészítésének hőmérséklet és idő függése az A- és E-vitamin visszanyerés optimumkeresésében	51
2.9. Utókép méréssorozatok értékelésében alkalmazott klaszteranalízis módszertana.....	56
3. Módszerek, Mérések, Eredmények	62
3.1. A kutatásomban alkalmazott megjelenítők gamut-meghatározása	62
3.1.1. A kutatásomban alkalmazott megjelenítők.....	62
3.1.2. A megjelenítő gamut meghatározása.....	63
3.1.3. A gamutok összesítése	67
3.2. A szimuláció módszere	69
3.2.1. A virtuális színérzet erősség és időtartam számítás.....	70
3.2.2. Szimulációs példa	76
3.2.3. Szimulációs környezet	79

3.3.	A 41 tesztalanyos színes-színes és a 16 tesztalanyos színes-szürke utókép mérés módszere	85
3.3.1.	Mérési elrendezés	85
3.3.2.	A mérések menete.....	86
3.3.3.	Utókép kiváltáshoz választott színátmenetek	90
3.3.4.	Vizsgálati sorozatok.....	93
3.3.5.	Tesztalanyok.....	94
3.3.6.	Eredmények rögzítése.....	95
3.4.	Önmérés	96
4.	Eredmények, Tézisek	98
4.1.	- 1. téziscsoport	98
4.2.	- 2. tézis	108
4.3.	- 3. tézis	114
4.4.	- 4. tézis	127
4.5.	Szimulációs és önméréses kiegészítő vizsgálatok a házi védelem során feltehető opponensi kérdések megválaszolásához.....	142
4.6.	A kutatás folytatásának irányai	143
5.	Összefoglalás.....	145
6.	Irodalomjegyzék.....	149
6.1.	Disszertációhoz kapcsolódó saját publikációk.....	149
6.2.	Disszertációhoz kapcsolódó korábbi saját publikációk.....	150
6.3.	Irodalomjegyzék.....	151
Függelék	157
F1.	Megjelenítő spektrum kiegészítés	158
F2.	A munkámban szereplő színátmenet színek	159
F2.1.	Szimuláció és színes-színes méréssorozat	159
F2.2.	Színes-szürke méréssorozat	159
F3.	Kiegészítő vizsgálatok a házi védelem során feltehető opponensi kérdések megválaszolásához.....	160
F3.1.	Kiegészítő vizsgálatok a 2. tézishoz kapcsolódóan	160
F3.2.	Kiegészítő vizsgálatok a 3. és a 4. tézishoz kapcsolódóan	166

Bevezetés

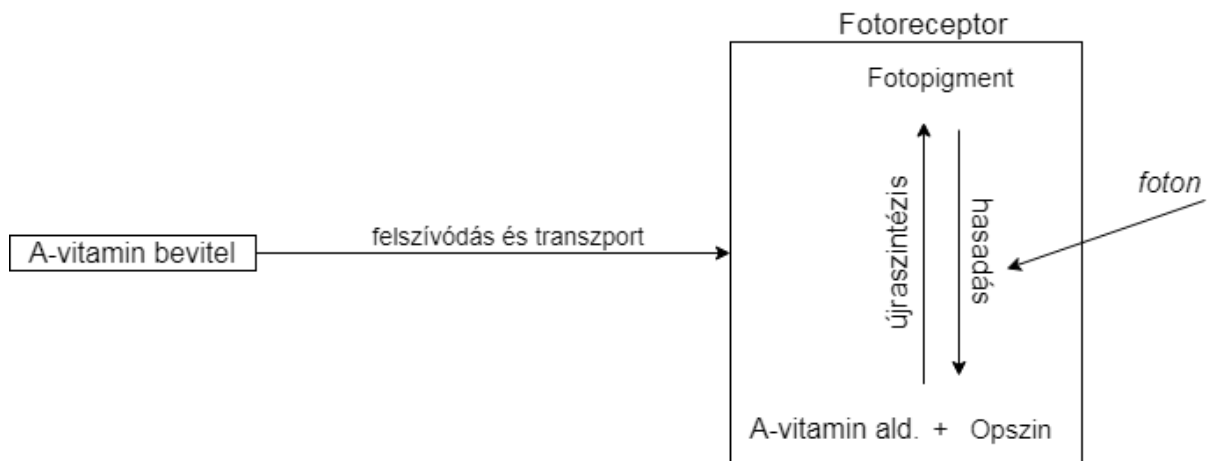
1. Bevezetés

1.1. A disszertáció témaköre

A szem az ember kiemelkedően fontos orientációs és környezetadaptációs érzékszerve. A látás összetett folyamatában alapvető szerepet játszik a retina, ahol a beeső fényinger a több millió érzékszertben (fotoreceptorban) ingerületet vált ki, ami a későbbiekben összeszedődő idegimpulzusként halad tovább. E biokémiai-élettani folyamatok a színérzékelésen, a sötét-világos elkülönítésen, a környezeti adaptáción kívül többek között olyan jelenségekben is szerepelhetnek, mint például a látást befolyásoló, zavaró utóképek. Ez utóbbiak tudományos feltárásához nélkülözhetetlen segítség napjainkban a számítógépes szimuláció. A számítógépes szimuláció lehetővé teszi az utókép jelenség értelmezését például környezet-adaptációs kérdések, közlekedésbiztonsági feladatok, vagy akár látványtervezési munkák megoldásában is.

1.2. Motiváció

A Doktori Iskolába történt beiratkozásom előtt az emberi látás élettani folyamatához szükséges A-vitamin élelmiszeranalitikai vizsgálatával, konkrétan módszerfejlesztéssel foglalkoztam. Élelmiszeranalitikai módszerfejlesztésem során fordult érdeklődésem a látás folyamatának mélyebb megértése iránt. Ismeretes, hogy a fotoreceptorokban a beeső fény által kiváltott ingerület kialakulásában kulcsszerepet játszik az A-vitamin aldehidből és opszin fehérjéből álló fotopigment fény (fotonok) hatására történő hasadása, majd azt követő újraszintézise (1. ábra). A hasadás és az újraszintézis reverzibilis természete ellenére a fotoreceptorokban jelen lévő A-vitamin aldehid pótlásához nélkülözhetetlen a rendszeres A-vitamin bevitel.



1. ábra

Az A-vitamin emberi látásban betöltött szerepe: a fotopigment foton-indukált hasadásának és újraszintézisének egyszerűsített sémája [Salgó, 2001; Perusek, 2013]

Az 1. ábra egyszerűsített szemléltetése a fotoreceptorban zajló folyamatoknak, amelyeket a 2.8. fejezetben részletezek.

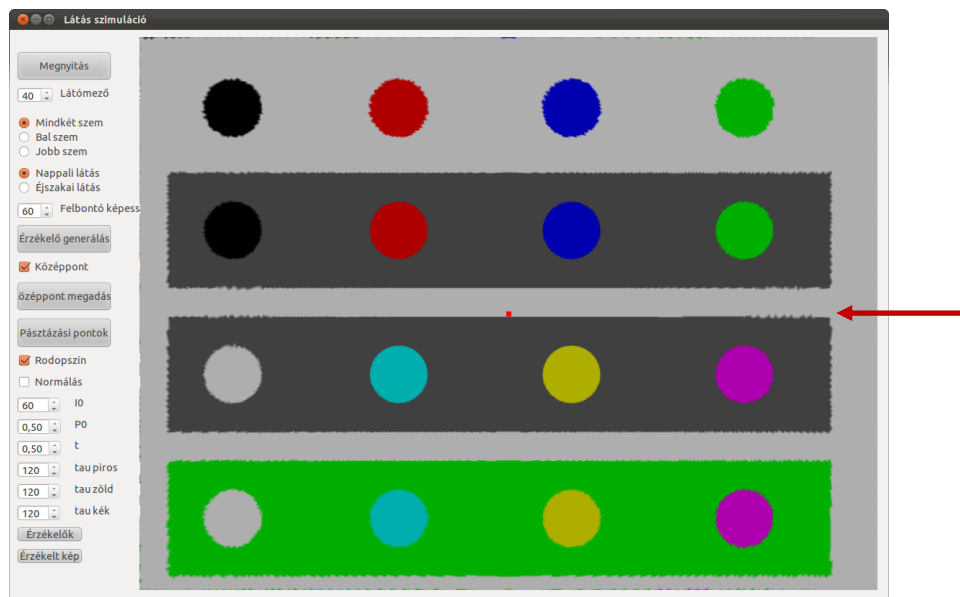
A látás orientációs és környezetadaptációs szerepének egyik kiemelt társadalmi vetülete a közlekedésbiztonság. Például, éjszakai közlekedés során lényeges, hogy a színes reklámtáblák utóképe mennyi ideig, és milyen mértékben okoz szubjektív eltérést (virtuális színérzetet), akár zavart a látásviszonyokban. A 224/2011. Korm. rendelet előírja a közutak melletti reklámhordozók közlekedésbiztonsági szempontok figyelembevételével történő kialakítását, benne foglaltan a szemképrázás elkerülését.

A Széchenyi István Egyetem Fizika és Kémia Tanszékén a doktori kutatásom előtt folyamatban volt egy olyan szoftver fejlesztése, amely speciális hardverek nélkül képes szimulálni a vizuális észlelést valós környezetben. Ez a RetModel elnevezésű szoftver különböző látási fényviszonyok, valamint különböző szövegek, feliratok olvashatóságának vizsgálatára szolgál valós szituációkban. Bemenetként bármilyen elterjedt, szabványos videó- és állóképformátumot képes fogadni, majd ezt módosítja az emberi látás tulajdonságainak, ezen belül a retina működésének megfelelően, megmutatva, hogy a retinán mint szűrőn keresztül milyen kép jut el agyunkig az agykérgi feldolgozáshoz. Felkeltette érdeklődésemet, hogy a RetModel kvalitatív eredményei helyesen adták vissza a hétköznapi tapasztalatokat, mint például, amikor a metró az alagútból a felszínre jut és egy időre "elvakulunk". Továbbá, statikus színes kép hosszú megfigyelését ábrázolva a RetModel segítségével megállapítottam, hogy a kép „észlelt” színeinek telítettsége fokozatosan csökken, majd állandósul.

A RetModel által leírt rendszerben a retina alábbi jellegzetességei szerepelnek:

- Irány szerinti felbontóképesség: az emberi retina fotoreceptorainak elhelyezkedése nem egyenletes, továbbá, a látómező különböző területein eltérő sűrűségben csoportosulva úgynevezett receptív mezőket alkotnak.
- A fotoreceptorokban zajló biokémiai folyamatok szimulálása: fotopigment-szint változás a háromféle csapban és a pálcikákban, ezek hatása a valós időben érzékelt képre.
- A nappali látásért felelős csapok (L, M és S típus) és a sötét-világos megkülönböztetésért felelős pálcikák eltérő spektrális érzékenységgel rendelkeznek. Erős megvilágításnál (fotopos) a csapok, gyengénél (szkotopos) a pálcikák aktívak, de van egy átlapoló tartomány (mezopos), melyben a csap és a pálcika által küldött ingerület kombinálódik, és ez változó szín- és fényintenzitás érzékenységet eredményez.

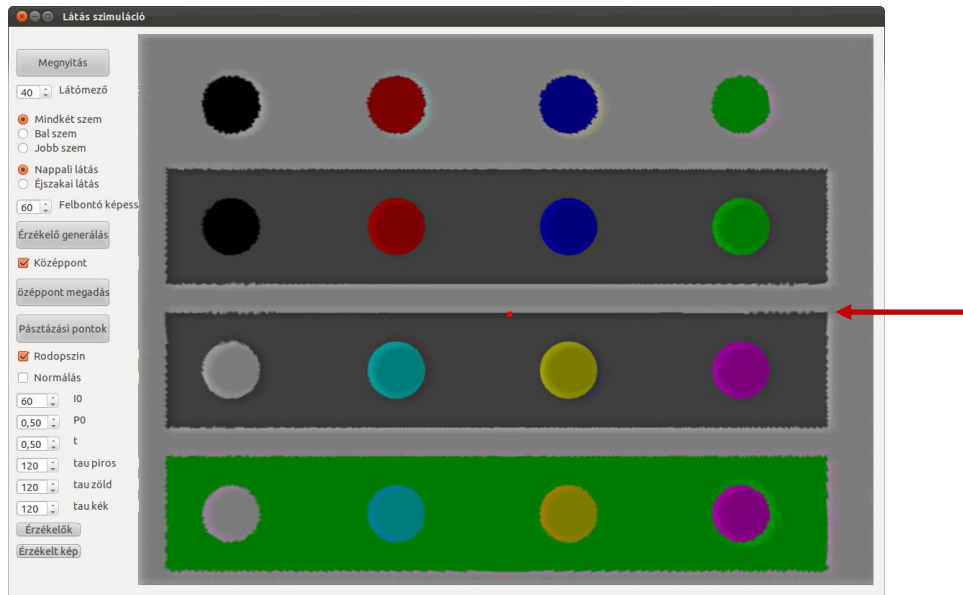
RetModellel szemléltethető például alakzatok utóképe. A 2. ábra bemutatja az alakzatok folyamatos fixálását az ábra közepén elhelyezett fixációs ponttal (apró vörös pötty).



2. ábra

RetModel szimulációs kör alakzatok és utóképek feldolgozása. A szoftverbeli fixációs pont csaknem középen található (ld. nyíl sormagasságban a vörös pötty).

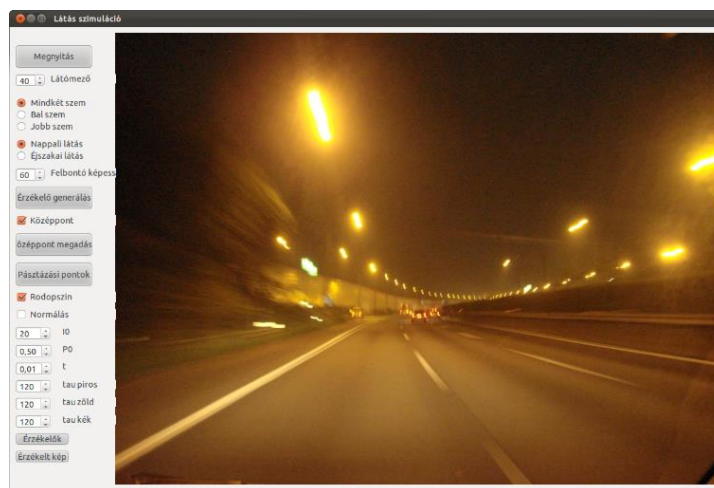
A 3. ábrán a szoftverbeli fixációs pont az első alakzathoz képest kismértékben jobbra lefelé elmozdult, ennek eredménye a fixációs pont elmozdulási irányával ellentétes oldalakon, a körök bal oldalán megjelenő világos szegély.



3. ábra

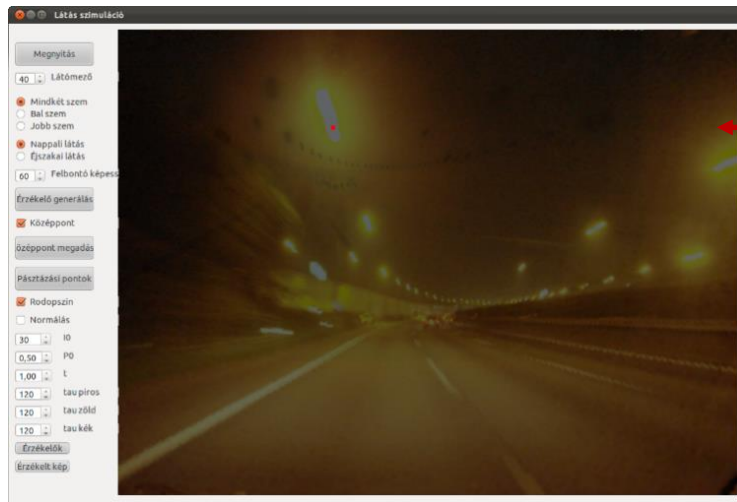
RetModel szimulációs kör alakzatok és utóképük feldolgozása. A szoftverbeli fixációs pont az 2. ábrához képest kismértékben jobbra lefelé elmozdult (ld. nyíl sormagasságban a vörös pötty), amelynek eredménye a körök bal oldalán tapasztalható világosabb szegély [Horváth, Dömötör, 2015].

A 4. és 5. ábra közlekedési fényforrásokkal megvilágított éjszakai közlekedési szituációra ad példát. A 4. ábrán a fixációs pont (nincs jelölve) az ábra közepén helyezkedik el. Az 5. ábrán a fixációs pont a nyíl sormagasságában látható, a 4. ábrához képest felfele és balra mozdult el. Az 5. ábrán jól láthatók a 4. ábra szerinti közlekedési fényforrásokkal kiváltott utóképek.



4. ábra

RetModel szimulációs példa közúti helyzetre. A szoftverbeli fixációs pont a kép középpontjában (nincs jelölve).



5. ábra

RetModel szimulációs példa közúti helyzetre. A 4. ábra fixációs pontja itt a kép bal oldalán felül (nyílmagasságban a vörös pötty baloldalt) látható, amelynek eredményeként a fixációs pont körül sötét foltokként jelennek meg a közlekedési fényforrások utóképei [Horváth, Dömötör, 2015].

Mivel a RetModel szoftver kép- és videófeldolgozásra specializált, e szoftverrel jelenleg nem meghatározható az adott megvilágítási paraméterekhez tartozó utóképek teljes ideje.

Szükségessé vált tehát olyan szimulációs környezet létrehozása, amely a bemeneti megvilágítások függvényében alkalmas az utókép (virtuális színérzet) erősségének és az utókép (virtuális színérzet) időtartamának meghatározására.

1.3. Célkitűzések

Kutatásomban két célt követtem.

Doktori kutatásom előtt a szakirodalomban már ismert volt a magányos fotoreceptor kinetikai modell [Alpern et al, 1971; Smith et al., 1983], ami lehetőséget nyújt a negatív és pozitív utóképek, a virtuális színérzet és bizonyos szemképrázási jelenségek jobb megértésére.

Kutatásom első céljaként a magányos fotoreceptor kinetikai modellt továbbfejlesztettem. Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulációs számításokat végeztem a fotoreceptorokat érő beeső fény hirtelen színátmenetének utóképet (virtuális színérzetet) kiváltó hatása meghatározására olyan paraméterekkel, mint az utókép (virtuális színérzet) erőssége és az utókép (virtuális színérzet) időtartama. Szimulációs számításaimat a saját magamon, saját magam által végzett önmérési vizsgálataimmal összehasonlítottam. Mindez numerikus kinetikai modellem alkalmazhatóságának ellenőrzésére is szolgált.

Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modell szimulációs számításainak ellenőrzésére kutatásom második céljaként Témavezetőmmel együtt, vizsgálati alanyok bevonásával mérésorozatokot végeztünk annak megállapítására, hogy a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép (virtuális színérzetet) erőssége és időtartama milyen összefüggést mutat az életkorral és a nemmel. A mérésorozatok eredményhalmazait statisztikai és klaszteranalízissel vizsgáltam. Munkám eredménye a numerikus kinetikai modell önálló alkalmazhatóságán kívül várhatóan felhasználható például az említett RetModel szoftver kiegészítő fejlesztésére is.

1.4. A téma aktualitása

Az emberi retina működését részben számítógépes grafikával modellezi Ritschel és Eisemann [Ritschel, Eisemann, 2012], amely modellezés egyik célja a szimulált terek fényérzetének élethűbbé tétele az utókép jelenségének bevezetésével. E munkában az érzékelés modellezése a fényintenzitás alapján történő képmodulációval történik.

Az emberi színérzékelés összefüggései látványtervezési feladatokban is felhasználhatók. Egyik lehetőség a honlapok megjelenési színeinek meghatározása úgy, hogy a dinamikus tevékenységek során (például görgetés) a látványelemek színei élénkebbnek hassanak a hirtelen színváltás következtében.

Videók tervezésében is intenzívebb színérzet érhető el, ha gyors színváltással tudunk tervezni – például erre épült a Sony Bravia reklámvideója [Sony Bravia videó].

Folyamatban van egy kutatás az utókép közlekedésbiztonsági jelentőségének vizsgálatára is [Magyari, 2018]. Ehhez kapcsolódva merül fel a lehetősége adott útszakaszon elhelyezkedő világító reklámtáblák utókép-jellemzésének, a helyszíni megvilágítás spektrum és fénysűrűség mérései alapján, megfelelően fejlesztett szimuláció alkalmazásával.

A közlekedési csomópontok beláthatóságának nehézségei és az előidézett balesetek összefüggéseiben a humán tényezők között a látás objektív és szubjektív fizikai jellemzői fontos járulékos elemek. A beláthatóságot jelentősen ronthatja a hajnali ill. alkonyati napfény, a sötétedésben ill. sötétben szembejövő autók fényszóróinak és a környezet reklámtábláinak vakító hatása, utóképe. Mindezek enyhítésére gyógyírként szolgálhat egy megfelelő mérésorozatokkal ellenőrzött számítógépes szimulációs rendszer kidolgozása.

1.5. A disszertáció szerkezete, a kutatómunka elemei

Kutatómunkám a következő részekből épül fel:

- 2. fejezet: az utóképet kiváltó biofizikai jelenségek rendszere a szakirodalom tükrében. Ennek megértéséhez röviden kitérek az emberi szem felépítésére és a látás folyamatára. Összefoglalom a fotoreceptorok érzékenységét vizsgáló korábbi eredményeket. Kitérek korábbi, Doktori Iskolát megelőző élelmiszeranalitikai A-vitamin vizsgálataimra, konkrétan a szabvány módszerfejlesztésére.
- A 3. fejezet első részében az általam felépített numerikus kinetikai modellt részletezem. A 3. fejezet második részében bemutatom az utóképpel (virtuális színérzettel) kapcsolatos mérések módszereit.
- A 4. fejezet kutatómunkám tézisekbe foglalt eredményeit tartalmazza.
- Az 5. fejezet kutatómunkám összegzése.

Kutatómunkám egy részét Témavezetőmmel együtt végeztem. A vonatkozó kutatási lépések bemutatásánál többes szám első személyt használok.

Az irodalmi forrásokra a [szerző, évszám] formában hivatkozom. Egyes forrásokhoz, mint pl. a monitor gyártói specifikációkhoz csak webes hivatkozás áll rendelkezésre, ezért ezeknek mentett változatát a disszertációhoz fájl mellékként csatoltam. A saját publikációk hivatkozásait sorszámozott formában jelölöm, mint például [S1], [S2].

Előzmények, Célok

2. Előzmények

2.1. Az utókép jelensége

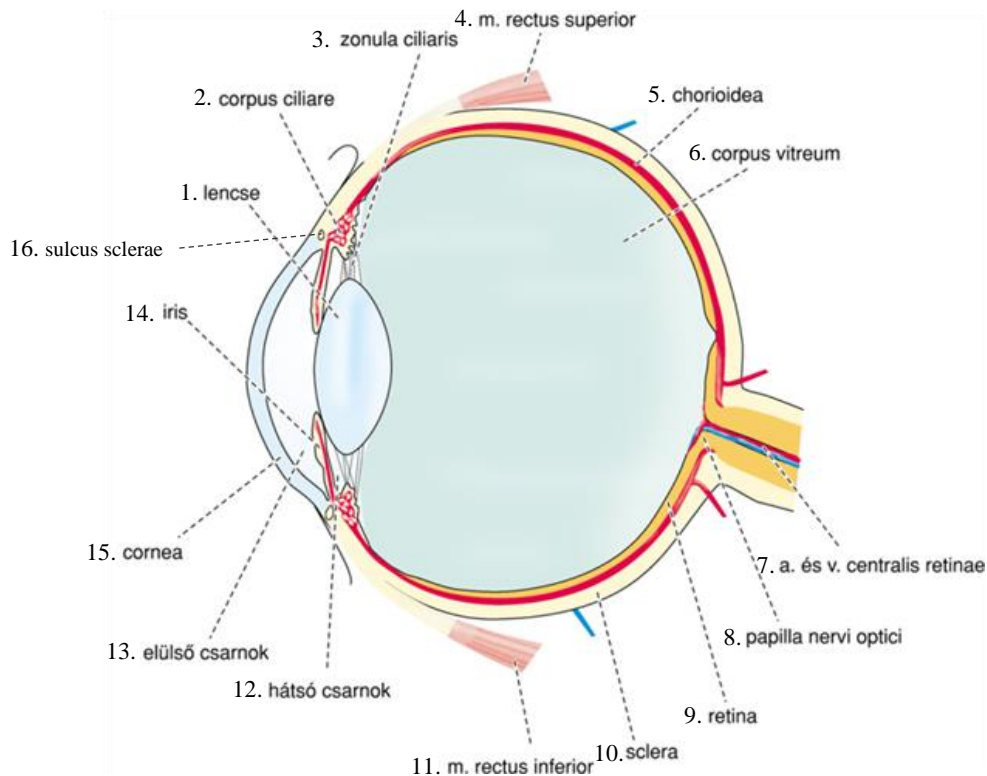
Az utókép azon vizuális jelenség (hagyományos megfogalmazásban illúzió [Petrov, 2002]), amikor a szem látóterében továbbra is jelen van az a kép, amely a valóságban, mint eredeti kép már megszűnt. A leggyakoribb utókép az, amikor pár másodpercre egy erős fényforrásba nézve, majd tekintetünket attól elfordítva, a fényforrás alakjának megfelelő „árnyképet” látjuk úszni a szemünk előtt. Az utókép két formában jöhet létre: negatív (invertált) és pozitív (megtartva az eredeti színt) formában. A pozitív utókép ritka jelensége abból eredhet, hogy a fotoreceptor sejtek felől a fényinger megszűnése után is átmenetileg még érkeznek impulzusok a látópályára. [Franklin, 2013]. A negatív utókép viszont retina és agykérgi jelenség, amelynek hátterét többnyire részletesen leírták [Padgham, 1968; Virsu, Laurinen, 1977; Rinner, Gegenfurtner, 2000; Manzotti, 2017; Kingdom et al. 2020]. Munkámban a negatív utókép kap szerepet. Az utókép megértéséhez az alábbiakban a teljesség igénye nélkül, röviden részletezem az emberi látószervet (2.2.) és annak működését (2.3.).

2.2. Az emberi szem felépítése

Az emberi látószerv három fő funkcionális anatómiai része [Szentágothai, 1977, Buck, 1997]:

- szemgolyó (oculus, bulbus oculi),
- szemideg, (nervus et tractus optici), és a
- járulékos szervek (organa accessoria), amelyek a szem mozgató rendszerét és védő rendszerét alkotják.

Fentiek közül a szemgolyó és a szemideg leírására szorítkozom (6. ábra).



6. ábra

A szemgolyó keresztmetszete. 1. lencse, 2. corpus ciliare, 3. zonula ciliaris, 4. m. rectus superior, 5. chorioidea, 6. corpus vitreum, 7. a. és v. centralis retinae, 8. papilla n. optici, 9. retina, 10. sclera, 11. m. rectus inferior, 12. hátsó csarnok, 13. elülső csarnok, 14. iris, 15. cornea; 16. sulcus sclerae [Süveges, 2010]

Látószervünk a szemgolyó, amelynek átmérője 24 mm és felülről lefelé kb. 0.5 mm-rel lapított. Előre tekintő felszínén kisebb görbületi sugarú gömbszelvényként felszínéből kissé előreugrik az átlátszó szaruhártya (6. ábra/15), melynek szélét a szemgolyó felszínén ezért sekély barázda (sulcus sclerae, 6. ábra/16) veszi körül.

A szemgolyót három burok (tunicae bulbi) határolja: a szem külső (rostos) burka (tunica fibrosa bulbi), a középső burok (érhártya, tunica vasculosa bulbi), és a belső burok vagy ideghártya (retina). A három burok az őket kitöltő szemmaggal együtt alkotja a szemgolyót. A szemmag részei a szemcsarnokok (camera bulbi), a lencse (lens, 6. ábra/1) és az üvegtest (corpus vitreum, 6. ábra/6).

A középső burok vagy érhártya (tunica vasculosa bulbi) hajszálerekkel sűrűn átszőtt, és a retina külső rétegeinek oxigénellátását és táplálkozását biztosítja. Másodlagos funkciója a pupilla kikerülésével bejutó fény kizárása. Részei az érhártya (chorioidea, 6. ábra/5), a sugártest (corpus ciliare, 6. ábra/2) és a szivárványhártya (iris, 6. ábra/14).

A szem külső (rostos) burka erős, nagyrészt kollagénrostokból felépített, gömbháj alakú burok, amelyet a szemgolyó magvának nyomása tart feszesen. Nagyobb hátsó, ínszerűen fehér része az ínhártya (sclera, 6. ábra/10), ennek elülső nyílásába óraüvegszerűen illeszkedik az átlátszó szaruhártya (cornea, 6. ábra/15). Az ínhártya (sclera) tömött rostos kötőszövetből felépülő rostos burok, amely a szemgolyó hátsó 4/5-ét alkotja. Fehér színe a szaruhártya körül áttűnik (ez képezi a „szem fehérét”). A szaruhártya (cornea) folyamatosan megy át az ínhártyába, bár átlátszósága miatt szabad szemmel teljesen különálló lemeznek tűnik.

A szivárványhártya (írisz, 6. ábra/14) lapos, gyűrű alakú lemezként osztja ketté a szemcsarnokot. Közepén foglal helyet a pupilla, amelynek átmérője a megvilágítástól függ. Lapos alakja tökéletlen: hátsó felszínével rugalmasan nekifekszik a szemlencse domború elülső felszínének, követi annak görbületét.

A szem törőközegei a szem magva: a szaruhártya (cornea, 6. ábra/15), a szemcsarnokok (camera bulbi, 6. ábra/12,13), a lencse (lens, 6. ábra/1) és az üvegtest (corpus vitreum, 6. ábra/6).

Az ideghártya (retina) fejlődéstanilag módosult agyhólyagfal, amely az elülső agyhólyag (prosencephalon, diencephalon) betüremkedéséből létrejött, kettős falú kehelyszerű képződmény. A külső rétege pigmenthámréteg, míg a fényérzékeny belső rétege a szem hátsó kétharmadában sokrétegű idegszervként van jelen. A pigmenthámréteg és a belső réteg hozzátétőlegesen a pupillánál megy át egymásba. A retina 10 rétegből áll (7. ábra), amelyek sorszámozása a szemgolyó középpontjára vonatkoztatva kívülről befelé haladva növekszik.

I. pigmenthám (*stratum pigmenti retinae*); hatszögletű, alacsony, hasáb alakú sejtek, amelyeknek citoplazmáját barna pigment szemcsék töltik ki. Nyúlványai a csapok és pálcikák külső tagjai közé tagozódnak, és erős megvilágításnál a pigment szemcsék a sejttestből a nyúlványokba vándorolnak, míg gyenge megvilágításnál a sejttestbe visszavándorolnak. Ez a pigment szemcsék adaptív mechanizmusa, amelynek alacsonyabbrendű gerinceseknél van jelentősége. A pigmenthám ezen túl részt vesz a látópigment újratermelésében, a csapok és a pálcikák anatómiai integritásának fenntartásában.

II. csapok és pálcikák rétege; Ebben a rétegben található a retina fotoreceptor sejtjei, a csapok és a pálcikák, amelyek bipoláris neuroepithelialis sejtek, a IV. rétegben található sejttestekkel. E sejttestekből induló közepső nyúlványok a VII. rétegben érnek véget.

III. *membrana limitans externa*; ebben a rétegben található a retina gliasejtjei, amelyek közül a legjellegzetesebb az ún. Müller-féle gliasejt. Ennek sejttestje a VI. rétegben található, míg nyúlványai a retina felszínére merőlegesen helyezkednek el. Perifériás nyúlványai a csapok és a pálcikák tövéig terjednek, és azok minimális közét kitöltve, tökéletes záróréteget képeznek

(membrana limitans externa). Ezt a záróréteget kiegészítik a pigmentsejtek közeit elzáró zonula occludens kapcsoló rendszerek (7. ábra) biztosítva a csapok és a pálcikák sejtközi térrel nem rendelkező, tökéletes zárását.

IV. *stratum granulosum externum*; A csapok és pálcikák sejttestjeit tartalmazza.

V. *stratum plexiforme externum*; a retina szinaptikus rétege, amelyben a fényinger által a fotoreceptorokban keltett ingerületek a látópálya neuronjára, a bipolaris neuronokra áttevődnek.

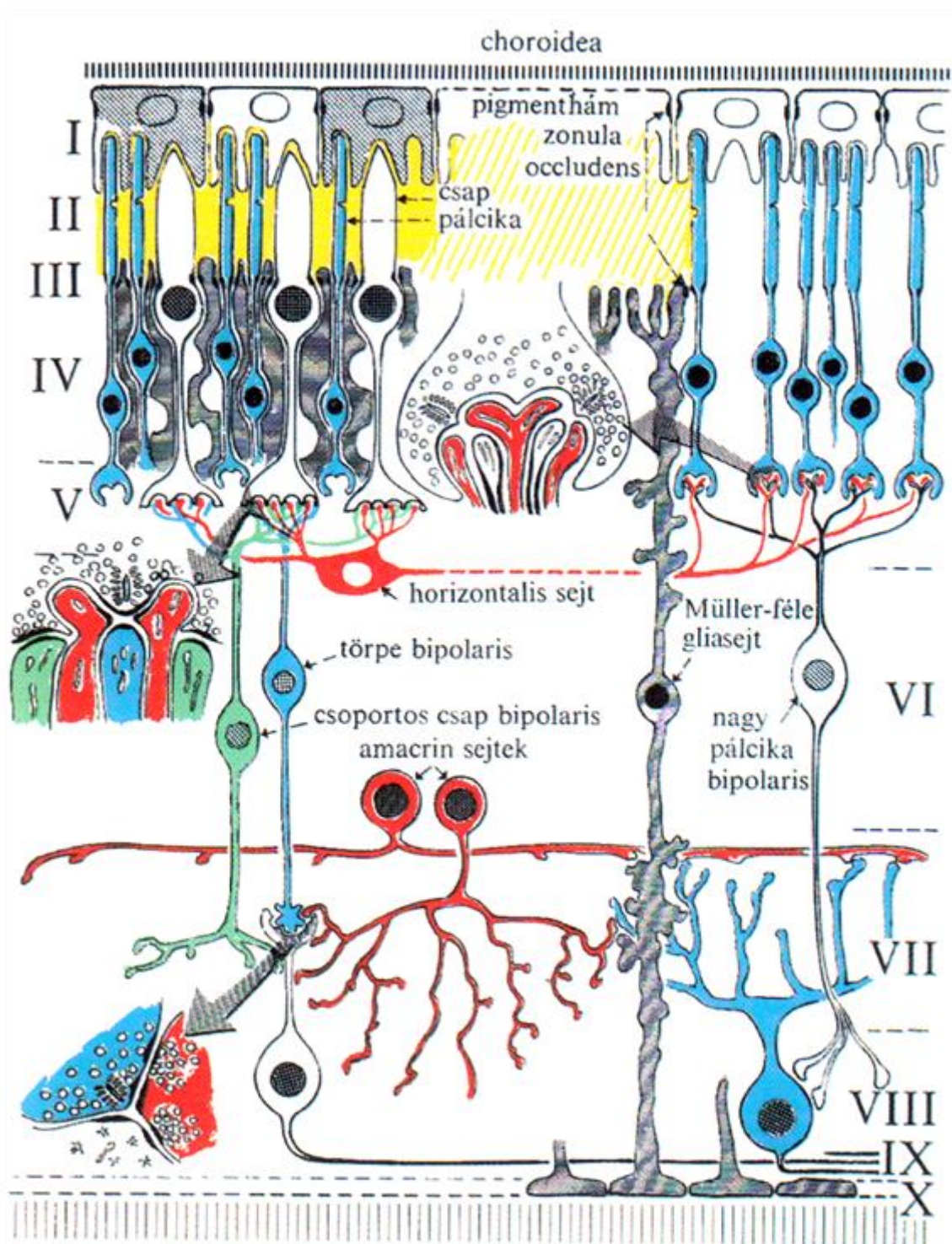
VI. *stratum granulosum internum*; ez a réteg tartalmazza a különböző sejtek sejttestjeit. Itt találhatóak a bipolaris neuronok sejttestjei, amelyeknek két nyúlványa a retina felszínére merőleges irányban áthidalja a stratum plexiforme externum és a stratum plexiforme internum közötti távolságot.

VII. *stratum plexiforme internum*; a látópályán a bipolaris neuronok az opticus neuronok idáig felnyúló dendritjeivel lépnek kapcsolatba. A szinaptikus komplexekben az amacrin neuronok nyúlványai is részt vesznek.

VIII. *stratum ganglionare*; ebben a rétegben helyezkednek el az opticus neuronok sejttestjei.

IX. opticus rostok rétege; az opticus neuronok idegnyúlványai itt szedődnek össze – ebben a rétegben velőtlenné, és a discus nervi optici területén válnak velősekké. Továbbá, ebben a rétegben ágazódik el a retina belső rétegeit tápláló arteria és vena centralis retinae.

X. *membrana limitans interna*. A Müller-féle gliasejtek centrális nyúlványai itt érnek véget. A nyúlványok gliatörményekben végződnek, amelyek zonula occludens kapcsolódással egységes záróréteget képeznek a retina és az üvegtest között.



7. ábra

A retina rétegei: I. pigmenthám (stratum pigmenti retinae), II. csapok és pálcikák rétege, III. membrana limitans externa, IV. stratum granulosum externum, V. stratum plexiforme externum, VI. stratum granulosum internum, VII. stratum plexiforme internum, VIII. stratum ganglionare, IX. opticus rostok rétege, X. membrana limitans interna [Szentágothai, 1977].

2.3. A látás folyamata

A fény a látórendszer működése függvényében többféleképpen definiálható. A definíciók a fénytechnika szabvány terminológiájának megfelelően [MSZ 9620-1:1990] egyaránt tartalmazzák a fizikai (meghatározott hullámhosszú sugárzás, inger), a fiziológiai (fényinger által kiváltott érzet) és a pszichológiai (agykérgi látóközpontban létrejött észlelet) megközelítést.

A szem a szaruhártya, pupilla, szemlencse és üvegtest segítségével gyűjti össze a beeső fényt [Ábrahám et al., 2014a]. Optikailag leghatékonyabb közöttük a szaruhártya mivel a levegőtől jelentősen eltérő törésmutatóval rendelkező szemfelszíni határfelület. A szemcsarnokba benyúló pupilla feladata a környezeti fénysűrűséghez történő adaptáció a fény mennyiségének szabályozásával. A szemlencse biztosítja a szem akkomodációs képességét: görbületi sugarát a sugárizom segítségével változtatja. A fény útjában további elem az üvegtest, amely a szemnek az optikai szempontból előnyös gömbformát biztosítja.

A koncentrikus receptormezőkbe szerveződő fotoreceptorok között a retina periféria felé haladva zömmel pálcikák, az éleslátás helyén pedig zömmel csapok fordulnak elő [Ábrahám et al., 2014b]. A pálcikák érzékenységi maximuma 507 nm-es hullámhosszon található. A három csaptípus közül a hosszú hullámhossztartományra (vörösre), közepes hullámhossztartományra (zöldre) és rövid hullámhossztartományra (kékre) érzékeny csapok érzékenységi maximuma rendre az 565 nm, 535 nm és 420 nm hullámhosszok közelében helyezkednek el [Hunt, 2005]. Disszertációmban a hosszú hullámhosszra érzékeny csapokat „L”, a közepes hullámhosszra érzékeny csapokat „M”, és a rövid hullámhosszra érzékeny csapokat „S” betűkkel jelölöm.

A pálcikák fényérzékeléséért a rodopszin, a csapok fényérzékeléséért a fotopszin fotopigment felel [Kumar, 2010; Sudhakar, Venkatesh, 2018].

Szkotopos (sötétadaptált) látásnál (10^{-6} és 10^{-3} cd/m² megvilágítás között [Horváth, 2013]) jellemzően a pálcikák aktívak. A megvilágítás átmeneti (10^{-3} és 3 cd/m² közötti) tartománya mezopos látást eredményez: a csapok és pálcikák egyaránt aktívak, a csapok megszabta színlátásban egymással kölcsönhatásban, átfedésben vannak [Barris, Thomas, 1978; Stabell, Stabell, 1994; Buck, 1997; Mikamo et al., 2013]; ezáltal a nappali színérzékeléshez képest a „kék” alapszín felé tolódik el egy adott színérzet. A fotopos (fényadaptált) látásban (3 és 10^6 cd/m² között) a csapok szerepe a meghatározó, így a pálcikák hatása a színérzékelésben elhanyagolható. A csapoktól és pálcikáktól átvett ingerületet a bipoláris idegsejtek továbbítják a ganglion sejteknek, amelyek axonjai a látóideg kezdetét (nervus opticus, II agyideg) alkotják.

A ganglion sejtek négy típusát különböztetjük meg [Purves et al., 2011]: PC (vagy P – parvocelluláris), MC (vagy M – magnocelluláris), KC (vagy K – koniocelluláris) és ipRGC (intrinsically photosensitive retinal ganglion cell, azaz fényérzékeny) típust. A PC ganglion sejtek színlátásunk alapjait képezik, és igen kismértékben érzékenyek a kontrasztváltozásokra. Ezzel szemben az MC típusúak nem játszanak fontos szerepet a színérzékelésben. A KC típusú sejtek szerepe csak részben tisztázott, a kontrasztérzékelésben van szerepük. A többi ganglionsejt típushoz viszonyítva kisméretűek, és a kék csapokhoz kapcsolódva mindig on-, a vörös és zöld csaphoz csatlakozva mindig off-típusúak.

A két szemből kilépő látóideg a hipofízis nyél előtti területen találkozik részleges átkereszteződéssel: a halántéki (temporális) rostok azonos oldalon maradnak, amelyekhez az ellenoldali, orrüreg felőli (nazális) látóidegek csatlakoznak. Az így kialakult tractus opticusok az oldalsó térdes testbe (corpus geniculatum laterale) futnak. Onnan az információ az agykéregbe jut (radiation optica), és a nyakszirtlemben keletkezik a látásérzet.

A térdestestben megtalálhatók a PC, MC és KC ganglionsejt típusok funkcionális párjai. Az MC sejtek kulcsfontosságúak a mozgás, mélység és kis megvilágításbeli különbségek észlelésében. A PC típusú sejtek kulcsszerepet játszanak a szín és forma észlelésében. A KC sejtek a látási észleletet rendezik össze a szomatoszenzoros-proprioceptív információval, emellett lehetséges a szerepük a színérzékelésben.

2.4. Az utókép jelensége részletesen

A 2.1. fejezetben már említett utókép két megjelenési formája különböztethető meg: a negatív (invertált) és a pozitív (megtartva az eredeti színt) utókép. A pozitív utóképek kevésbé ismert jelensége vélhetően neurális adaptációhoz kötött folyamat eredménye [Franklin, 2013]. A negatív utókép viszont retina jelenség, amelynek hátterét többnyire részletesen feltárták [Padgham, 1968; Virsu, Laurinen, 1977; Rinner, Gegenfurtner, 2000; Manzotti, 2017; Kingdom et al., 2020].

a) Pozitív utóképek:

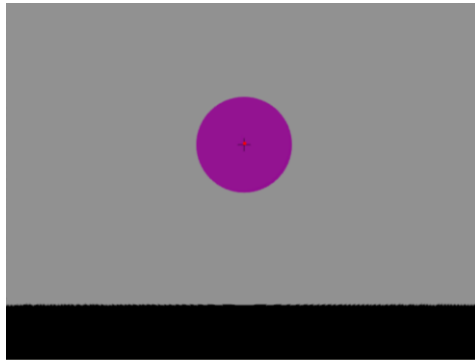
A pozitív utóképek az eredeti kép színében jelennek meg. Legtöbbször nagyon rövid időtartammal, legfeljebb fél másodpercig tartanak. A pozitív utóképek oka még nem feltárt. Valószínű, hogy az adekvát fotoinger megszűnése után a fotoreceptorok még rövid ideig küldik

az idegimpulzusokat, amelyek az előzőekben részletezett anatómiai-élettani útvonalon a nagyagy occipitalis (nyakszirti) lebenybe jutnak. A pozitív utóképet igen hamar követi a negatív utókép az adaptációs folyamat során. Például erős fényforrásba tekintés után sötét felületre nézve (vagy a szemünket becsukva) először egy gyorsan halványuló pozitív utóképet látunk, amelyet egy jóval hosszabb ideig tartó negatív utókép követ. A pozitív utóképek nem képezik kutatásom tárgyát.

b) Negatív utóképek:

A negatív utóképek akkor jöhetnek létre, amikor a szem fotoreceptorai adaptálódnak az erős ingerekhez, és veszítenek érzékenységükből. Alacsony megvilágításnál (szkotopos) a pálcikák utóképe dominál [Adelson, 1982], ez azonban nappali megvilágításnál (fotopos) elhanyagolható, ahol a csapok veszik át a szerepet. Mivel a szem nagy sebességű kis mozgásokat végez (mikroszakkádok [Engbert, Kliegl, 2003]), és ezek a mozgások később „kiszűrődnek”, így nem vesszük őket észre. Viszont, elég nagy méretű színes alakzat esetében az apró szemmozgások nem elhanyagolhatók, és az alakzat retinára vetülő területén a csapok adaptálódnak az alakzat színéhez. Látómezőnk közepe táján az adaptált fotoreceptorok alacsony fényérzékenységük miatt gyenge ingerületet továbbítanak, ezzel a megfelelő szinkomponenseket tompítják. Viszont körülöttük a környező csapok magas fényérzékenységűek, és erősebb ingerületet továbbítanak. A nagyméretű alakzathoz adaptált fotoreceptorok összességéből kapott ingerület végül olyan érzetet eredményez, mintha ellentétes, invertált színt néznénk, és ezt az agyunk így is dolgozza fel. Ez az opponens színelmélet [Links, 1964; Hurvich, 1981], amely szerint három pár elsődleges szín alapján magyarázható, hogyan látunk utóképeket. Az opponens színelmélet az állítja, hogy az emberi látórendszer úgy kap információt a színekről, hogy antagonista módon dolgozza fel a csapokból érkező jeleket. Az opponens színelmélet szerint három fő opponens csatorna létezik: a piros a cian színnel, a kék a sárgával, és a fekete a fehérrel szemben opponál. Az utóképet kiváltó színek az opponens csatorna színekre tehát ellentétes hatást gyakorolnak. Ezért fogja egy zöld kép egy magenta utókép hatását okozni. A zöld színhez történő adaptáció ugyanis csökkenti a zöld fotoreceptorok érzékenységét, így ezek gyengébb jeleket adnak. Minden, ami kevesebb zöldként értékelődik, az úgy lesz neurálisan feldolgozva, mintha több lenne benne az opponens színpárból, a magenta színből.

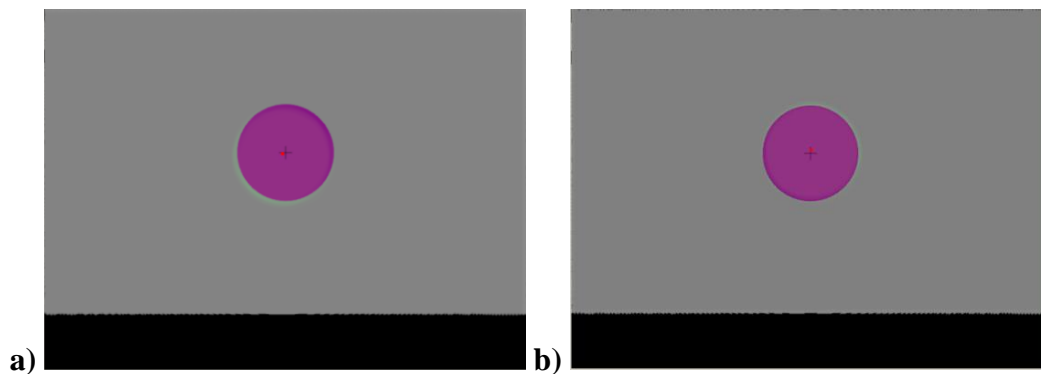
Egy színes folt hosszas nézése, fixálása komplementer színű utóképet eredményez. A 8-10. ábrán bemutatott példákban szürke háttérben elhelyezett lila kör hosszas fixálása után jelentkező utóképet mutatok be a korábbiakban említett RetModel elnevezésű szimulációs programmal. Az utókép hatás jó láthatósága kedvéért nagyon erős utóképet szimuláltam, amely az eredeti alakzat kb. 5 perc folyamatos nézése (fixálás) után jelentkezett. A 8. ábra a kör alakzatot mutatja, középpontjában a vörös pötty a fixálási pont.



8. ábra

Utókép példa: alakzat észlelése a fixálás kezdetén

A 9. a) és 9. b) ábra a mikroszakkádokkal támogatott utóképet modellezi a fixált kör alakzat menti szegély -halo- megjelenésével.



9. ábra

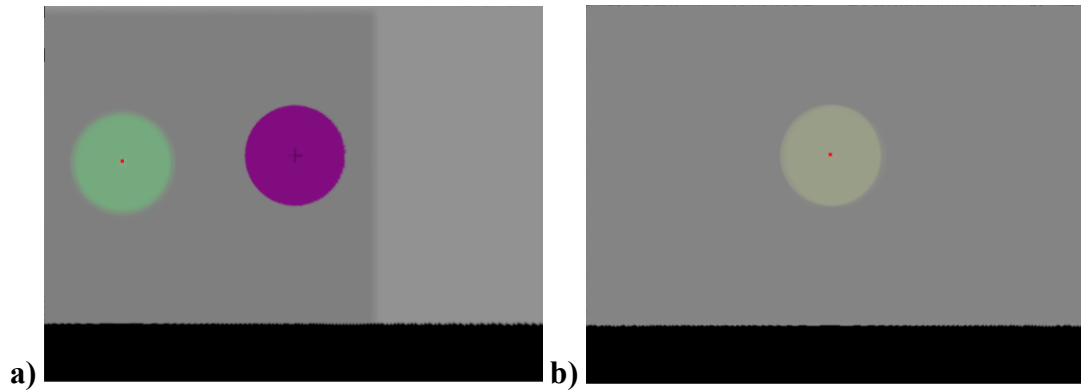
Utókép példa: fixálás során a mikroszakkádok révén világos halo megjelenése a kör alakzat

a) bal oldalán

b) jobb oldalán

Amikor a háttér eltűnik (fehér lesz), vagy más fehér háttérre tekintünk, vagy a fixálási pontot elmozdítjuk, vagy a 10. a) ábra szerinti fixálási pontról elfordul a tekintet, a kör alakzatot közelítőleg komplementer színben láthatjuk, ami esetünkben a zöld szín.

A 10. b) ábra a retina vörös csapok fotopigment koncentráció-eloszlását mutatja a 10. a) ábra lila kör alakzatának középpontjában látható kereszt hosszú fixálása után, a fixált kör alakzat utóképének megfelelő formában.



10. ábra

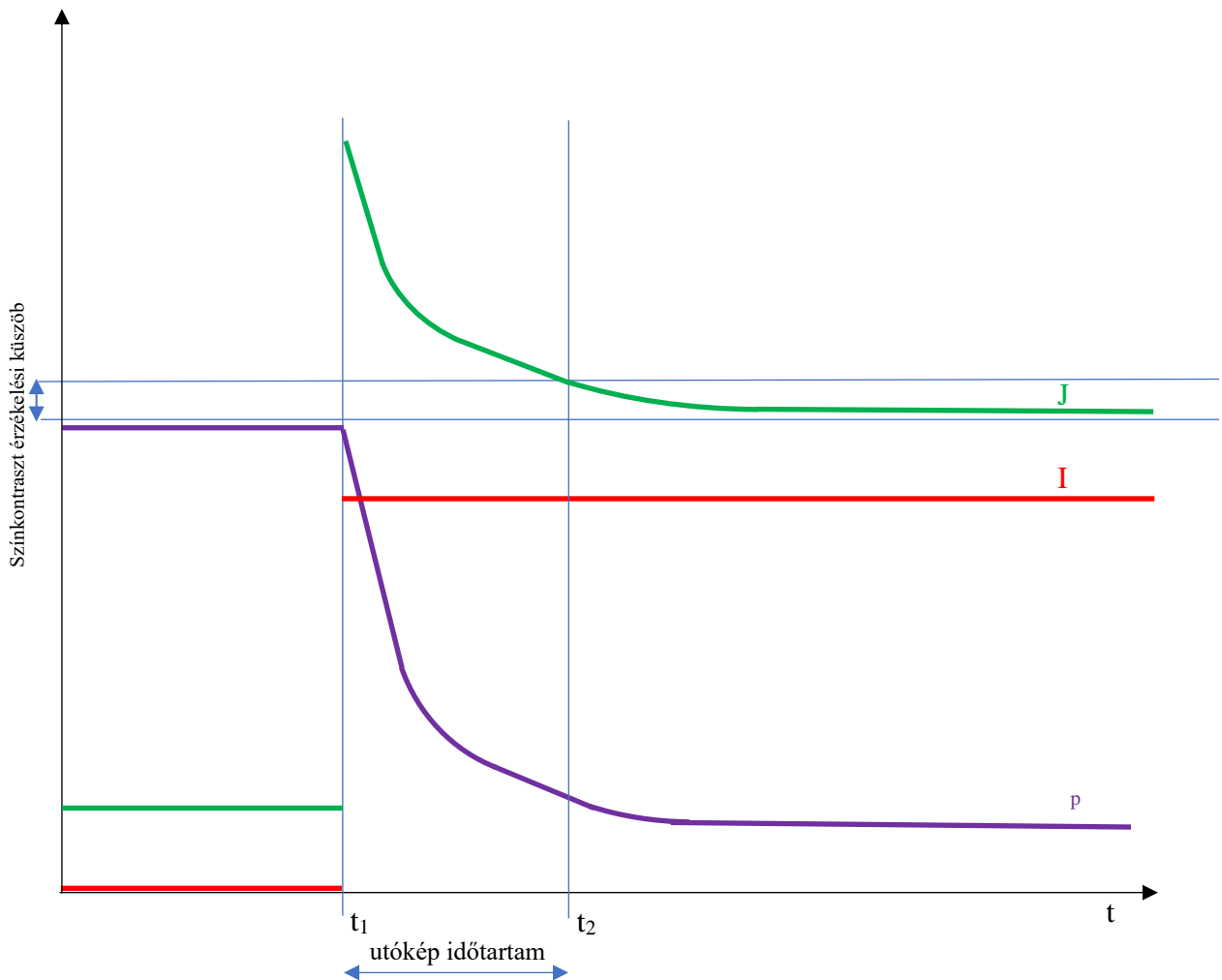
Utókép példa: a) a szimulációs szürke háttérben a megfigyelő a fixálási pontról tekintetét elfordította és észlelte a lila kör alakzat zöld utóképét b) az észlelt utóképhez tartozó fotopigment koncentráció-eloszlás a retinán

Itt említendő, hogy létezik kóros utókép (palinopsia) [Duane, 2005], amely nem képezi jelen kutatásom tárgyát.

Az utóképek létrejötte háttérében számos élettani folyamat sorjázik [Rinner, Gegenfurtner, 2000; Dong et al., 2017]. A munkám szempontjából lényeges folyamatokat a 2.4.1. fejezetben részletezem.

2.4.1. Fotoreceptorok érzékenységi kinetikája

A 11. ábra egy magányos csap relatív fotopigment koncentrációját és a csap által küldött ingerület intenzitását mutatja a megvilágítás függvényében, az adott csapnak megfelelő hullámhosszon teljesen sötétből nappali megvilágításra történő hirtelen váltással t_1 időpontban.



11. ábra

Egy csap relatív fotopigment koncentrációjának (p), és a csapban kiváltott ingerület erősségnek (J) időbeli lefutása a csap hullámhossz-érzékenységi tartományának megfelelő retina megvilágítottság (I) függvényében. A csap a t_1 időpontig nem kap adekvát megvilágítást. A t_1 időpontban hirtelen változásként a beeső fény adekvát megvilágítás lesz.

A fotopikus (nappali) fotoreceptor adaptáció fiziológiai hátterében az emberi színlátásban részes L (hosszú), M (közepes) és S (rövid) hullámhosszra érzékeny csap fotoreceptorok

kombinált válaszából áll. A folyamatban a fotopszin fotopigment játszik kulcsszerepet: relatív koncentrációjának egyensúlyát a fény hatására történő gyors hasadás, és a sötétben való lassú újraszintetizálódás határozza meg [Linksz, 1964; Hurvich, 1981]. A hasadás és újraszintetizálódás folyamatát részletesen a 2.8. fejezetben mutatom be.

Amikor a retina megvilágítása erősödik, a fotopigment relatív koncentrációja csökken, így az erős fénynek kitett retinafelület érzékenysége addig csökken, amíg a fotopigment újraszintetizálódás nem biztosít elegendő fotopszin molekulát a következő megvilágítási ciklusra. Ez az adaptációs folyamat a különböző hullámhossz érzékenységgű csap fotoreceptorokon egymástól függetlenül zajlik. Ebből következően a színes beeső fény különböző L, M, S csapérzékenységekhez vezet. Ezáltal a beeső fény színbeli gyors változása időleges hamis színérzetet, úgynevezett utóképet vált ki. Például telített vörös színű fényben az L (vörösérzékeny) csapérzékenység csökken, míg az M (zöldérzékeny) és S (kékérzékeny) csapérzékenység viszonylag magas szinten marad. A csapoknak ebben az állapotában a beeső fény hirtelen váltása szürkére hamis zöldes-kékes színérzetet fog adni, mert az M és S csap receptorok érzékenysége átmenetileg magas lesz, míg az L csapok érzékenysége egy ideig alacsony marad. Az új egyensúlyi állapot elérése időigényes (kb. több száz másodperc is lehet), amelynek végén az utókép eltűnik.

A csapok pillanatnyi érzékenysége a relatív fotopigment koncentráció függvénye. A csapok érzékenységi kinetikájának meghatározásához több kutatás foglalkozott az L és M csapok relatív fotopigment koncentrációjával különböző intenzitású megvilágításokat követően, szemre illeszhető denzitométer segítségével. [Rushton, 1958; Rushton, 1963a-c, Rushton, 1964; Rushton, 1968; Alpern et al., 1971; Smith et al., 1983]. A 11. ábrán szereplő p érték 0 és 1 közötti viszonyszám, amely a pillanatnyi abszolút fotopigment koncentráció arányát jelöli a telítési abszolút fotopigment koncentrációhoz képest. Kutatások alapján a teljes sötétséghez szokott szem alkalmazkodási ideje közelítőleg 100 s körüli, az átlagos nappali megvilágításról a teljes sötétséghez való alkalmazkodás (a fotopigmentek újbóli felépülése) közelítőleg 400 s. A fotopigment felépülése és hasadása közel lineáris kinetikával jellemezhető, azaz p (a relatív fotopigment koncentráció) időbeli differenciálja az (1) egyenlettel írható fel [Horváth, 2013]:

$$\frac{dp}{dt} = Q_s - Q_c - Q_i \quad (1)$$

ahol Q_s a fotopigment szintézis, Q_c a spontán fotopigment hasadás és Q_i az indukált fotopigment hasadás sebessége. Q_s , Q_c , Q_i leírható a (2) – (4) egyenletekkel:

$$Q_s = \frac{1}{\tau} \quad (2)$$

$$Q_c = \frac{p}{\tau} \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{E}{E_0} \cdot \frac{p}{\tau}, \quad (4)$$

ahol az időállandó $\tau=99$ 1/s és $E_0 = 6000$ Smith munkája alapján [Smith et al., 1983]. E_0 az a retina megvilágítás intenzitás, amelynél a fotopigment spontán és indukált hasadása egyensúlyban van.

A fenti fotopigment-kinetikával ellentétes eredményre jutott egy későbbi kutatás. Eszerint a fotoreceptor adaptáció valójában egy 40-70 ms félélettartammal bíró gyors komponens az emberi látás teljes adaptációs folyamatában [Hayhoe et al., 1987; Kefalov, 2012]. A gyors komponens követő lassú exponenciális szakasz félélettartama tipikusan 20 másodperc körüli, amely a retina ganglion sejtek „szellemképet” előidéző aktivitásának [Zaidi et al., 2012], valamint a bipoláris sejteknek, az adaptáció lassú fázisa kiinduló pontjának tulajdonítható. Mindezt további pszichofiziológiai kísérletek is megerősítették [Rinner, Gegenfurtner, 2000; Stanikunas et al., 2020].

2.4.2. Adaptációs mechanizmusok az utókép létrejöttében

Rinner és Gegenfurtner szerint a csap alapszínek (vörös, kék, zöld) közötti váltáskor, időbeli lefutásuk alapján a színadaptáció, azaz a változó fényviszonyokhoz történő alkalmazkodás során három fázis különböztethető meg, a színváltások sorrendjétől függetlenül. Ezek a fázisok a következők:

- lassú fázis 15-20 másodperc exponenciális lecsengéssel, egyaránt jellemző a színmegjelenésre és a színmegkülönböztetésre.
- színadaptációs folyamat, amely kb. 2 perc után állandósul.
- gyors fázis 40-70 ms félélettartammal, általánosan jellemző a színmegjelenésre és a színmegkülönböztetésre.
- kizárólag a színmegjelenésre vonatkozóan fennáll egy legfeljebb 25 ms fázis, ami a színmegjelenésben meghatározó időtartam.

A színadaptáció további komponense látókérgi alapú: egy 10 ms-nál rövidebb, sokszorozódó térbeli folyamat, ami a teljes adaptáció több mint 50%-áért felelős [Rinner, Gegenfurtner, 2000]. Az utóképek posztreceptorális alapjait Zaidi és társai, Kingdom és társai, valamint Virsu és Laurinen taglalják [Virsu, Laurinen, 1977; Zaidi, 2012; Kingdom et al., 2020].

Zaidi és társai 6 tesztalanyon az alábbi pszichofizikai kísérletet végezték el. A kísérletben homogén szürke háttéren opponens színű félkörökre osztott körlap fokozatosan, szinuszos átmenettel jelent meg, majd halványodott vissza a homogén szürke háttérre. A 12. ábra felső sora ezt a szinuszos átmenetet a 0.09π fázisszögenként szemlélteti lila-zöld félkörökkel. A felső sor bal szélén az első négyzet a kiindulási szürke árnyalat. A szinuszosan színmodulált lila-zöld színinger fokozatosan, szinuszosan erősödött 0.5π fázisszögig (az ábrán nem szerepel), majd fokozatosan visszahalványodott az utolsó négyzetben látható szürke alapszínre. A 12. ábra 2. sora a tesztalanyok által érzékelt képeket szemlélteti. Az érzékelt kör alakzatok kezdetben jól követik a megjelenített kör képét. 0.5π fázisszöget követően azonban a tesztalanyok által érzékelt kör igen hamar elhalványodik, és szürkére változik, majd opponens színű utóképként jelenik meg (12. ábra 2. sor, 0.72π). A 12. ábra 3. sora a képen megjelenő óraszámot szemlélteti, amelynek segítségével a tesztalanyok a szürke színérzet pillanatát jelezték.

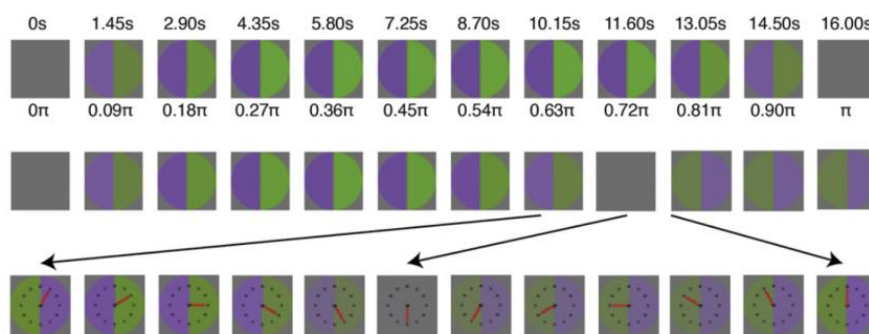


Figure 1. Psychophysical Procedure

Top shows half cycle of sinusoidal stimulus modulation (1/32 Hz presented at 120 frames/sec) depicted for this figure at 1.45 s and 0.09 radian intervals. Middle shows approximate percept corresponding to the stage of stimulus modulation immediately above. The two halves reach identity perceptually before they do physically. Bottom shows that the segment of trial around the point of identity is expanded to show how the clock face is used to make the measurement. A supplemental movie of the procedure is linked to the online version.

12. ábra

Szinuszos színmodulálás érzékelése [Zaidi et al., 2012]

Zaidi és társai további kísérletben makákó majmokon vizsgálták a szinuszosan modulált szürkészínes színváltásokra adott KC, PC és MC ganglionsejt válaszokat.

A ganglionsejtek válaszában rebound (visszacsapás) effektus volt tapasztalható: jóval az inger szürkére fordulása előtt a ganglionsejtes válaszok az ingerlés előtti szint alá estek, majd onnan lassan tértek vissza (13. ábra felső sora). Opponens színátmenetknél a ganglionsejtek időbeli válasza fordított mintázatot mutattak (13. ábra alsó sora). A 13. ábra A oszlopa a KC, B oszlopa a PC, C oszlopa az MC ganglion sejtek (ld. 2.3. fejezet) válaszát mutatja.

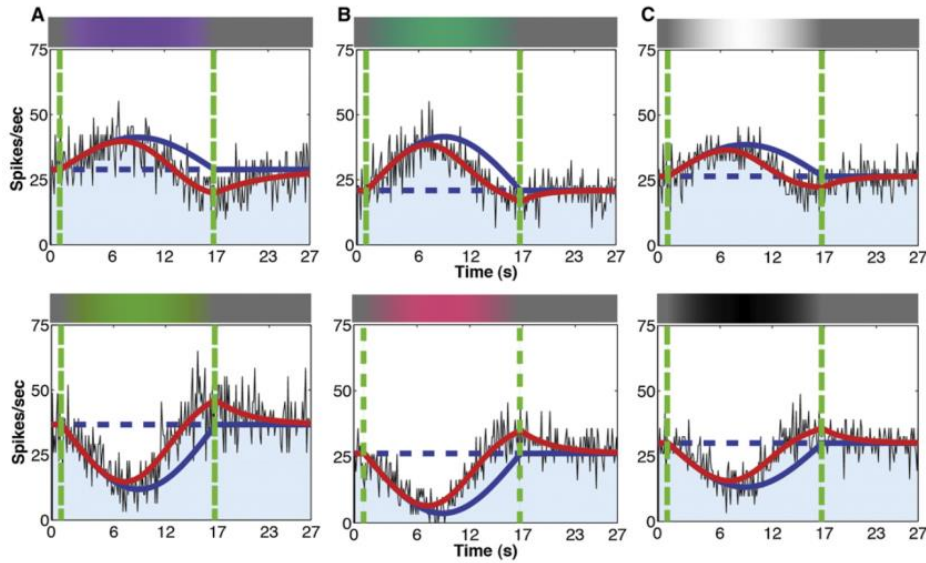


Figure 3. Ganglion Cell Responses to Slow Sinusoidal Modulations

(A) Histogram of +S-center KC spike responses to modulation toward violet (top) and yellow (bottom) pole of $\Delta(S)$ axis. Solid red line represents best fit of adaptation model. Solid blue line represents response of cell without adaptation, which tracks the stimulus time course. Dashed blue line represents prestimulus response. Vertical green lines represent beginning and end of sinusoidal stimulus modulation.
 (B) +M-center PC response to modulation toward green (top) and red (bottom) pole of $\Delta(L-M)$ axis.
 (C) ON-center MC response to modulation toward light (top) and dark (bottom) pole of $\Delta(L+M+S)$ axis. Note that all responses return to prestimulus levels before the second green line and have the opposite polarity at that line.

13. ábra

Retina ganglionsejt válasz lassú szinuszos színmodulációra [Zaidi et al., 2012]

Zaidi és társai megállapították, hogy a fotoreceptort „fehérítő” intenzitásnál jelentősen halványabb beeső fény esetében az utókép létrejöttében a fotoreceptorok mellett a retina ganglionsejteknek jelentős szerepe van.

Powell és társai [Powell et al., 2015] megállapították, hogy a mikroszakkádok rövidítik az utókép időtartamát, azonban a pislogás meghosszabbítja azt.

2.4.3. Öregedés és színérzet

A színérzékelés, a színmegkülönböztetés, a színérzet az életkorral változik.

A legegyszerűbb jelenség a szenilis miosis (időskori pupillaszűkülés), ami az élet során fokozatosan ölt formát; a csökkenő pupillafelület a szembe lépő fény sűrűség-csökkenését jelenti [Suzuki et al., 2012]. Ebből eredően, egy adott színinger enyhébb fotoreceptor választ vált ki, ami az utókép erősségét és időtartamát is csökkenti.

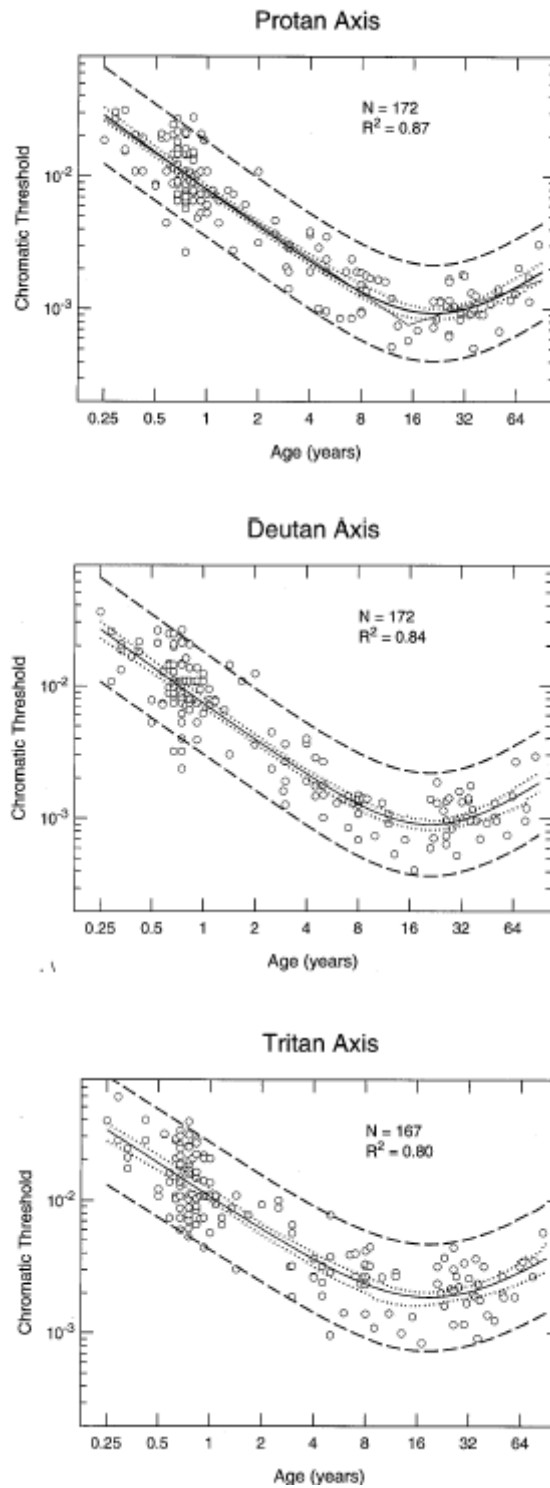
Másik jól ismert jelenség a szemlencse sárgulás, ami a szem rövid hullámhosszú fényérzékenységét csökkenti (S csapok gyengébb válasza). Retina szinten ez a tranziens tritanópia (kék iránti színvaktság, hiba a kék-sárga megkülönböztetésben), aminek mértéke az életkorral nő [Elliott, 2012]. Erre a növekedésre a csap rövid hullámhosszú fényérzékenység-csökkenése nem ad magyarázatot; a kutatások a fotoreceptor és a bipoláris sejt között fellépő posztreceptor adaptációs jelenségről, a rövid hullámhossz-érzékenység kontrolljának megváltozásáról számolnak be [Werner et al., 2010].

Van olyan vélemény, miszerint az idősödés leginkább a sárga-kék színmegkülönböztetést érinti [Wuerger, 2013].

Sturr és társai [Sturr et al., 1985] az utókép első másodpercén belüli 50 ms tartományban végeztek méréseket. Az életkor függvényében következetes lassulást találtak a korai fényadaptációban: fiatal korcsoportban meredek fényérzékenység-visszatérési függvényt, középső korcsoportban kevésbé meredek fényérzékenység-visszatérési függvényt, idősebb korcsoportban a fiatalokhoz képest fordított tendenciájú függvényt tapasztaltak

A színmegkülönböztetés minimális küszöbértéke – a legjobb színmegkülönböztetési képesség – embernél a korai 20-as évekre jellemző [Knoblauch et al., 2001]. Knoblauch és társai bemutatják, hogy 20 év felett ez a színmegkülönböztetési küszöbérték növekszik, ami azt jelenti, hogy idősebbek csak erősebb szíkontrasztokat tudnak elkülöníteni. Ez fontos tényező lehet az utóképek kialakulásánál, hiszen azok időbeli lecsengése fokozatos halványodással jár. Ugyanakkor, a megnövekedett színmegkülönböztetési küszöbérték az utóképnek rövidebb időtartamot szab.

A színmegkülönböztetési képességnek tehát két meghatározó periódusa az ifjú kor és az öregedés időszaka. A színmegkülönböztetési küszöbérték életkor függvényében mutatott minimumát Knoblauch és munkatársai grafikusán ábrázolták (14. ábra).



14. ábra

Csapok színmegkülönböztetési küszöbértéke (y tengely)

az életkor függvényében (x tengely)

Protan axis = vörös, Deutan axis = zöld, Tritan Axis = kék tengely [Knoblauch et al., 2001]

2.4.4. Korábbi utókép mérések

Reidenbach vakítóan nagy fényerejű, vörös, borostyánsárga, zöld és kék fényű LED fényforrások rövid idejű felvillanásával kiváltott utóképek színérzetét vizsgálta [Reidenbach, 2008]. A munka a nagy energiájú LED fényforrások (HB-LED) „blue-light hazard effect” hatásáról, a kiváltott hosszú élettartamú (≈ 12 min) primer utókép okozta átmeneti vakításról számol be. Megfigyelése szerint a primer utókép az eredeti kép szín- és fényerősségével rendelkezik, majd idővel átengedi helyét a komplementer utóképnek.

Phuangsuwan és Ikeda az opponens színelméletet fejlesztették tovább: tesztalanyokkal végzett vizsgálatukban fehér háttéren 20-féle színátmenettel (3 alapszín és 17 kevert szín) hoztak létre utóképeket, amelyek színérzetét opponens színárnyalatokkal vetették össze. Ehhez a tesztalanyok által észlelt utókép színérzetet a Munsell-skála [Ábrahám et al., 2014d] szerinti 100 árnyalatos színekészlettel egyeztetették. Eredményeik szerint jelentős eltérés tapasztalható a ténylegesen érzékelt utókép színárnyalat és az eredeti szín opponens, ellentétes színárnyalata között. Az utóképek időtartamát nem vizsgálták [Phuangsuwan et al., 2018; Ikeda, Phuangsuwan, 2018].

Kline és Nestor egy színátmenettel, a zöld-vörös alakzatból fehérre történő színváltással kiváltott utókép időtartamot vizsgálta [Kline, Nestor, 1977] az életkor, a tesztalanyok neme és az elsődleges inger (fixált alakzat) időtartama függvényében. Összhangban az idegimpulzusok agykérgi feldolgozásának idős korra jellemző meghosszabbodott folyamataival [Stimulus Persistence Theory, Padgham és Saunders, 1975; Erber, 2020], a várható maximális utókép időtartamot a szerzők a legidősebb életkorhoz rendelték.

A vizsgálatba 36 tesztalanyt vontak be, akik a Snellen-féle tábla szerint legalább 20/30-as látásélességgel rendelkeztek. A 36 személyt (18 férfi és 18 nő) 2 korcsoportra osztották az alábbiak szerint.

- Fiatalabb csoport: 18.8 év átlagéletkor (17-23 év),
- Idősebb csoport: 62 év átlagéletkor (51-83 év).

A méréshez a bemenő színeket a következőképp állították elő:

- az elsődleges színt a gyakorló és éles vizsgálatokhoz színes vastag tervezőpapírral (Bienfang no. C-900P), a második színt fehér vastag finombevonatú kartonnal biztosították. Az elsődleges fényinger egy kis színes tervezőpapír darabból állt egy 17x20 cm-es kiegészítő színű háttér közepén.

- a középső folt egy 2,5 cm oldalhosszúságú négyzet volt, amely a tesztalany szemétől 22 col távolságra helyezkedett el, így 2.5° alatt látszott, a retina éleslátás területén. A gyakorló fázisban vörös négyzet szerepelt zöld háttérben. Az éles mérésekben zöld négyzet szerepelt vörös háttérben. Az elsődleges fényinger kontrasztjának növelése és a vörös-zöld színtévesztő tesztalanyok kiszűrése érdekében kiegészítő elsődleges és háttérszint választottak. A másodlagos fényinger egy 17 cm magas és 20 cm széles fehér lap volt, amelyet közvetlenül az elsődleges fényinger mögé tettek. Egy kicsi (3 mm-es) fekete kereszt jelölte a fixálási pontot mind az elsődleges, mind a másodlagos fényingernél.
- a megvilágítás az elsődleges fényingernél és a komplementer színű háttereknél 35 millilambert (111.4 cd/m^2), míg a fehér másodlagos fényinger 67 millilambert (213.2 cd/m^2), és a környezeti megvilágítás közelítőleg 60 millilambert (190.9 cd/m^2) volt. Stopperórával mérték az elsődleges fényinger időtartamát, és a tesztalany által jelzett utókép időtartamokat.

A tesztalanyok az alábbi feladatokat kapták.

- A tesztalanyokat először verbálisan megismertették a feladat követelményeivel.
- Gyakorló fázis: 30 mp-ig tartó vörös színű elsődleges fényinger zöld háttérben.
- Mérés előtt az elsődleges fényingert fehér lappal letakarták, amit a mérés kezdetekor gyorsan elemelt a kísérletvezető.
- A tesztalany 30 másodpercig figyelte az elsődleges fényingerben a középső keresztet (fixálás).
- Ezt követően az elsődleges fényinger lapot a kísérletvezető gyorsan eltávolította, így a másodlagos fényinger láthatóvá vált.
- A tesztalany a másodlagos fényingert rendszeresen pislogva nézte. Szóban jelezte, amint az utókép megszűnt, és három gyors, egymást követő pislogás után sem állt vissza.
- Az utókép időtartam az elsődleges fényinger lap eltávolításától az utókép megszűnés időpontjáig terjedő időtartam.
- A vizsgálatok során minden tesztalany három mérésen vett részt 30 s, 60 s, és 90 s megvilágítási időtartamokkal, több perc pihenőidővel minden egyes mérés között. E *megvilágítási időtartam sorrendet* oly módon randomizálták, hogy a nemenként 18

tesztalany közül három véletlenszerűen kiválasztott tesztalany jusson az időtartam sorrend minden egyes permutációjára.

- A megfelelő észlelést úgy ellenőrizték, hogy a tesztalany leírta az észlelt utókép méretét és színét (zöld vörössel körülvéve).

A méréssorozat kísérleti terve a *Kor* × *Nem* × *Megvilágítás időtartam sorrend* × *Megvilágítás időtartam* ($2 \times 2 \times 6 \times 3$) faktorokat tartalmazta, a mérések részleges ismétlésével. A mérési eredmények varianciaanalízise alapján a következő eredményeket kapták:

- Az utókép tartóssága közvetlen függvénye az elsődleges fényinger időtartamnak $p < 0.001$ szignifikanciával.
- Az utókép tartósságában a kor hatása szignifikáns volt, az utókép időtartam a korral nőtt mind a három megvilágítási időtartamnál $p < 0.05$ szignifikanciával.
- Jelentős kölcsönhatás volt a *Megvilágítás időtartam* és a *Megvilágítás időtartam sorrend* faktorok között is ($p < 0.01$). Bár ez a kölcsönhatás nem volt szisztematikus, a rövidebb megvilágítási időtartamok általában kevésbé tartós utóképeket adtak, azonban a hosszabb megvilágítási időtartamok tartósabb utóképeket. Időtartamban a legrövidebb utókép 30 másodperc megvilágításnál volt tapasztalható (33.6 s), ha az az első mérés volt. 60 másodperc megvilágításnál a legrövidebb utókép akkor volt tapasztalható (42,3 s), ha az a második mérés volt. 90 másodperc megvilágításnál a legrövidebb utókép akkor volt tapasztalható (45,6 s), ha az a harmadik mérés volt. A leghosszabb utókép 30 másodperc megvilágításnál volt tapasztalható (47.7 s), ha az az utolsó mérés volt. 60 másodperc megvilágításnál a leghosszabb utókép akkor volt tapasztalható (67.8 s), ha az az első mérés volt. 90 másodperc megvilágításnál a leghosszabb utókép akkor volt tapasztalható (67,7 s), ha az a második mérés volt.
- A kölcsönhatás a kor, megvilágítás időtartam és a nem között szignifikancia-közeli volt ($0.05 < p < 0.10$). A nők általában hosszabb utókép időtartamot mutattak, mint a férfiak (rendre 52.5 s, 48.8 s), különösen a fiatal korcsoportban (50.4 s vs. 43.4 s), jóllehet, az eltérés nem volt szignifikáns. A leghosszabb átlagos utókép időtartam a teljes mintahalmazban az idősebb nőknél jelent meg 90 másodperc megvilágításnál (61.8 s) és a legrövidebb átlagos utókép időtartam a fiatal férfiaknál jelentkezett 30 másodperc megvilágításnál (31.4 s).

Az eredményekből az alábbiakra következtettek:

- A fő kutatási hipotézis megerősítést nyert, miszerint az idősebb tesztalanyoknál a komplementer utókép időtartama hosszabb. A korrall növekvő időtartamú utókép jelenség Kline és Nestor [Kline, Nestor, 1977] esetében megvilágítási időtartamtól független, ellentétben Griew és társai [Griew et al., 1963] munkájával, akiknél csak a hosszabb megvilágítási idő adott az életkorral növekvő időtartamú utóképet. További eltérés, hogy a komplementer utókép retina eredetű jelenség, míg a látási utóhatások legalább részben „központi” (agykérgi) folyamatok függvénye.
- A *Kor × Nem × Megvilágítás időtartam sorrend × Megvilágítás időtartam faktorok* kölcsönhatásának szignifikanciájára nincs nyilvánvaló magyarázat. Habár ez műtermék is lehet, elképzelhető, hogy a nők tapasztaltabbak voltak a színek megkülönböztetésében, és ezért fehér háttérben a vöröses utóképet nagyobb fokú elhalványodásig észlelték, mint a férfiak. Elképzelhető a CFF (Critical Flicker Frequency - villódzást felváltó kritikus fúziós frekvencia) függése a nemtől, amelyről a szerzők ellentmondásos eredményre jutottak. Kline és Orme-Rogers [Kline, Orme-Rogers, 1978] egy korábbi szóösszerakási kutatásban még azt találták, hogy a fiatal nők érték el a legmagasabb pontszámot a fiatal férfiakkal, különösen az idősebb nőekkel szemben. További kutatásra van szükség a faktorok közötti kölcsönhatások mértékének kiderítéséhez.
- Habár az utókép időtartam egyedi és csoportok közötti szórása nagy volt, az eredmény mégis egyértelműen értelmezhető. Az utókép időtartam mérés jól használható idősődő alanyoknál az idegimpulzusokat feldolgozó agykérgi folyamatok lassulásának vizsgálatára [Stimulus Persistence Theory, Padgham és Saunders, 1975; Erber, 2020].

2.5. Színrendszerek, megjelenítő típusok és gamut

Munkánkban a színek kvantitatív jelölésére a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (Commission Internationale de L'Éclairage) által elfogadott CIE 1931 és CIE 1976 színmérő rendszereket alkalmaztuk [Schanda, 2007; Fekete, 2014], amelyek a színeket többdimenziós koordinátarendszerben, ún. színínger térben (chromaticity space) szemléltetik.

A CIE 1931 színmérő rendszer többféle koordinátarendszert biztosít a színábrázolásra. A CIE 1931 színmérő rendszerben a CIE RGB színrendszer a vörös (R), zöld (G) és kék (B) spektrumszíneken alapszik. Ezeknek az alapszíneknek a látható spektrum színeinek előállításához szükséges keverési arányát Wright és Guild kísérletei nyomán, 17 egészséges

színlátású referencia tesztalany segítségével határozták meg [Wright, 1928; Guild, 1931]. A három alapszínhez a CIE úgy rendeli az egységnyi fényáramokat (1. táblázat), hogy egy egységnyi vörös, egy egységnyi zöld és egy egységnyi kék keveréke 1 lumen (lm) fényáramú fehér színű fényt adjon.

1. táblázat. CIE RGB alapszín egységek hullámhossza és fényárama

Alapszín	Alapszín hullámhossza (nm)	Alapszín egységnyi fényárama	
		jelölés	érték (lm)
R	700	D_R	0,17697
G	546,1	D_G	0,81240
B	435,8	D_B	0,01063

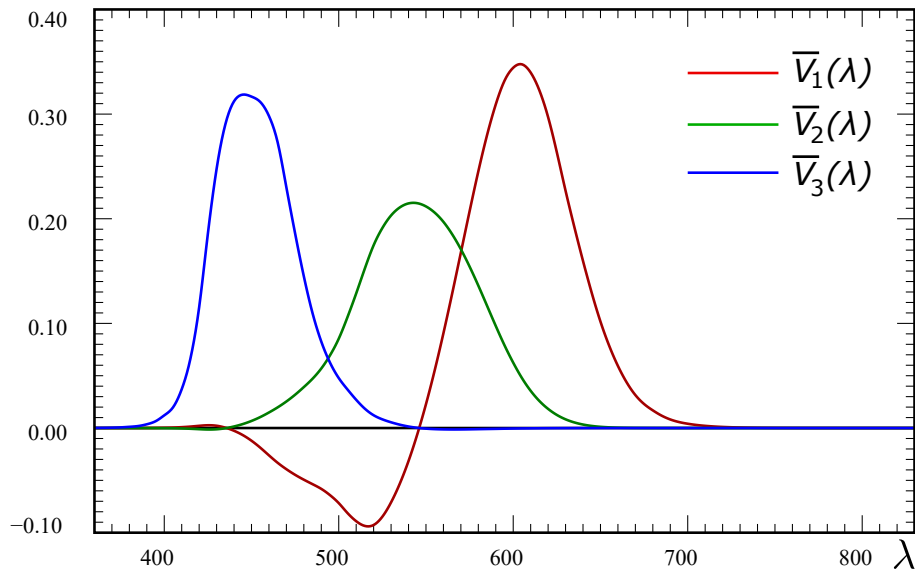
Adott szín kikeverésekor az egyes alapszínekhez rendelt r , g , b együtthatókkal a megfelelő alapszínnek egységnyi fényáramát megszorozva, a kikevert szín világosságát (L) kapjuk az (5-1) egyenletben:

$$L = D_R \cdot r + D_G \cdot g + D_B \cdot b \quad (5-1)$$

Az r , g , b együtthatók az úgynevezett trikromatikus összetevők. Mivel egyértelműen leírják az spektrumszíneket, az r , g , b értékek a CIE 1931 színrendszerben egy adott színt meghatároznak. A b értéke r és g ismeretében meghatározható az (5-2) egyenlet szerint:

$$b = 1 - r - g \quad (5-2)$$

Az r , g , b együtthatók által felvehető színinger tér az (5-2) egyenlet szerint kétdimenziósan ábrázolható az r és g koordinátákkal. A látható fény spektrumának egyes hullámhosszaihoz egyedi r , g , b értékek rendelhetők, amelyek a $\bar{V}_1(\lambda)$, $\bar{V}_2(\lambda)$ és $\bar{V}_3(\lambda)$ színinger-megfeleltető függvények halmazát képezik, és grafikusán ábrázolhatók (15. ábra).



15. ábra

Színigert megfelelő (y tengely) függvény. A $\bar{V}_1(\lambda)$, $\bar{V}_2(\lambda)$ és $\bar{V}_3(\lambda)$ rendre a CIE RGB rendszer szerinti r (vörös), b (kék) és g (zöld) alapszíneket jelöli [Horváth, 2013].

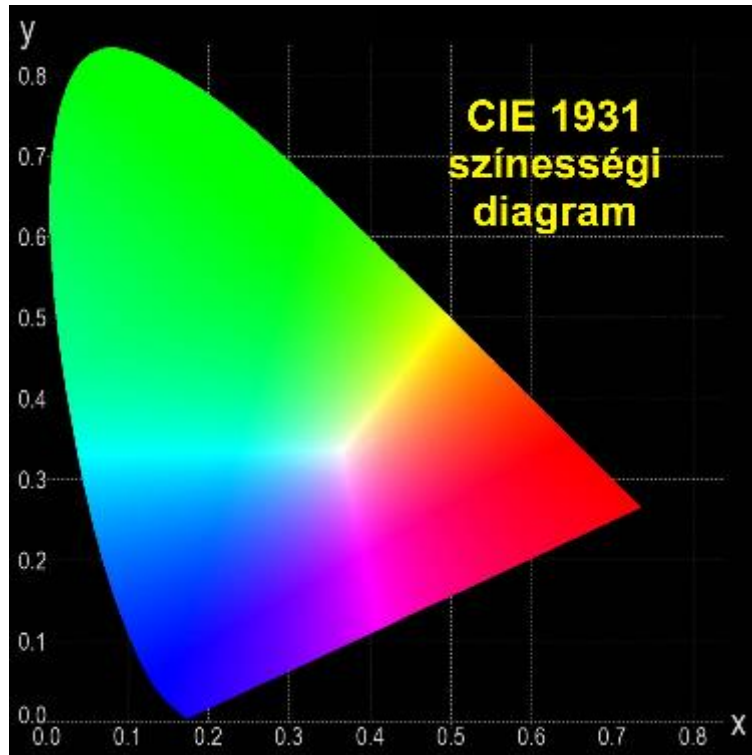
x tengely = fény hullámhossz (λ)

A CIE RGB színrendszer hátránya, hogy a trikromatikus összetevők negatív értéket is felvehetnek, amely utóbbinak nincs gyakorlati értelmezhetősége.

A CIE 1931 színmérő rendszerben a CIE RGB színrendszer továbbfejlesztése a CIE XYZ színrendszer, amely kiküszöböli a negatív előjelű értékeket és segítségével a színességi koordináták spektrális energiaeloszlás alapján is meghatározhatók. Ebben a színrendszerben az X, Y, Z színínger-összetevők (tristimulus értékek) egyszerű átszámítással vezethetők le a CIE RGB színességi koordinátákból [Schanda, 2011]. Jellemzőjük, hogy az egyenletes spektrális energiaeloszlású fehér szín X, Y, Z színínger-összetevői egymással egyenlők, és az Y színínger-összetevő adja meg a szín világosságát. A színínger-összetevők további egyszerű átváltása adja az x, y, z színességi koordinátákat. Az r, g, b koordináták mintájára az x, y, z alapkoordináták egyértelműen egy adott színt definiálnak. A z koordináta x és y ismeretében meghatározható a (6) egyenlet szerint:

$$z = 1 - x - y \quad (6)$$

Ezáltal a CIE XYZ rendszerben kétdimenziós koordinátarendszerben ábrázolható az emberi szem által érzékelhető színek halmaza, amely halmaz az ún. színpatkót alkotja (16. ábra). A színpatkót monokromatikus spektrum színek határolják [Ábrahám et al., 2014c].



16. ábra

A CIE 1931 színességi diagram [Fekete, 2014]

x tengely = CIE XYZ x koordináta

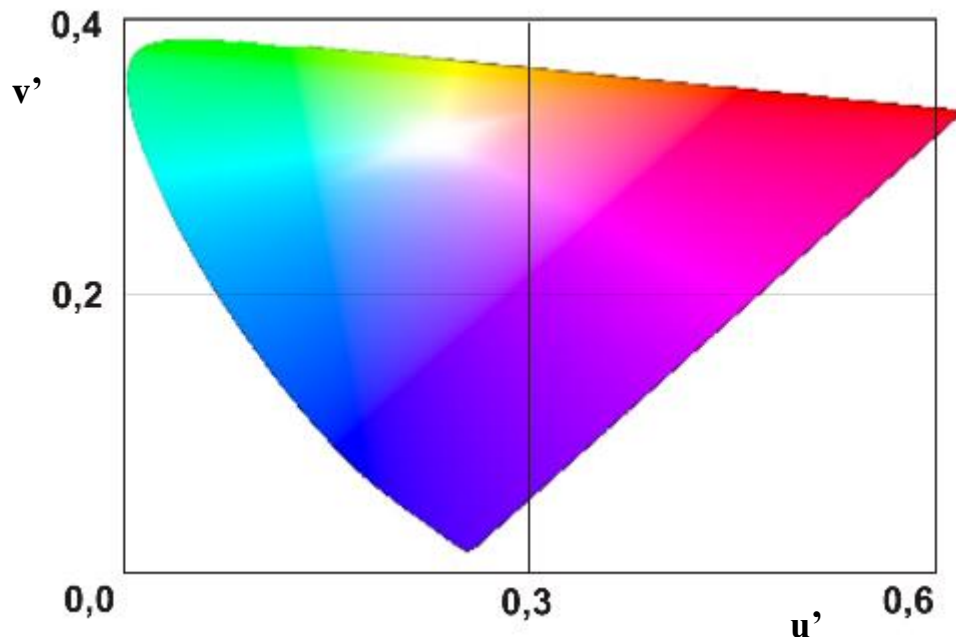
y tengely = CIE XYZ y koordináta

A CIE XYZ rendszer jól alkalmazható például megjelenítők alapszín alappontjainak ábrázolására. A színpatkóban megfigyelhető, hogy a zöld szín jóval nagyobb területet fed le a többi alapszínhez képest. Ez abból adódik, hogy a CIE XYZ nem egyenletes színíngertér, tehát, az egységnyi érzékelt színváltozások geometriai távolsága a diagramon a zöld szín esetében nagyobb, mint a vörös és a kék színek esetében.

A CIE 1931 színmérő rendszer továbbfejlesztéseként, a torzítás kiküszöböléséhez a CIE 1976 színmérő rendszeren belül ún. egyenletes színíngerterek állnak rendelkezésre. Ezek egyike a CIE $u'v'$ (17. ábra), amelynek koordináta értékei a CIE XYZ színíngertérből a (7) és a (8) összefüggések szerinti matematikai transzformációval számíthatók ki [Smith, Guild, 1932; Schanda, 2007; Horváth, 2013; Csuti, 2016].

$$u' = \frac{4x}{12y - 2x + 3} \quad (7)$$

$$v' = \frac{6y}{12y-2x+3} \quad (8)$$



17. ábra
CIE u'v' színingertér [Fekete, 2014]

A CIE XYZ-ből számítható a másik egyenletes színinger tér: a CIELAB (CIE L*a*b*), amely az ellentétes színpárok szerint írja fel a színeket. Három koordinátából áll: L*a*b*. ahol az L a szín világosságnak felel meg, az a* jelöli a pirosas-zöldes színárnyalatot, a b* a kékes-sárgás színárnyalatot.

A munkámban alkalmazott CIE színrendszerek közvetett mérési módszerek alkalmazásával kidolgozott színkeverési arányokon alapulnak. Az ezen színrendszerek alapját képező CIE 1931 RGB színrendszer létrehozásakor ugyanis közvetlen mérési módszere (fotopigmentek érzékenységi spektrumának megállapítása) nem volt még lehetőség. A keverési arányok csak közvetve tartalmazzák a fotopigmentek spektrális érzékenységét, azonban attól jelentősen eltérnek. A színrendszerek színinger-megfeleltető függvénye előbbi színkeverési arányok lineáris transzformációjából nyerhetők [Wenzel, 1991].

Közvetlen mérési módszerre, a csap fotoreceptorok színérzékenységi függvényeire épül a PDT színrendszer, amely a CIE 1976 u'v' rendszerhez képest lényegesen jobban illeszkedik az emberi színlátáshoz [Wenzel, 1991; Ábrahám et al., 2014e], ezért a PDT rendszer alkalmazása lenne célszerű a numerikus kinetikai modellemre épülő szimulációban a virtuális színérzet

grafikus ábrázolásához és számszerű értékeléséhez. A PDT rendszer további jellemzője a rendellenes színlátáshoz (szintévesztés; színvakág) történő adaptálhatóság. A PDT színrendszer hátránya azonban, hogy ellentétben a CIE színrendszerekkel, kevésbé ismert. Tekintve, hogy munkámban fontos tényező volt széles körben ismert színrendszerek alkalmazása, továbbá egészséges színlátást feltételeztem, a széles körben ismert és alkalmazott CIE színrendszerek alkalmazása mellett döntöttem.

2.5.1. A színes megjelenítőkről általában

A kutatásom részét képező szimulációkban és mérésekben a 2. táblázat szerinti megjelenítők a színinger források. Az első folyadékkristályos (LCD) monitorok az 1990-es évek végén kezdtek elterjedni: a kijelző panel gázkisüléses háttérvilágítással rendelkezett, amely legtöbbször a hidegkatódos fluoreszcens háttérvilágítás (CCFL) technológiára épült. Az LCD (liquid crystal display) panel LCD-Twisted Nematic (LCD-TN) felépítésű volt. Azaz, a folyadékkristályok az üvegsíkok között csavart irányban helyezkedtek el, ami függőleges irányban kis betekintési szöveget, azonban gyors képfrissítést biztosított, mint például az Eizo gyártó korabeli megjelenítője [Eizo Flexscan 360 specifikáció, 1998]. A CCFL (cold cathode fluorescent light) háttérvilágítás általános alkalmazását 2010 körül lassan kezdte felváltani a fehér LED (White LED, white light emitting diode, rövidítve: WLED) háttérvilágítás az olcsóbb előállítás, a kisebb sérülékenység és energiatakarékosabb üzem miatt [Herceg, 2017].

Az In-Plane-Switching (IPS) technológiájú LCD panel az LCD-TN panelnél jóval gazdagabb színgazdagságot biztosít annak köszönhetően, hogy a folyadékkristály molekulák az üvegsíkokra merőlegesen helyezkednek el [Bódis, 2017].

A Vertical Alignment-panelek (LCD-VA) a Fujitsu fejlesztése: céljuk volt, hogy az IPS-kijelzőknél kedvezőbb árú, de az LCD-TN-nél jobb minőségű megjelenítőt tudjanak kínálni. Az LCD panelek között ennek a legkedvezőbb a kontrasztaránya (3000:1) [Bódis, 2017].

Az RGB LED technológia az LCD panel háttérvilágítását fehér LED helyett vörös-kék-zöld LED színhármasából álló szegmensekkel biztosítja, ezáltal az IPS panelnél még gazdagabb színvilágot tesz lehetővé.

OLED (organic light emitting diode) esetében a folyadékkristályos panel nem szükséges a megjelenítőhöz, az egyes képpontok vörös-kék-zöld LED hármassokból állnak, amelyek színei az egyes LED fényerők kívánt pixelszint beállításával érhetőek el. Az IPS panelnél nagyobb színgazdagságon kívül ennek a panelnek előnye a nagy kontrasztarány, ugyanis az LCD panelektől eltérően itt a fekete pixeleknél nem jelentkezik háttérfény átszűrődés. Mivel az

OLED technológia nagy méretekben alkalmazva (pl. TV készülék) meglehetősen drága, ezért jelenleg kisebb méretű képernyőknél gyakori az alkalmazása (mobiltelefon kijelzője: pl. Samsung Galaxy A41, digitális fényképezőgép elektronikus keresője: pl. Olympus M10 MKIII). Munkámban ezt a megjelenítő típust így nem volt lehetőségem alkalmazni.

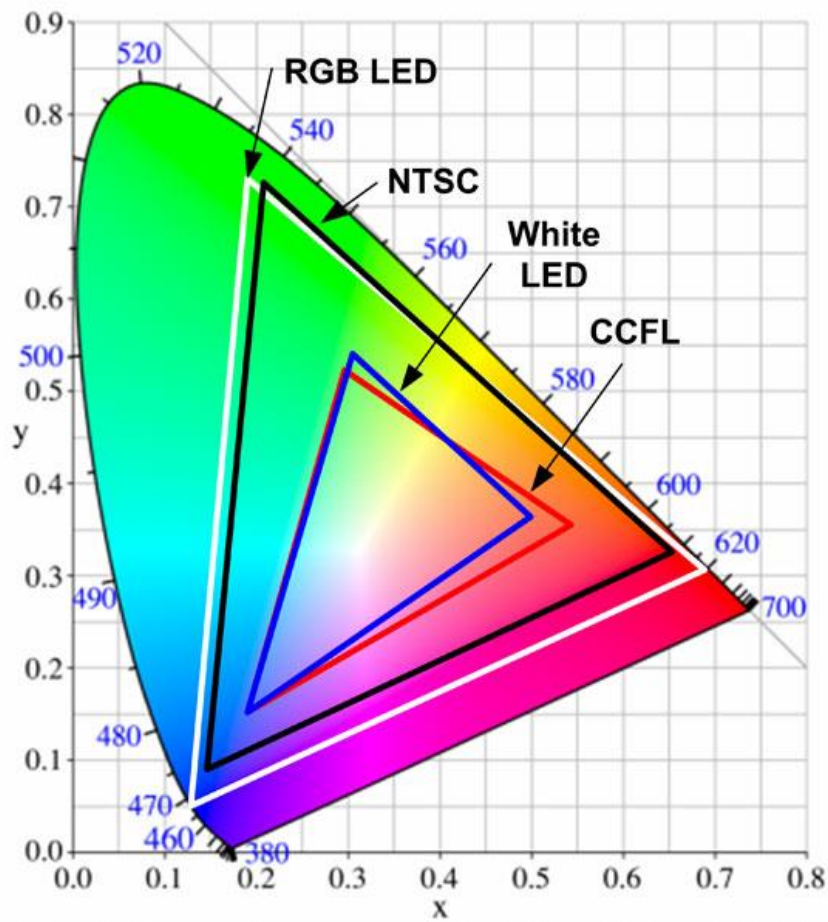
2. táblázat. Megjelenítőtípusok a háttérvilágítás és az LCD panel fajtája szerint

Megjelenítőcsalád	háttérvilágítás	LCD panel	Szingazdagság	Elérhető frissítési frekvencia	Betekintési szögterület
LCD	CCFL*, WLED	LCD-TN	közepes	240 Hz	Kicsi (kb. 30°)
	WLED	LCD-VA	közepes	75 Hz	Nagy (175°)
		IPS	élénk	144 Hz	Nagy (160°)
LED	RGB LED	-	kiemelkedő		Nagy (175°)
OLED			kiemelkedő		Nagy (175°)

* 2000 és 2010 közötti megjelenítők: hidegkatódos fluoreszcens (CCFL), újabban: fehér LED (WLED)

2.5.2. A színes megjelenítők gamutja

Egy eszköz gamutja mindazon színek halmaza, amelyeket meg tud jeleníteni. RGB (vörös, zöld, kék alapszínnel működő) eszközök esetében, kétdimenziós színességi koordináta-rendszerben ábrázolva ez háromszög alakú területet jelent. Minden megjelenítő típus jellemezhető a saját gamuttal. Például, az újabb IPS megjelenítők szélesebb gamuttal jellemezhetők a 10 évvel ezelőtt elterjedten használt CCFL megjelenítőkhöz képest. A 18. ábra szemlélteti az egyes megjelenítő típusokra jellemző gamutokat, továbbá az NTSC televíziós szabványnak megfelelő gamutot.



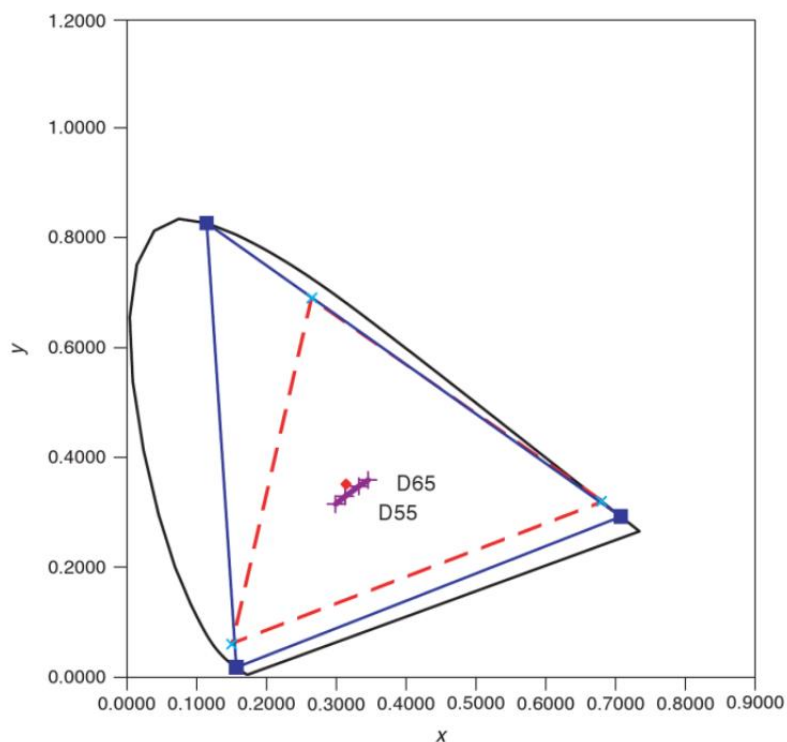
18. ábra

Megjelenítő típusokra jellemző gamutok az NTSC televíziós szabványhoz (fekete háromszög) viszonyítva [Guenther, Steel, 2018].

x tengely = CIE XYZ x színességi koordináta

y tengely = CIE XYZ y színességi koordináta

Fontos megemlíteni a háromszínű (vörös-kék-zöld) lézeres megjelenítőtechnológiát [Kennel, 2006]. A technológia vetítívásznas vetítésre alkalmazható. Mivel az elterjedten használt xenon háttérvilágítású vetítőnél jóval kedvezőbb gamuttal rendelkezik, ezért a szebb színmegjelenítéshez kiváló alternatívát ad (19. ábra). Mégsem terjedt el a magas ár, valamint a vetítívászon minőségi követelménye miatt, ugyanis a vászon egyenetlenségein a lézersugár koherenciájából adódóan létrejövő fényszóródás zavarossá teheti a képet.



19. ábra

Lézeres megjelenítő gamutja (kék háromszög), xenon háttérvilágítású digitális mozi projektor referenciával összevetve (piros szaggatott vonal). D55 és D65 a CIE D55 és CIE D65 referencia világítóeszköznek megfelelő fehér referenciapontokat jelöli [Kennel, 2006].

x tengely = CIE XYZ x koordináta

y tengely = CIE XYZ y koordináta

A munkámban részletezett virtuális színérzet (utókép) szimulációhoz kidolgozott numerikus kinetikai modellhez a 18. ábra és a 19. ábra szerinti irodalmi gamutokat alkalmaztam RGB LED és a lézeres megjelenítők esetében. A munkámban alkalmazott további megjelenítő típus gamutját Témavezetőmmel együtt (CCFL háttérvilágítású LCD-TN és egy IPS monitor gamut karakterisztika), ill. önálló mérésekkel (WLED háttérvilágítású LCD-TN megjelenítő gamut, valamint egy másik IPS megjelenítő gamut) határoztam meg.

2.6. Utókép, virtuális színérzet

Miként a 2.1. fejezetben említettem, az utókép olyan vizuális jelenség, olyan látszólagos kép, virtuális színérzet, amely fotoreceptor adaptációval és szinkölcsonhatás eredményeként jelentkezik az érintett fotoreceptorok fényérzékenysége és adaptív természete függvényében.

Adott megjelenítőn színátmenettel kiváltott utókép, virtuális színérzet a megjelenítőre jellemző gamuton belül és kívül is jelentkezhetsz. Gamuton belül megjelenő utókép olyan színátmenet eredménye, amelyben a színátmenetet követő szín koordinátái a gamut háromszög által meghatározott referencia pont (fehér pont) koordinátákhöz közelítenek. Gamuton kívül megjelenő utókép olyan színátmenet eredménye, amelyben a színátmenetet követő szín koordinátái a gamut háromszög élén helyezkednek el. E gamuton kívüli és dinamikusan megjelenő virtuális színérzetekre nincs egységes elfogadott elnevezés. Szakirodalmi forrásokban rendszerint "out-of-gamut color" [gamuton kívüli szín - Katoh, Ito, 2000], "imaginary color" [képzetes szín – Lukács B. 1988], vagy "virtual color" [virtuális szín - Smith M., 1987] megnevezések szerepelnek. A továbbiakban, munkámban a "virtuális színérzet", azaz utókép kifejezést használom.

Munkámban a gamuton kívüli virtuális színérzettel foglalkoztam, amelynek általunk meghatározott két típusa a relatív virtuális színérzet és a valódi virtuális színérzet. A relatív virtuális színérzet a CIE 1976 u'v' színességi koordináta-rendszerben a gamuton kívül, azonban a színpatkón belül felírható virtuális színérzetet jelöli. A valódi virtuális színérzet a színpatkón kívül (és értelemszerűen gamuton kívül) felírható virtuális színérzetet jelöli. Vizsgálataimban többek között arra kerestem választ, hogy mely megjelenítő típusokon tapasztalható hirtelen színátmenettel kiváltott relatív és valódi virtuális színérzet.

A virtuális színérzet élettani alapja a 2.3. fejezetben részletezett L, M és S csapreceptorok adott fényingerre adott kombinált válasza. A folyamatban a fotopszin fotopigment relatív koncentrációjának egyensúlya a fény hatására történő gyors hasadás és a sötétben történő lassú szintézis egymással ellentétes folyamatainak eredményeként valósul meg. A csapok pillanatnyi érzékenysége a relatív fotopigment koncentráció függvénye. Előbbiekből belátható, hogy a csap fotoreceptorok adaptációja időigényes folyamat, ezért a beeső fény gyors színváltozása szokatlan és intenzív időleges fényérzetet, a korábbiakban említett *virtuális színérzetet* eredményez. Például vörös fényben az L csapreceptor érzékenysége alacsony, amit az M és S csapreceptorok nagy érzékenysége kísér. Vörös beeső fény gyors váltása kék beeső fényre az S csapreceptorok átmenetileg továbbra is magas érzékenységét, ezzel együtt kezdeti ragyogó kék színérzetet eredményez, ami *egy idő után* kevésbé élénk kék színárnyalatba megy át. Ez az *egy idő után* időtartam szükséges a fotopigment relatív koncentráció-egyensúlyának kialakulásához, azaz, ez az időtartam a virtuális színérzet időtartama.

2.7. Utókép meghatározási célok

Miként a 2.1. fejezetben részleteztem, az utókép olyan vizuális jelenség (hagyományos megfogalmazásban vizuális illúzió, mai ismereteink tükrében retina és látókéreg szinten meghatározott jelenség), amikor a szem látóterében továbbra is jelen van az a kép, amely mint eredeti kép már megszűnt. A leggyakoribb utókép az, amikor pár másodpercre egy erős fényforrásba nézve, majd tekintetünket elfordítva a fényforrás alakjának megfelelő „árnyképet” látjuk úszni a szemünk előtt. Például, éjszakai vezetéskor a szembejövő autók fényszóráira nézve, majd arról a tekintetünket elfordítva, az erős fényforrások illuzórikus képét továbbra is észleljük [Mikamo, 2013]. Ez az utókép fokozatosan halványodik, majd teljesen eltűnik 10-100 másodpercen belül.

Kutatásomban első célom volt numerikus kinetikai modell kidolgozása, amellyel szimulációsan meghatározható a beeső fény hirtelen színváltása, színátmenet által kiváltott virtuális színérzet (utókép) erőssége és időtartama. E munkám a csapok érzékenységi dinamikáját leíró korábbi kinetikai modellre épül [Alpern et al., 1971; Smith et al., 1983].

Szimulációs számításaimat a saját magamon, saját magam által végzett önmérési vizsgálataimmal összehasonlítottam. Mindez numerikus kinetikai modellem alkalmazhatóságának ellenőrzésére is szolgált.

Második célom volt a virtuális színérzet (utókép) erősségének és időtartamának Témavezetőmmel közös mérési meghatározása vizsgálati tesztalanyok kora és neme függvényében. Az eredményeket statisztikai elemzéssel és klaszteranalízissel értékeltem.

A fenti célokban megfogalmazottak megvalósítását a 3. fejezetben részleteztem. Előtte a 2.8. fejezetben röviden, a teljesség igénye nélkül áttekintem a fotoreceptorok működését jellemző egyes biokémiai lépéseket és a témához kapcsolódó élelmiszeranalitikai módszerfejlesztésemet. A 2.9. fejezetben az utókép méréseinkhez kapcsolódó klaszteranalízis módszertanát részleteztem.

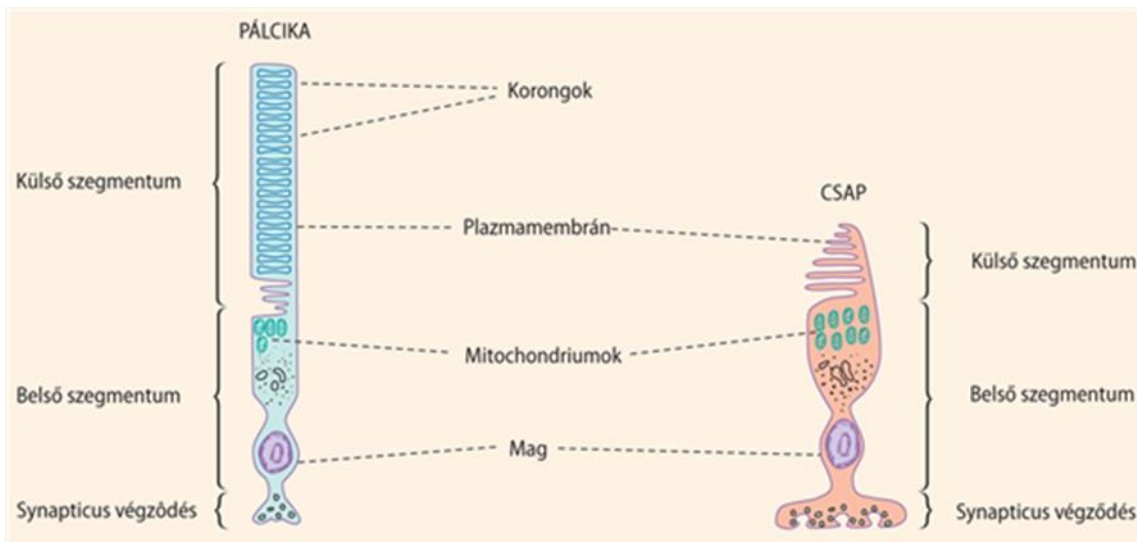
2.8. A fotoreceptorok egyes biokémiai jellemzői

A csapok és pálcikák hasonló szerkezettel jellemezhetők, úgy mint a kültag (külső szegmentum), a beltág (belső szegmentum), és a kettőt összekötő cilium (csillós szerkezet) (20. ábra). A beltág maga a sejttest, benne a sejtmag, a citoplazma az anyagcsere-folyamatokhoz

szükséges organelumokkal. A beltág felszíne a helyszíne a fotoreceptor szinapszisoknak (7. ábra).

A kültág nagy fajlagos felületét speciális membrán szerkezete biztosítja. Ez a szerkezet pálcikák esetében zárt, korongszerű membránok együttese, míg a csapok esetében harmonikaszerűen rétegződő, összefüggő membránszalagot jelent (20. ábra). A csapok és pálcikák kültágja tartalmazza a fotopigmenteket [Fonyó, Kollai, 2011].

A fotopigmentek opszinból és a hozzá kapcsolódó kromofór csoportból, cisz-retinalból épülnek fel. Az opszin fehérje membránt átlapoló hét transzmembrán szakasszal rendelkező transzmembrán fehérje (7-TM), amely a transzducin G-proteinhez kapcsolódik. A csap és pálcika fotopigmentek jellemző elnyelési hullámhossz tartományát a fotoreceptor típusra jellemző opszin fehérje szerkezete határozza meg. Azaz, az L, M, S típusú csapok és a pálcikák elnyelési hullámhossztartománya a fotopigment opszin eltérő fehérjeszerkezetéből adódik.

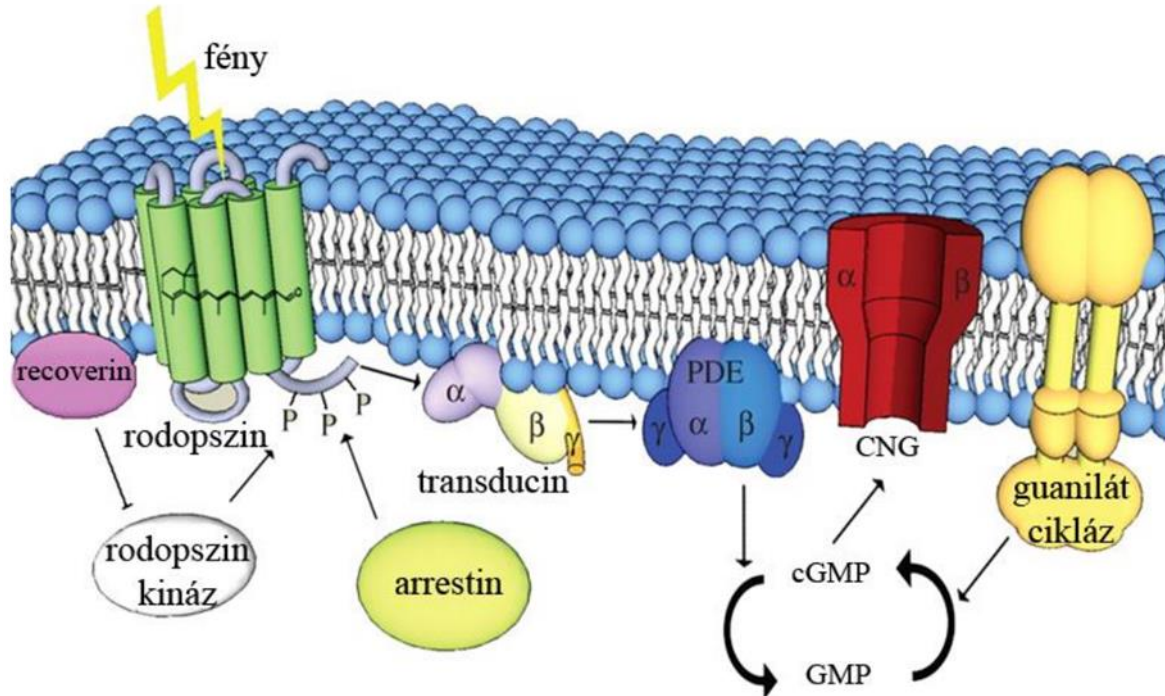


20. ábra

A fotoreceptorok felépítése (pálcikák, csapok) [Fonyó, 2011].

A fotoreceptorokban membrán jelátviteli folyamatok alakítják a beeső fényingert ingerületté [Fonyó, Kollai, 2011]. A jelátvitel a csap és a pálcika esetében hasonló, így a pálcika példájával szemléltetem (21. ábra). Ha a pálcikát fény/foton éri, a pálcika fotopigmentje, a rodopszin fotont nyel el. Az elnyelt foton hatására a rodopszin kromofór csoportja, 11-cisz-retinál transz-retinállá izomerizálódik, ezáltal a rodopszinból batorodopszin jön létre. A batorodopszin opszinja konformációváltozásokat szenved, miáltal metarodopszin II jön létre.

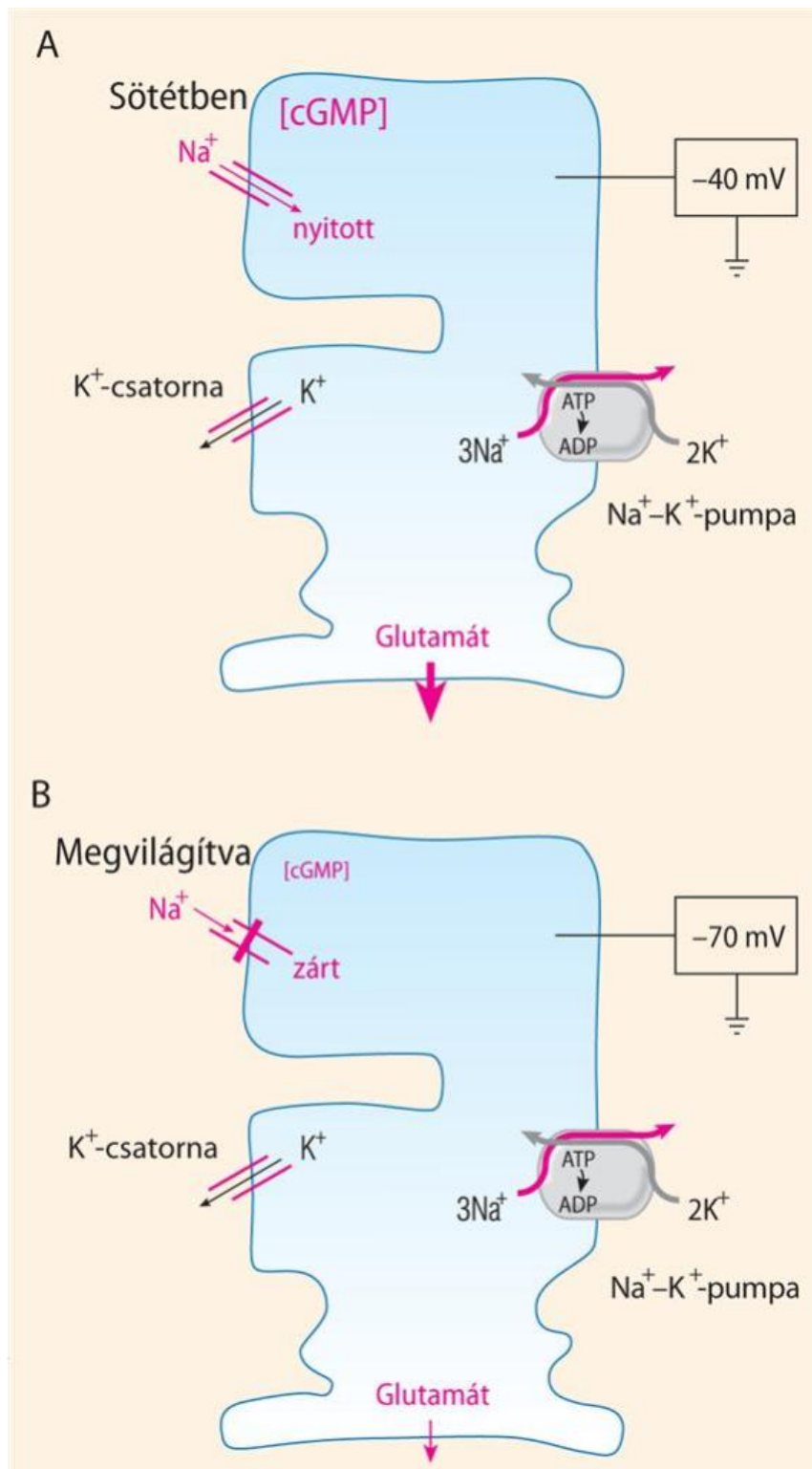
A metarodopszin II a hozzá kapcsolódó transzducin G protein α alegység ($G\alpha$) aktiválásával beindítja a ciklikus guanozin-monofoszfát-foszfodiészteráz PDE (cGMP-foszfodiészteráz - PDE) enzimet (21. ábra). Egy metarodopszin több transzducin G proteinnel is reagálhat, ezáltal a jelátviteli folyamat erősítése biztosított.



21. ábra

Fotoreceptor rodopszin és jelátvitel [Szabó, 2017]

A pálcika cGMP-szintjét a szintézis és a hidrolízis aránya határozza meg. A szintézist katalizáló guanilát-cikláz enzim igen aktív a pálcikákban, ezáltal sötétben a sejt cGMP-szintje magas. Megvilágítás hatására, cGMP-foszfodiészteráz aktiválással, a pálcika cGMP-szintje gyorsan csökken. Ennek eredményeként a kültagban a cGMP-szabályozású kationcsatornák (21. ábra CNG) záródnak, a pálcika kültag membrán hiperpolarizációját idézik elő (22. ábra B). Következésképpen, a fényinger ingerülettel alakításának utolsó lépéseként a glutamát neurotranszmitter felszabadulás visszaszorul, a keletkezett ingerület az interneuronok irányában továbbhalad. Sötétben (22. ábra A) a depolarizált membrán biztosítja a folyamatos neurotranszmitter felszabadulást. A hiperpolarizált és depolarizált membrán állapotok megalapozzák a pálcika fény- és sötét kontraszt iránti érzékenységét.



22. ábra

A cGMP-szabályozású kationcsatornák záródása a kültagban [Fonyó, Kollai, 2011]

A beeső foton által előidézett pálcika jelátviteli folyamatban a keletkezett metarodopszin II transz-retinálra és opszinra hasad. Az aktív opszin fehérje több lépcsős, gyors folyamatban

inaktiválódik a recoverin, rodopszin kináz és arrestin enzimek segítségével, miáltal csökken affinitása a transzducin fehérje iránt (21. ábra).

A fotopigment újraszintézishez, a regenerálódáshoz először a transz-retinál → cisz-retinál visszaalakulás szükséges. Transz-retinál elhagyja a pálcikasejtet, majd a szomszédos pigmenthámsejtek felveszik. A pigmenthámsejtekben először A-vitaminná (retinollá) redukálódik, majd 11-cisz-retinállá alakul. A regenerálódást követően a 11-cisz-retinál a pálcikasejtbe visszajut és ott szabad opszinhoz kötődik.

Míg a hasadás pillanatszerűen megy végbe, addig az újraszintézis lassú folyamat: tartós nappali megvilágításból sötétbe lépve a pálcikalátás mintegy negyedóra alatt áll vissza teljesen, azaz, a teljes sötétadaptációnak ez az időigénye.

A fotoreceptor adaptáció a fotoreceptor érzékenység alkalmazkodása a környezeti megvilágításhoz. Erős megvilágításnál a fotoreceptor fényérzékenység alacsonyabb, mint gyenge megvilágításnál. A fotopigment hasadásnál jóval lassúbb fotopigment újraszintézis mellett a csapok és pálcikák adaptációjában közös mechanizmus a Ca^{2+} szint és a cGMP újraszintézis közötti negatív feedback. A megvilágítással elindított jelátviteli folyamatban a fotoreceptor Ca^{2+} szint alacsonyabb, mint sötétben; ez utóbbi esetben fokozódik a cGMP újraszintézis, nő a cGMP-szabályozott kationcsatornák (CNG) cGMP érzékenysége. A csapok adaptációjában további szerepet játszik a fotopigment-fényelnyelés csökkenése intenzív megvilágítás hatására.

Az eddig leírtakból látható, hogy az A-vitamin (retinol) nélkülözhetetlen szereplője a fényingert ingerülettel alakító folyamatnak. Elmondható, hogy napi szinten elengedhetetlen a megfelelő mennyiségű A-vitamin bevitel (férfiak 700 μ g/nap, nők 600 μ g/nap; maximum 1,5 mg/nap [NHS, 2021]). Ez utóbbi élelmiszeranalitikai megközelítések korábbi feladataimmal kapcsolatosan műszeres analitikai méréseket végeztem. Méréseimmel meghatároztam egyes élelmiszerek A-vitamin tartalmát, végül továbbfejlesztettem az A-vitamin meghatározás szabvány szerinti analitikai módszerét.

Az A-vitamin tartalom meghatározásához vizsgálati mintának hétköznapi margarint választottam. A szabvány szerinti analitikai módszer fejlesztését a margarinban szintén megtalálható, antioxidáns tulajdonsággal rendelkező, membránstabilizáló E-vitamin tartalom meghatározására is kiterjesztettem.

Zsíroldékony vitaminok meghatározásában az elszappanosítást igénylő szabványok (MSZ-EN 12822, MSZ-EN 12823) a legfontosabb mintaelőkészítési paraméterekre (hőmérséklet, idő, antioxidáns fajtája) széles intervallumokat adnak meg. Egyedül a lúg koncentrációt és az

alkohol (metanol vagy etanol) mennyiséget határozzák meg pontosan a bemért mintatömeg függvényében. Tekintettel a rendelkezésemre álló időkeretre, a széles intervallumba helyezett paraméterek közül a hőmérsékletet és az elszappanosítási időt optimalizáltam az [S8, S9] publikációimban megfogalmazottak szerint. A vizsgálati mintákat az 3. táblázat szemlélteti.

3. táblázat
Vizsgálati minták élelmiszeranalitikai optimumkereséshez

Minta	Kiszerezés	Várható vitamintartalom
Margarin	Delma Joghurt margarin, 250 g 20% zsírtartalom (sötétben, hűtve tárolva)	A-vitamin: 0,8 mg/100g E-vitamin: 18 mg/100 g

2.8.1. Margarin mátrix elszappanosításos előkészítésének hőmérséklet és idő függése az A- és E-vitamin visszanyerés optimumkeresésében

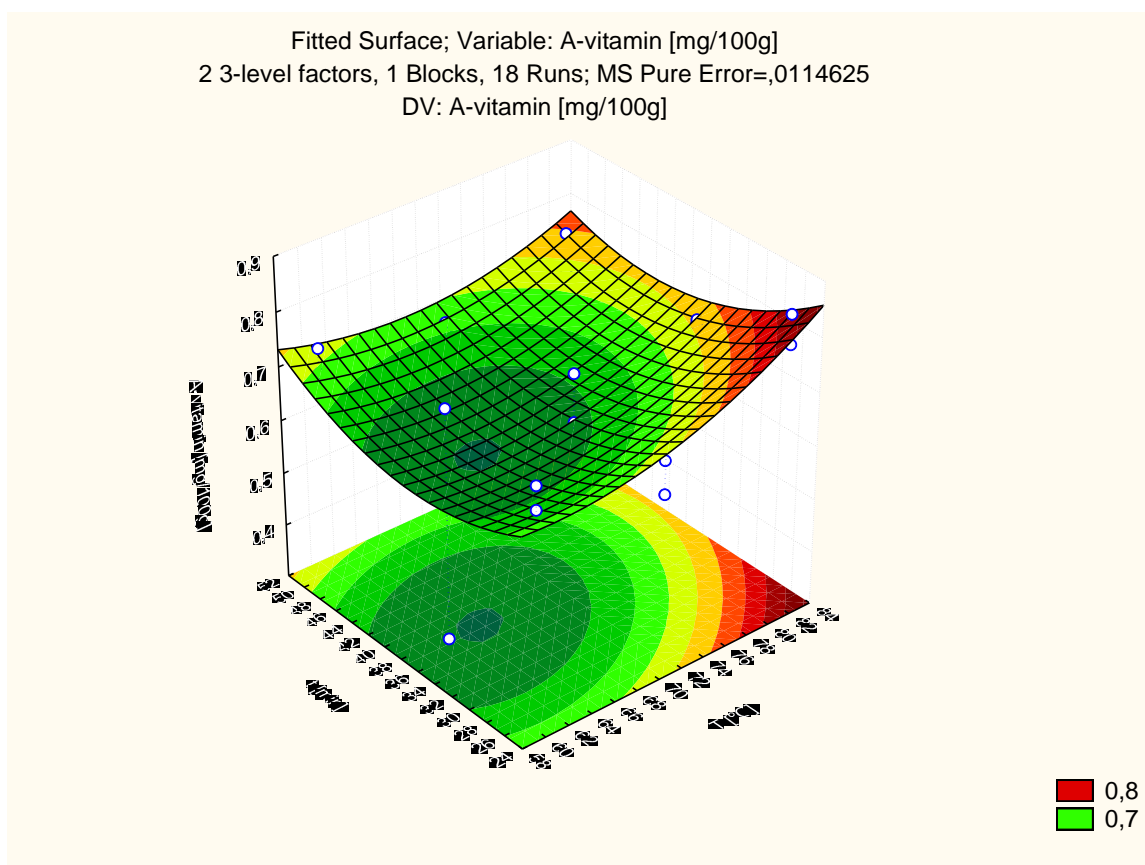
- Az optimumkeresés 1. szakaszában kétfaktoros, másodfokú kísérleti tervvel megkerestem az elszappanosítási paraméterek (hőmérséklet, elszappanosítási idő) legnagyobb A- és E-vitamin visszanyerést adó optimumát rögzített antioxidáns tartalom (aszcorbinsav) és lúgkoncentráció mellett. Az eredmények grafikus értelmezése során bebizonyosodott, hogy a visszanyerési optimum a legmagasabb hőmérséklet (forráspont) mellett érhető el az elszappanosítási idő csökkentésével. E csökkentés alsó határa a minta elszappanosodása (zsírcseppek eltűnése).
- Az optimumkeresés 2. szakaszában forrásponti hőmérsékleten kerestem tovább az elszappanosítási idő optimumot az elszappanosítási idő csökkentésével.

Margarin méréshez mérési pontonként két párhuzamos mintát készítettem elő a következőképpen [S8]:

- Delma margarinból bemértem 3-5 g-ot 250 ml-es gömblombikba
- 400 mg aszcorbinsavat adtam a mintához (főzőpohárba bemérve)
- hozzáadtam 15 ml 50 %-os KOH-t, amivel bemosom az aszcorbinsavat
- az adott hőmérsékleti ponton megfelelő elszappanosítási idő mellett visszafolyó hűtő alatt szappanosítottam

- 50 ml EtOH-lal kiöblítettem a mintát egy 250 ml-es rázóüvegbe
- hozzáadtam 120 ml vizet az emulzió megszüntetéséhez, majd 3×50 ml hexánnal extraháltam
- háromszor mostam az egyesített hexános fázist
- Rotadesten bepároltam, a rendelkezésre álló gömblombik mérete miatt több részletben
- a bepárolt mintát 10 ml-ben vettem fel (egy mintánál 15 ml-ben, de ezt jeleztem)
- a vizes fázist a maradék aszkorbinsav meghatározásához megőriztem
- az előkészített minták folyadékkromatográfiás méréséhez A-, D-, E-vitamin standard keverék hígítási sorát elkészítettem.

Az optimumkeresés 1. szakaszában kapott mérési eredményeim alapján a margarin mért A-vitamin tartalmának hőmérséklet és időtartam függését másodfokú modellillesztéssel ábrázoltam a 23. ábra térbeli diagramján.



23. ábra

Margarin mért A-vitamin tartalom az elszappanosítási idő és hőmérséklet függvényében, másodfokú felület illesztéssel.

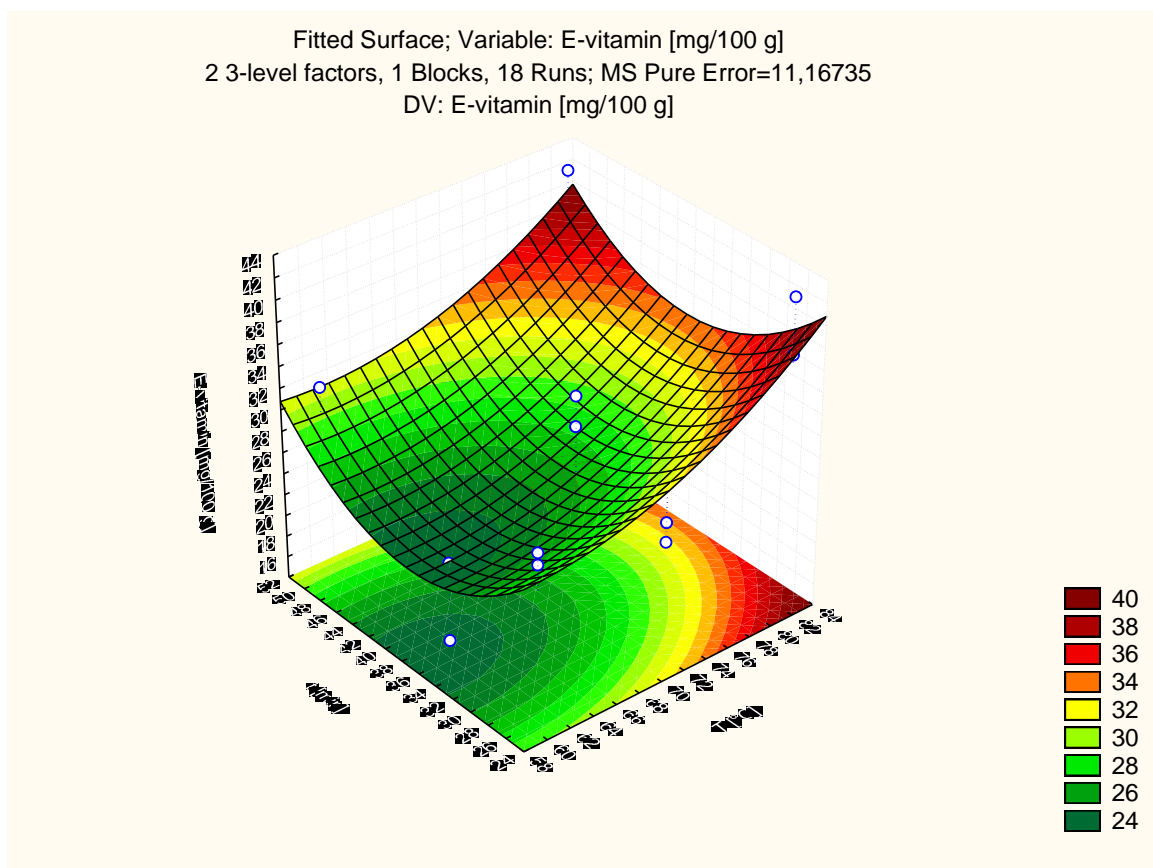
x tengely: elszappanosítási idő (t, min)

y tengely: elszappanosítási hőmérséklet (T, °C)

z tengely: a mért A-vitamin tartalom (mg / 100 g)

A 23. ábra szerint a 82 °C/25 min mérési pontnál (jobbra fent a vörös sarok) található a legmagasabb mért A-vitamin tartalom. Meglepő módon a mért A-vitamin tartalom kis mértékben növekszik a 82 °C/50 min irányban is, az A-vitamin kifejezett hőérzékenysége ellenére.

Az optimumkeresés 1. szakaszában kapott mérési eredményeim alapján a margarin mért E-vitamin tartalmának hőmérséklet és időtartam függését másodfokú modellillesztéssel ábrázoltam a 24. ábra térbeli diagramján.



24. ábra

Margarin mért E-vitamin tartalom az elszappanosítási idő és hőmérséklet függvényében másodfokú felület illesztésével.

x tengely: elszappanosítási idő (t, min)

y tengely: elszappanosítási hőmérséklet (T, °C)

z tengely: a mért E-vitamin tartalom (mg / 100 g)

A 24. ábra szerint a mért E-vitamin tartalom két optimumhelyét a 82 °C/25 min és 82 °C/50 min mérési pontok (bal felső és jobb felső vörös sarok) jelentik. Az optimumhelyek közötti

döntés egyértelműen meghozható a rövidebb elszappanosítás, ezáltal a gyorsabb mintaelőkészítés javára.

A 23. ábra és 24. ábra értékelése alapján a margarin elszappanosítás hőmérsékleti optimuma a forráspont, amely szabályozás-technikai előnyökkel jár.

Az optimumkeresés 2. szakaszában azt az elszappanosítási időt kerestem meg, ahol a reakció biztonsággal végbemegy. A 4. táblázat összefoglalja az optimumkeresés 1. és 2. szakaszában mért margarin A- és E-vitamin tartalmakat (4. és 5. oszlop) és a margarin valódi A- és E-vitamin tartalmához viszonyított százalékos visszanyeréseket, amelyeket standard addíciós módszerrel határoztam meg (8. és 9. oszlop).

4. táblázat
Margarin A- és E-vitamin elszappanosításos meghatározására kapott eredmények
összesítése (n = párhuzamos minták száma)

T [°C]	t [min]	n	Mért A-vitamin átlag [mg/100g]	Mért E- vitamin átlag [mg/100g]	A-vitamin szórás	E- vitamin szórás	A-vitamin visszanyerés	E-vitamin visszanyerés
60	25	2	0,73	30,09	4,2%	2,6%	66,5%	75,4%
60	35	2	0,57	20,88	53,0%	24,8%	51,6%	52,3%
60	50	2	0,77	32,52	5,7%	2,1%	69,9%	81,5%
71	25	2	0,66	27,62	6,6%	4,6%	59,9%	69,2%
71	35	2	0,70	33,47	9,1%	5,9%	63,5%	83,9%
71	50	2	0,68	28,65	1,6%	0,8%	61,9%	71,8%
82	15	2	0,94	29,39	6,7%	8,1%	85,5%	73,6%
82	18	5	0,97	30,16	3,4%	1,6%	88,7%	75,6%
82	25	3	0,86	37,54	9,0%	18,6%	78,9%	94,1%
82	35	2	0,74	29,73	0,7%	0,6%	67,3%	74,5%
82	50	2	0,72	38,90	7,3%	17,2%	65,8%	97,5%

Az optimumkeresés 2. szakaszának eredményeit a 4. táblázat 7-8. sora mutatja (82 °C/15 min és 82 °C/18 min). A-vitamin esetében az elszappanosítási idő optimum ott van, ahol az elszappanosítás már teljesen végbemegy. A t=15 min esetében – az étolajjal tapasztaltaktól eltérően – a két párhuzamos közül egy mintában maradtak apró zsírcseppek a margarin 20 %-os zsírtartalma ellenére, aminek magyarázata a minta étolajjánál jóval magasabb víztartalma. A t=15 min mérési pontnak az eredményei nem megbízhatók.

E-vitamin esetében $t=25$ min adja a legjobb visszanyerést, azonban az E-vitamin tartalom szórása magas (18%). Így E-vitamin esetében is a $t=18$ min elszappanosítási időt tekintetem optimumnak. A margarin elszappanosítási módszer optimumát a következő idő-hőmérséklet paramétereknél állapítottam meg:

$t=18$ min és $T=82$ °C.

Margarin minták A- és E-vitamin meghatározásakor a mintaelőkészítés optimális hőmérséklet és optimális időtartam paramétereit a forrásponti hőmérsékletben és az elszappanosításhoz szükséges lehető legrövidebb időtartamban állapítottam meg.

Visszatérve disszertációm fő témájához, a következőkben az utókép (virtuális színérzet) mérésorozatok eredményeinek értékelésében alkalmazott klaszteranalízis módszertanát részletezem.

2.9. Utókép mérésorozatok értékelésében alkalmazott klaszteranalízis módszertana

A klaszteranalízis (klaszterezés) olyan dimenziócsökkentő eljárás, amellyel adattömböket homogén csoportokba tudunk besorolni [Tan et al., 2006]. Másképpen fogalmazva, a klaszterezés egy halmaz csoportosítása aszerint, hogy adott csoportba (ún. klaszter) tartozó egyes elemek jobban hasonlítanak egymásra a csoporton belül, mint a csoporton kívül. Ez a módszer a felfedező adatbányászatban és a statisztikai adatelemzésben bevett gyakorlat. Alkalmazzák olyan területeken, mint a gépi tanulás, a mintafelismerés, információ lekérés, adattömörítés és számítógépes grafika. A klaszteranalízist a pszichológiában 1938-ban vezették be a különböző személyiségjegyek megkülönböztetésére [Bailey, 1994].

A klaszteranalízis elvégzéséhez számos algoritmus áll rendelkezésre. Ezek az algoritmusok jelentősen különböznek az adathalmaz csoportjainak, a klasztereknek értelmezésében, valamint megtalálásuk hatékony módjában [Dervic, 2016]. A klaszteranalízis algoritmusok a következők szerint osztályozhatók [Tan et al., 2006].

a) Klaszter hierarchia szerint:

- felosztó: nem egymásba ágyazott klaszterek. Az adathalmaz olyan, nem átfedő alcsoportokra bontását jelenti, ahol mindegyik adatobjektum pontosan egy részhalmazba kerül.
- hierarchikus: egymásba ágyazott klaszterek. Megengedett, hogy a klasztereknek alklaszterei legyenek (fa struktúra).

b) Az adatpontok és klaszter összerendelés szerint:

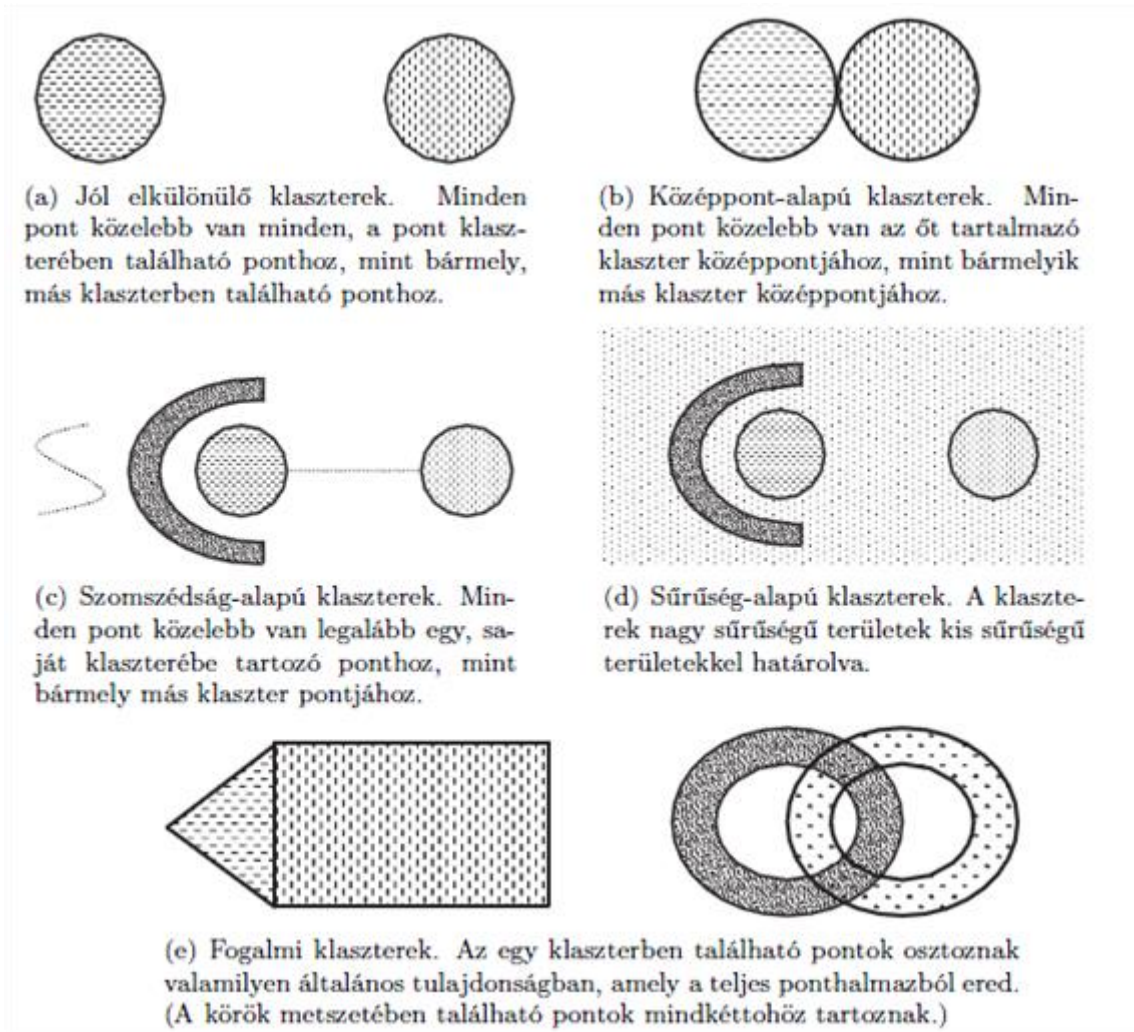
- kizáró: minden egyes adatobjektumot csak egyetlen klaszterhez rendel hozzá.
- átfedő: egy adatobjektum egyszerre egynél több csoporthoz is tartozhat. Például egy objektum egyforma távolságra helyezkedik el két vagy több klaszter között a klaszterterben.
- fuzzy klaszterezés: minden adatobjektum minden klaszterhez tartozik 0 és 1 közötti tagsági súlyozással.

c) Az adathalmaz klaszterezésbe bevont adatpontjai szerint:

- teljes klaszterezés: az adathalmaz valamennyi elemét hozzárendeli valamelyik klaszterhez.
- részleges klaszterezés: egyes elemeket nem rendel klaszterhez, mert azok nem kategorizálhatók.

A klaszterek különböző típusai az alábbiak lehetnek (25. ábra (a) – (e) grafikák) [Tan et al., 2006]:

25.(a) Jól elkülönülő klaszterek: egy klaszter olyan objektumok halmazából áll, amelyek a klaszteren belüli bármely objektumhoz közelebb vannak, mint más klaszterek objektumaihoz. Kritériuma, hogy a klaszterek kellő távolságban helyezkedjenek el egymástól (távolság küszöbérték meghatározható).



25. ábra

Klasztertípusok [Tan et al., 2006]

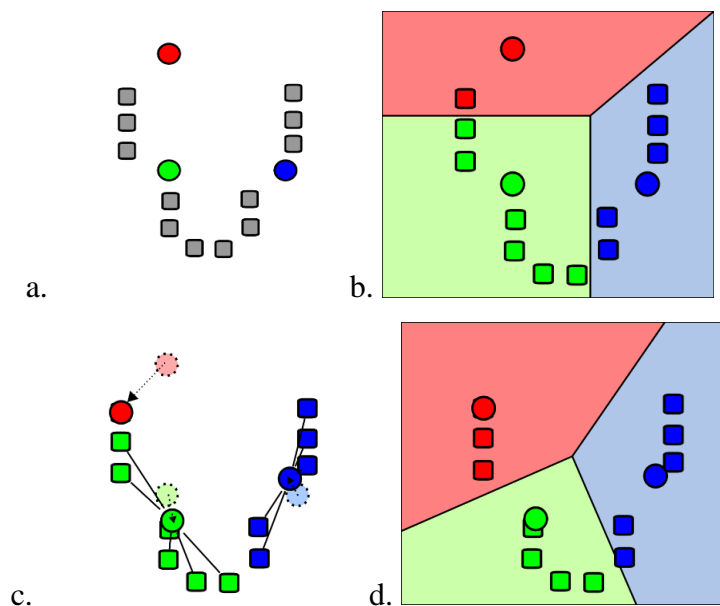
25.(b) Prototípus-alapú (középpont-alapú) klaszterek: egy klasztert azon pontok halmaza határoz meg, amelyek egy klaszter prototípushoz közelebb vannak, mint bármely más klaszter prototípusához. A prototípus rendszerint a klaszterben található összes pont átlaga, és a klaszterre centroid alapú klaszterekként hivatkozunk.

25.(c) Gráf-alapú (Szomszédosság-alapú) klaszterek: az adathalmazt gráfként ábrázolva az egyes klasztereket az adatobjektumok kapcsolódása adja meg. Gyakori a szomszédosság-alapú klaszter: két adatobjektum akkor van összekötve, ha egymástól meghatározott távolságon belül találhatóak.

25.(d) Sűrűség-alapú klaszterek: a klaszterek az adathalmazban nagy sűrűségben előforduló adatobjektumokból, míg környezetük az adathalmazban kis sűrűségben előforduló adatobjektumokból állnak [Everitt, 2011; Estivill-Castro, 2002].

25.(e) Fogalmi klaszterek: általánosságban a klaszterek, mint közös tulajdonságú elemek egy halmaza is definiálható. A 25. ábrán látható kör és téglalap, valamint az egymásba fonódó körgyűrűk mint klaszterek meghatározásához a klaszter egyedi fogalmának definiálása szükséges, hogy klaszterező algoritmussal ezek a klaszterek megtalálhatók legyenek.

Kutatásomban mérésorozatok adathalmazának klaszteranalíziséhez a hierarchia szerint felosztó, az adatpontok és klaszter összerendezés szerint kizáró, az adathalmaz klaszterezésbe bevont pontjai szerint teljes klaszterezési algoritmust, a 25.(b) ábra szerinti k-közép klaszterezést alkalmaztam [Hot, Vesna, 2016].



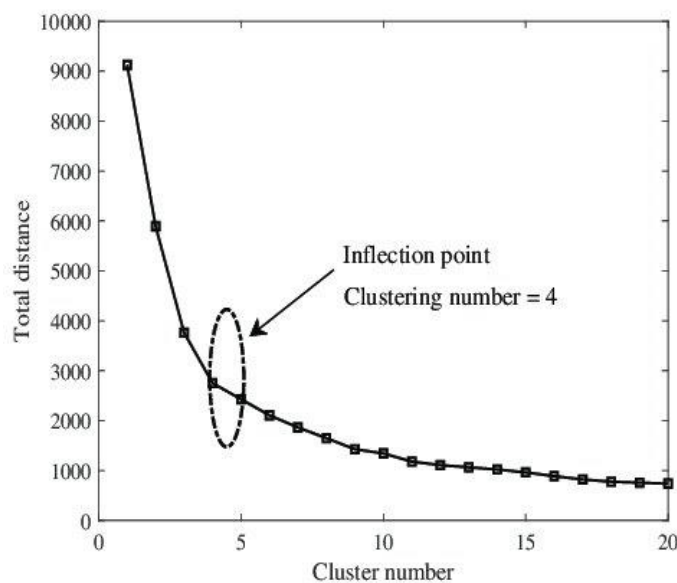
26. ábra

A k-közép klaszterezés folyamata [Anderson, 2019]

A k-közép klaszterezés bemeneti paramétere a klaszterek száma (k), amely az algoritmus többszöri futtatásával különböző k értékekkel (rendszerint $k = 1$ és $k = 10$ között) határozható meg. A 27. ábra szerinti példa a k-közép klaszterezés $k = 3$ paraméterű futtatását mutatja be. A 27.a. ábrán $k = 3$ db kezdeti klaszterközpontot (centroidot) határoz meg az algoritmus

véletlen generálással. A 27.b. ábrán a klaszterek kijelölése történik a centroidokhoz legközelebb eső átlagpontszámú adatobjektumokkal. A 27.c. ábrán a kijelölt k számú klaszterekből számított centroidok új helyre kerülnek a kiindulási centroidokhoz képest. A 27.a. és 27.c. ábra szerinti lépések addig ismétlődnek az algoritmusban, amíg a centroidok végleges helyüket elérik. A 27.d. ábra a centroidok végleges helyét, ezáltal az algoritmus által megállapított klasztereket mutatja.

Az előző bekezdésben említett k klaszterszám paraméter meghatározás az ún. „könyök” módszerrel történik. A 27. ábra szerinti klaszterezést k =1 és k=10 között megismételve, rögzítjük az egyes k értékek szerinti futtatásokkal kapott klaszteren belüli eltérések négyzetösszegét (Within-Cluster Sum of Square, WCSS, [Zhang, 2019]). Ezeket a négyzetösszegeket a k függvényében ábrázolva olyan görbét kapunk, (27. ábra), amelynek könyökszerű elhajlása megadja a klaszterek számát jelentő k értéket [Claude, 2008]. A 27. ábra szerinti példa esetében k = 4.



27. ábra

Példa "könyök" módszer a k klaszterszám megállapításához [Zhang et al., 2019].

Total distance = WCSS, Cluster number = klaszterek száma; a görbe inflexió pontjának helye k = 4 klaszterszám.

A „könyök” módszerrel meghatározott k érték ismeretében már a megfelelő k számmal végezhető a klaszteranalízis további futtatása.

A k-közép klaszterezés hátránya a kiindulási centroidok véletlenszerű kezdeti értéke. Ennek feloldása az algoritmus többszöri futtatása, majd a megfelelő futtatási eredmények kiválasztása

az eredménnyel kapcsolatban várható peremfeltételek szerint (pl. közel azonos számú adatobjektum várható valamennyi klaszterben). A klaszteranalízis futtatásakor 20 ismétlés ajánlott [Hot, Vesna, 2016; Fränti, Sieranoja, 2019], amelynek időigénye a k-közép klaszterezési algoritmus gyorsaságának köszönhetően, csekély.

Módszerek, Mérések

3. Módszerek, Mérések, Eredmények

A 2.7. fejezetben részletezett célkitűzéseim megvalósításához munkámban szimulációs számításokat és utókép méréseket végeztem.

Létrehoztam egy olyan numerikus kinetikai modellt, amelynek segítségével a hirtelen színváltással (továbbiakban színátmenettel) kiváltott virtuális színérzet (utókép) erősségét és időtartamát szimulációs számításokkal meghatároztam. Numerikus kinetikai modellem kidolgozásában egy korábbi, a 2.4.1 fejezetben részletezett csap érzékenység kinetikai modellből merítettem [Alpern et al., 1971; Smith et al., 1983].

Az utókép mérésekben a virtuális színérzet (utókép) erősségét és időtartamát önkéntes vizsgálati alanyokkal, az alábbiak szerinti lépésekben határoztam meg.

- „Színes-színes” mérésorozat: Témavezetőmmel együtt élénk színek közötti, összesen 9 színátmenetet vizsgáltunk 41 tesztalanyon.
- „Színes-szürke” mérésorozat: Témavezetőmmel együtt a „színes-színes” szakaszban kapott eredmények ellenőrzése céljából színes és szürke szín közötti színátmeneteket vizsgáltunk 16 tesztalanyon.
- Önmérések: saját magamon végzett ismétléses mérések a színátmenettel kiváltott virtuális színérzet (utókép) erősségének és időtartamának meghatározására két különböző megjelenítőtípus alkalmazásával.

Az 1. tézis a szimulációs számítások eredményeit tartalmazza.

A 2. tézis a szimulációs számításos eredmények és az önmérési eredmények összehasonlítása.

A 3-4. tézis a „színes-színes” és „színes-szürke” mérésorozatok eredményeinek következtetéseit tartalmazza.

3.1. A kutatásomban alkalmazott megjelenítők gamut-meghatározása

3.1.1. A kutatásomban alkalmazott megjelenítők

Kutatásomban a 5. táblázat szerinti megjelenítők szerepeltek:

- a virtuális színérzet szimulációhoz (3.2. fejezet) az Acer Aspire 1670 notebook megjelenítő gamutot és a HP ZR2440w 1. példány (CNT2130190, Széchenyi István Egyetem) megjelenítő gamutot vettem alapul; említett gamutokat Témavezetőmmel együtt határoztuk meg.

- az önkéntes tesztalanyokkal végzett utókép vizsgálatsorozatokban (3.3. fejezet) az előbbieken említett HP ZR2440w megjelenítő 1. példányát (CNT2130190) alkalmaztuk.
- az önmérésekben (3.4. fejezet) Dell E4200 notebook (Dell E4200, sorozatszám: CN-05HWX0-12961-03U-2100-A00) LCD-TN megjelenítőt és HP ZR2440w megjelenítő 2. példányát (sorozatszám: CN43270K9B, saját beszerzésem a kutatásomhoz) alkalmaztam.

5. táblázat

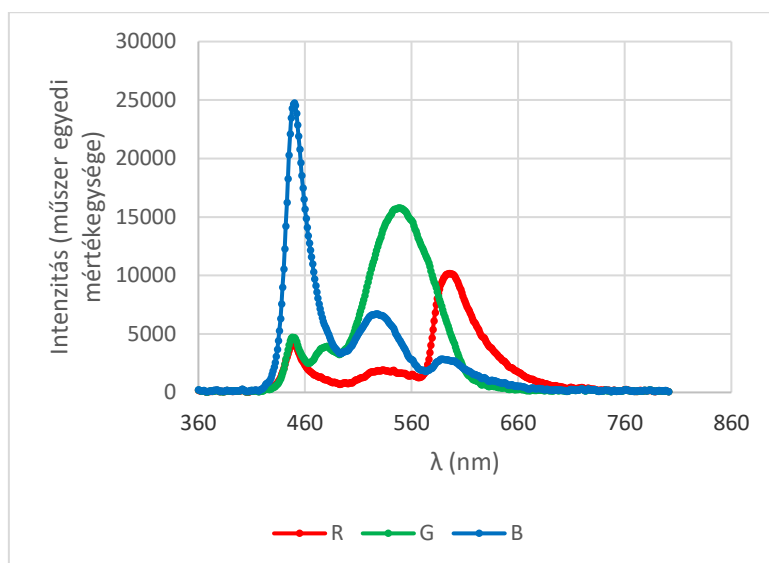
A kutatásomban felhasznált megjelenítők specifikációi [HP ZR2440w adatlap, HP ZR2440w gamut, Dell E4200, Acer Aspire 1670 adatlap]

	Dell E4200	Acer Aspire 1670	HP ZR2440w
Háttérvilágítás	WLED	CCFL	WLED
LCD panel típusa	TN	TN	IPS
Felbontás	WXGA (1280 x 800)	WXGA (1280 x 800)	WUXGA (1920 x 1200) @ 60 Hz;
Méret	12.1"	15.4"	24"
Sorozatszám	CN-05HWX0-12961-03U-2100-A00	N/A	1. példány: CNT2130190 2. példány: CN43270K9B

3.1.2. A megjelenítő gamut meghatározása

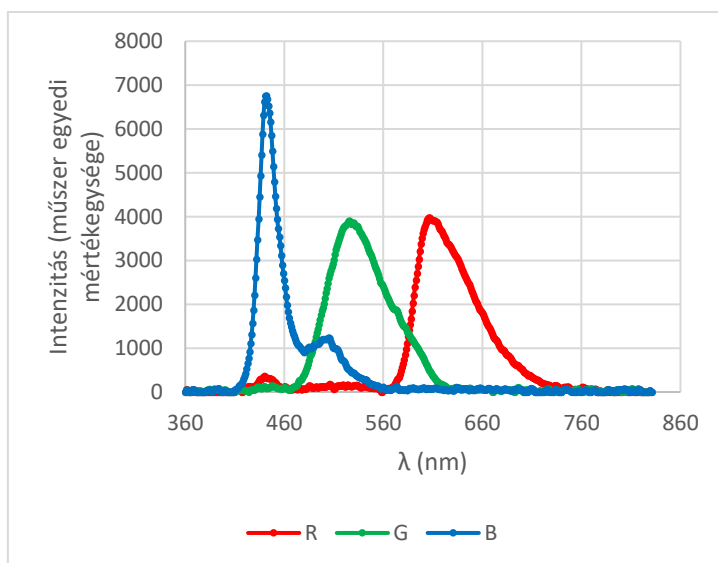
Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modellel megvalósított szimulációhoz a 18. ábra és a 19. ábra szerinti irodalmi gamutokat alkalmaztam RGB LED és lézeres megjelenítő esetében [Guenther, Steel, 2018; Kennel, 2006]. Témavezetőmmel együtt meghatároztuk az 5. táblázatban részletezett Acer Aspire 1670 megjelenítő gamutot és a HP ZR2440w 1. példány gamutot. Az önméréses utókép vizsgálatokhoz WLED háttérvilágítású LCD-TN megjelenítő gamutot, valamint egy másik IPS megjelenítő gamutot saját méréssel meghatároztam.

A CCFL és az IPS képernyők spektrális teljesítményeloszlását spektrométerrel (Ocean Optics Inc., Flame Miniature Spectrometer) határoztuk meg. A kalibrációt He, Ne, Ar és H₂ kisülési csövek erős spektrumvonalán végeztük. Az egyik képernyő egy Acer Aspire 1670 notebook CCFL megjelenítője volt, a másik egy újabb (HPZR2440w, sorozatszám: CNT2130190) monitor IPS megjelenítővel. A felvett spektrális teljesítményeloszlásokat a 28. és 29. ábra szemlélteti:



28. ábra

Acer Aspire 1670 CCFL megjelenítő spektruma (Flame miniature spectrometer)

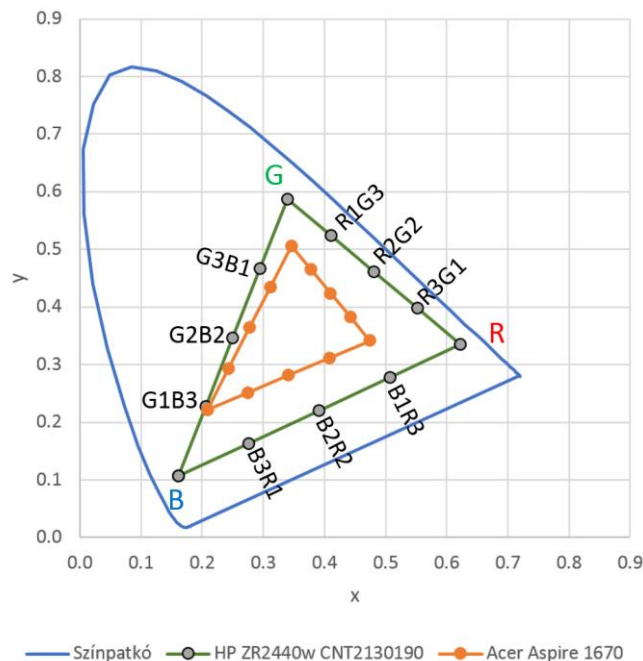


29. ábra

HPZR2440w (CNT2130190) megjelenítő spektruma (Flame Miniature Spectrometer)

Acer Aspire 1670 notebook megjelenítő esetében a vörös és zöld alapszínek spektruma jóval elnyúltabb, mint a HP ZR2440w megjelenítő esetében. Szubjektív összehasonlítás szerint az utóbbi megjelenítő színei jóval élénkebbnek hatnak az előbbiekhöz képest.

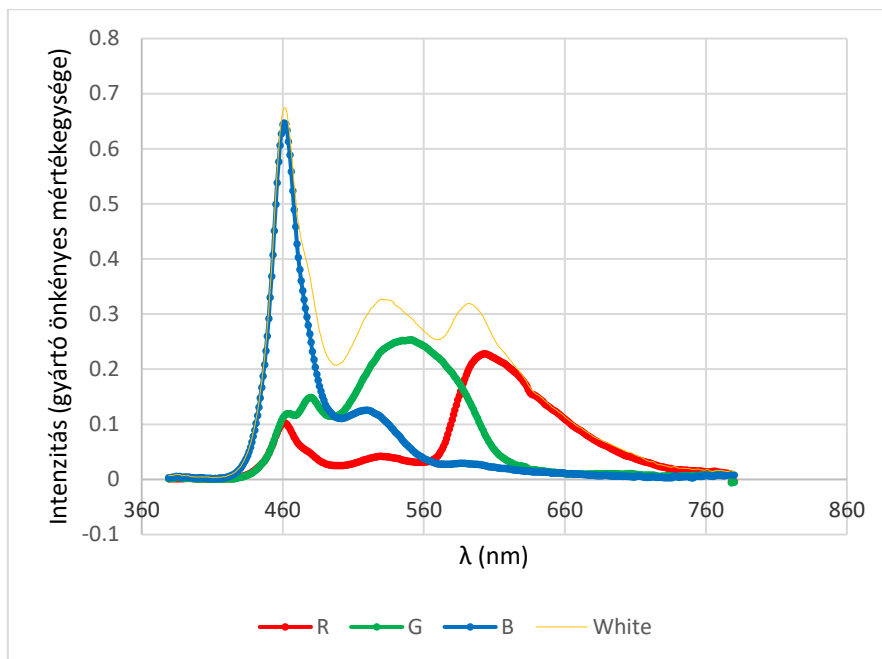
A két fenti megjelenítő spektrumából mindkét képernyő CIE 1931 szerinti x, y alappontjait a 10°-os Colour Matching Function (CMF) átváltással [ISO/CIE 10527-1991; Ábrahám et al., 2014c], 1 nm felbontással 360 nm és 830 nm között kiszámítottam. A zöld G, a vörös R, a kék B alapszínek és a számozott gamut pontokkal jelölt kevert színek azok a színek (331. ábra), amelyeket a szimulációs számításokban és a mérésorozatokban beeső fényingerként alkalmaztunk. A kevert színek gamut pontjait interpolációval számítottam (30. ábra).



30. ábra

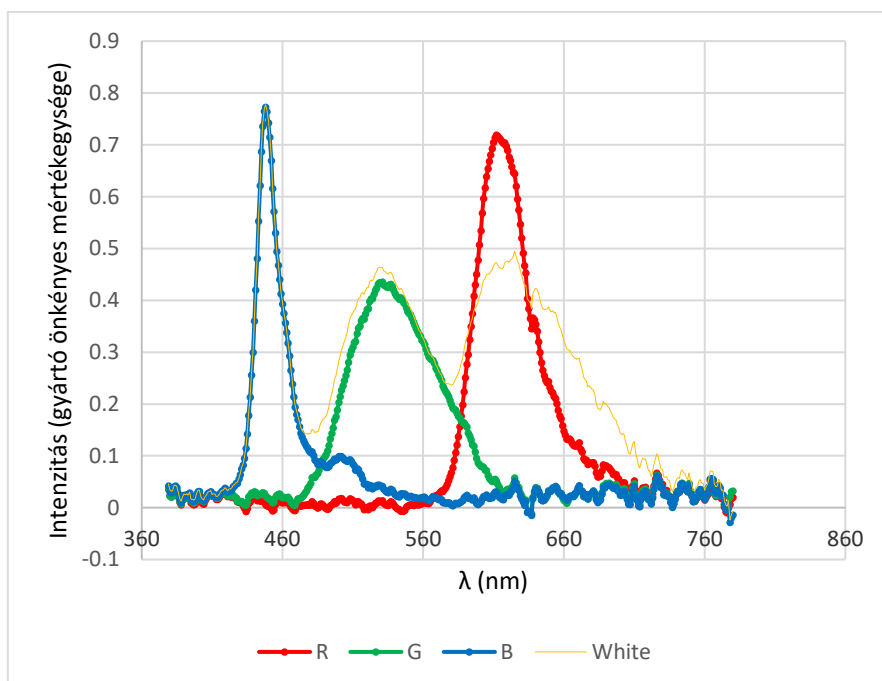
Gamut pontok CIE xy színdiagramja: Acer Aspire 1670 (CCFL) megjelenítő (narancssárga, belső gamut), HPZR2440w (CNT2130190) megjelenítő (zöld, külső gamut)

Az önméréshez a Dell E4200 (sorozatszám: CN-05HWX0-12961-03U-2100-A00) LCD-TN megjelenítő és a HPZR2440w IPS asztali monitor (sorozatszám: CN43270K9B) megjelenítő gamutot magam határoztam meg. A méréshez Avantes AvaSpec-2048-2 Fiber Optic Spectrometer típusú spektrométert alkalmaztam Avasoft 7.5.3 szoftverrel az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Világítástechnikai Laboratóriumában. A spektrométer kalibrálása előzetesen a gyártó látható és UV tartományú kalibrációs fényforrásával (AvaLight-DHS Deuterium Halogen) megtörtént. A felvett spektrális teljesítményeloszlásokat a 31. és 32. ábra szemlélteti. Dell E4200 notebook megjelenítő esetében a vörös és zöld alapszínek spektruma jóval elnyúltabb, mint HP ZR2440w megjelenítő esetében. Szubjektív összehasonlítás szerint az utóbbi megjelenítő színei jóval élénkebbnek hatnak az előbbihez képest.



31. ábra

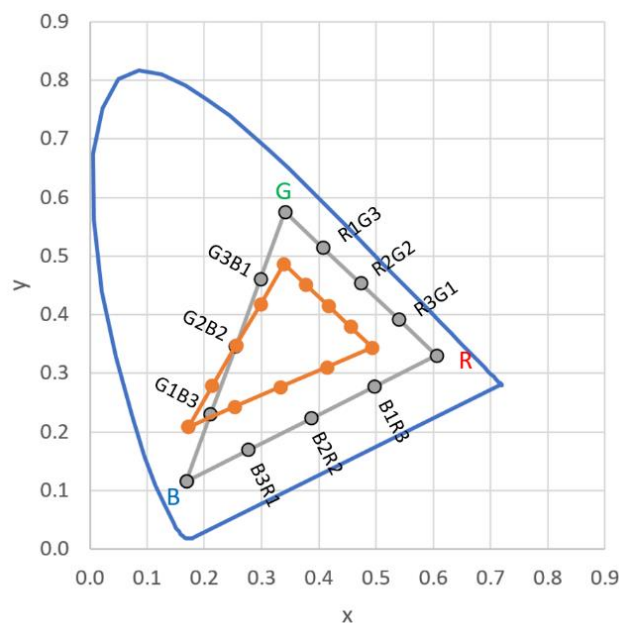
Dell E4200 (sorozatszám: CN-05HWX0-12961-03U-2100-A00) notebook megjelenítő spektruma



32. ábra

HPZR2440w (sorszám: CN43270K9B) megjelenítő spektruma

A Dell E4200 megjelenítőn (32. ábra) és a HPZR2440w megjelenítőn (33. ábra) mért spektrumok alapján kiszámítottam mindkét megjelenítő alappontjait CIE 1931 x, y színességi koordinátákban. Az átváltást 10°-os CMF-fel [ISO/CIE 10527-1991; Ábrahám et al., 2014c] 0.33 mm hullámhossz felbontással 378 nm és 780 nm között végeztem. A köztes gamut pontokat interpolációval számítottam. A zöld G, a vörös R, a kék B alapszínek és a számozott gamut pontokkal jelölt kevert színek azok a színek (33. ábra), amelyeket a szimulációs számításokban és a méréssorozatokban beeső fényingerként alkalmaztunk. A gamutok alapján látható, hogy a HP ZR2440w megjelenítő „élénkebb” színeket ad az alappontokon a Dell E4200 megjelenítőjéhez képest.



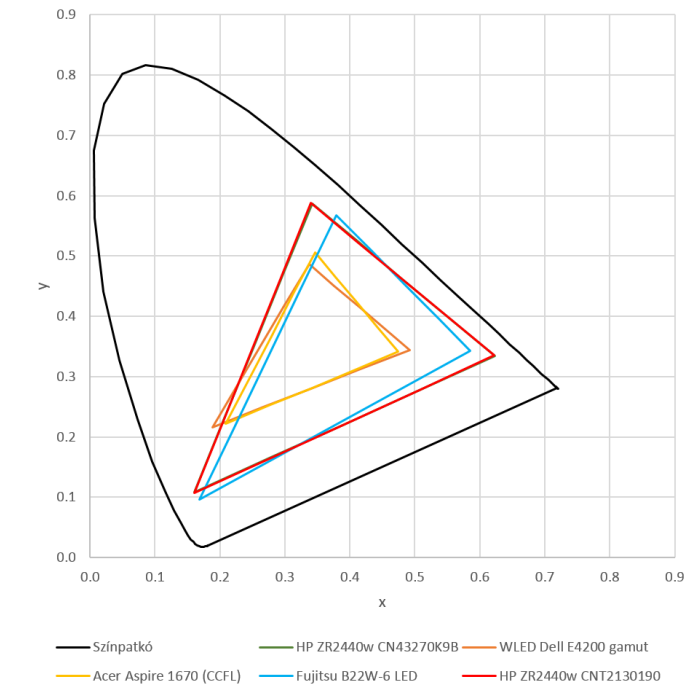
33. ábra

Dell E4200 (CN-05HWX0-12961-03U-2100-A00, diagramon szürke) és HP ZR2440w (CN43270K9B, diagramon narancssárga) megjelenítő gamutok

3.1.3. A gamutok összesítése

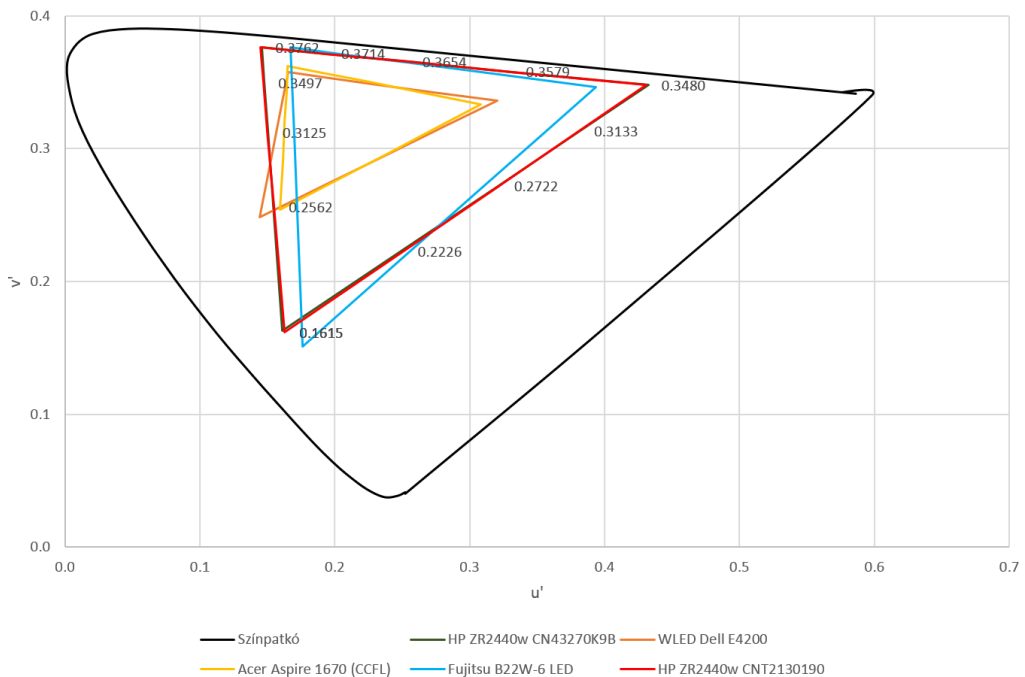
A méréseimben alkalmazott megjelenítő gamutokat a 34. ábra összegzi a CIE 1931 xy színrendszerben. Ugyanezen gamutokat összegzi a 35. ábra a CIE 1976 u'v' színrendszerben. A vonatkozó spektrumok a 29, 30, 32, 33. ábrákon láthatók. Megfigyelhető, hogy az általam mért LCD-TN és IPS panelekhez tartozó gamutok (34. ábra) közelítenek a korábbiakban már említett irodalmi gamutokhoz (18. ábra) [Guenther, Steel, 2018]. Érdekességként a 35. és a 36. ábrán feltüntettem egy Fujitsu B22W-6 LED IPS megjelenítő gamutot is (spektrum: Függelék

F1. 67. ábra), amely a munkámban szereplő HP ZR2440w IPS megjelenítőhöz képest kisebb CIE 1976 u'v' színességi koordináta területet fed le; ezért ez a Fujitsu megjelenítő a munkámban nem szerepel.



34. ábra

Megjelenítő gamutok összesítése xy színrendszerben



35. ábra

Megjelenítő gamutok összesítése u'v' színrendszerben

A kutatásomban alkalmazott megjelenítő gamutok CIE 1931 xy színességi koordinátáit a 6. táblázat összesíti. A gamut pontokat kétféleképpen kódoltam: egyik az alapszínek keverékének betű-szám szerinti felírása, másik a sorszámozás. A sorszámozást a szimulációs számításban alkalmaztam, míg a betű-szám szerinti felírást az eredmények közlésében.

6. táblázat
Gamut pontok

Gamut pont számkódja	Gamut pont kódja	CCFL		IPS (1. példány)		IPS (2. példány)		LCD-TN		RGB LED		3 színű lézer	
		x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	B	0.2091	0.2218	0.1555	0.1091	0.1600	0.1080	0.1880	0.2160	0.145	0.050	0.1610	0.0240
2	B3R1	0.2753	0.2518	0.2673	0.1666	0.2758	0.1645	0.2641	0.2480	0.281	0.113	0.2970	0.0918
3	B2R2	0.3415	0.2817	0.3792	0.2241	0.3915	0.2210	0.3403	0.2800	0.418	0.175	0.4330	0.1595
4	B1R3	0.4077	0.3115	0.4910	0.2816	0.5073	0.2775	0.4164	0.3120	0.554	0.238	0.5690	0.2273
5	R	0.4739	0.3415	0.6029	0.3391	0.6230	0.3340	0.4925	0.3440	0.690	0.300	0.7050	0.2950
6	R3G1	0.4420	0.3837	0.5326	0.4054	0.5528	0.3973	0.4537	0.3795	0.565	0.408	0.5613	0.4238
7	R2G2	0.4101	0.4239	0.4623	0.4718	0.4825	0.4605	0.4149	0.4151	0.440	0.515	0.4175	0.5525
8	R1G3	0.3783	0.4652	0.3920	0.5381	0.4123	0.5238	0.3761	0.4506	0.315	0.623	0.2738	0.6813
9	G	0.3464	0.5064	0.3217	0.6044	0.3420	0.5870	0.3373	0.4861	0.190	0.730	0.1300	0.8100
10	G3B1	0.3121	0.4353	0.2802	0.4806	0.2965	0.4673	0.2999	0.4186	0.179	0.560	0.1378	0.6135
11	G2B2	0.2778	0.3641	0.2386	0.3568	0.2510	0.3475	0.2626	0.3510	0.168	0.390	0.1455	0.4170
12	G1B3	0.2434	0.2930	0.1970	0.2329	0.2055	0.2278	0.2253	0.2835	0.156	0.220	0.1533	0.2205

3.2. A szimuláció módszere

Miként a 3. fejezet bevezetésében említettem, szimulációs számításaimhoz kidolgoztam egy numerikus kinetikai modellt, amelynek segítségével a hirtelen színátmenettel kiváltott virtuális színérzet erősségének és időtartamának szimulációja megvalósítható. Numerikus kinetikai modellem kidolgozását a 2.4.1 fejezetben részletezett csap érzékenységi kinetikai modellre építettem.

A 3.2.1. fejezetben a hirtelen színátmenettel kiváltott virtuális színérzet erősség és időtartam numerikus kinetikai modellemmel történő számítását írom le. A 3.2.2. fejezetben egy adott színátmenet által kiváltott virtuális színérzet szimulációs számításának példáját mutatom be. A 3.2.3. fejezetben ismertetem a szimulációhoz készített Java alkalmazásomat.

3.2.1. A virtuális színérzet erősség és időtartam számítás

A virtuális színérzet számítását pillanatnyi színérzetek iterálásával végeztem.

Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modellben a pillanatnyi színérzetet az alábbiakban részletezett matematikai összefüggésekkel írtam le.

Egy egyedülálló (L, M vagy S) csap fotoreceptorban kiváltott és tovahaladó ingerület (ld. 2.4.1. fejezet 11. ábra, J görbe) a (8) képlettel számítható [Horváth, 2013],

$$J = D \cdot E \cdot p \quad (8)$$

ahol D átváltási konstans, p a relatív fotopigment koncentráció és E a retinamegvilágítás intenzitása trolandban (td) kifejezve. A p változó a relatív fotopigment koncentráció, amelynek értéke 0 és 1 között változik (ld. 2.4.1 fejezet).

A pillanatnyi színérzet számításánál az L, M és S csapok J értékét egymással összevetve a pillanatnyi színérzet posztreceptorális komponenseit (a retina és az agy közötti jelvezetést) elhanyagolhatónak tekintettem. Ezáltal az L, M, S csapok D értéke azonosnak tekinthető, ez az érték a számításaimban $D = 1$. Numerikus kinetikai modellemben a megjelenítő 300 cd/m^2 maximális fénysűrűségével és $5 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} \cdot \pi / 4$ pupillafelülettel számoltam a (8-1) egyenletnek megfelelően.

$$E = L \cdot P \quad (8-1)$$

A (8-1) egyenletben E a már említett retina megvilágítás intenzitás (td), L a megjelenítő maximális fénysűrűsége, P a pupillafelület (mm^2). Mindebből következik, hogy a legnagyobb retina megvilágítás intenzitás érték számításaimban 5890 td , amelyet szimulációs munkámban $E = 6000$ -re kerekítettem.

Különbséget kell tenni E és E_0 változók között. E jelöli a retina megvilágítás pillanatnyi intenzitását, míg E_0 az a retina megvilágítás intenzitás, amelynél a fotopigment spontán és fényindukált hasadása egyensúlyban van.

A 2.4.1. fejezetben részletezett (1)-(4) egyenletekből az alábbi (9) differenciálegyenlet következik, ahol az időállandó $\tau=99 \text{ 1/s}$ és $E_0 = 6000$ [Smith et al., 1983].

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{\tau} - \frac{p}{\tau} - \frac{E}{E_0} \frac{p}{\tau} \quad (9)$$

A (9) egyenlet megoldása a (10) egyenlet, amely adott időpillanatban meghatározza a relatív fotopigment koncentrációt,

$$p(t) = \frac{1}{b}(1 - (1 - p_0b))e^{-tb/\tau} \quad (10)$$

ahol p_0 a kezdeti relatív fotopigment koncentráció, b az egyensúlyi relatív fotopigment koncentráció (p_e) reciproka [Horváth, 2013].

A (10) egyenletben $p(t) \rightarrow p_e$ azaz adott időpillanat relatív fotopigment koncentrációja az egyensúlyi relatív fotopigment koncentráció értékhez (p_e) közelít, amelyet a (11) egyenlet szemléltet [Horváth, 2013].

$$p_e = \frac{1}{b} = \frac{E_0}{E+E_0}. \quad (11)$$

A CIE 1931 [CIE 15:2018 Colorimetry] színrendszer alapján az $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ pillanatnyi színérzet színességi koordinátákat a (12)-(31) egyenletekkel számítottam a retinát megvilágító beeső fény x_i , y_i , z_i (iterációs) színességi koordinátáiból és p_{0L} , p_{0M} és p_{0S} kezdeti relatív fotopigment koncentrációkból, a változókat L , M és S indexekkel jelölve az L , M és S csap receptoroknak megfelelően. A (12)-(14) egyenletekben a retina adekvát megvilágítás intenzitás értékek E_L , E_M és E_S kiszámításánál a von Kries-féle transzformációs mátrix (M) [Calabria, Fairchild, 2001] megfelelő sorát az $[x_i, y_i, z_i]$ (iterációs) vektorral szoroztam.

$$E_L = E \cdot M_{1,1-3} \times [x_i, y_i, z_i] \quad (12)$$

$$E_M = E \cdot M_{2,1-3} \times [x_i, y_i, z_i] \quad (13)$$

$$E_S = E \cdot M_{3,1-3} \times [x_i, y_i, z_i] \quad (14)$$

Az M transzformációs mátrix értéke:

$$M = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7076 & -0.0808 \\ -0.2263 & 1.1653 & 0.0457 \\ 0 & 0 & 0.9182 \end{bmatrix} \quad (15)$$

A (19)-(21) egyenletek egyszerűsítése céljából, a (11) egyenletet figyelembe véve, az egyes csapokra bevezettem a b változót:

$$b_L = 1 + \frac{E_L}{E_0} \quad (16)$$

$$b_M = 1 + \frac{E_M}{E_0} \quad (17)$$

$$b_S = 1 + \frac{E_S}{E_0} \quad (18)$$

A (16)-(18) egyenletekben E_L , E_M , és E_S a (12)-(14) egyenletekben leírt retina adekvát megvilágítás intenzitás értékeit jelöli. Adott időpillanat relatív fotopigment koncentrációját a p_{0L} , p_{0M} és p_{0S} kezdeti relatív fotopigment koncentrációkból számítottam a (19)-(21) egyenleteknek megfelelően.

$$p_L(t) = \frac{1}{b_L} (1 - (1 - p_{0L} b_L)) e^{-tb_L/\tau} \quad (19)$$

$$p_M(t) = \frac{1}{b_M} (1 - (1 - p_{0M} b_M)) e^{-tb_M/\tau} \quad (20)$$

$$p_S(t) = \frac{1}{b_S} (1 - (1 - p_{0S} b_S)) e^{-tb_S/\tau} \quad (21)$$

A 3.2.1. fejezet (8) egyenletét, az egyedülálló csap fotoreceptorban kiváltott és továbbított ingerület (J) matematikai megfogalmazását az egyes csaptípusokra alkalmazva, a pillanatnyi relatív fotopigment koncentrációkból kiszámítottam az L, M és S csap fotoreceptorokban kiváltott és továbbított pillanatnyi $J_L(t)$, $J_M(t)$, $J_S(t)$ ingerület értékeit a (22) - (24) egyenletben leírtak szerint:

$$J_L(t) = D \cdot p_L \cdot E_L \quad (22)$$

$$J_M(t) = D \cdot p_M \cdot E_M \quad (23)$$

$$J_S(t) = D \cdot p_S \cdot E_S \quad (24)$$

Az L, M és S csap fotoreceptorokban kiváltott és továbbított $J_L(t)$, $J_M(t)$, $J_S(t)$ ingerület értékeit a CIE 1931 XYZ rendszerben adott időpillanat $X(t)$, $Y(t)$ és $Z(t)$ színinger-összetevőkre (tristimulus értékekre [Schanda, 2007]) váltottam át a (25)-(27) egyenletekben.

$$X(t) = M_{1,1-3}^{-1} \times [J_L(t), J_M(t), J_S(t)] \quad (25)$$

$$Y(t) = M_{2,1-3}^{-1} \times [J_L(t), J_M(t), J_S(t)] \quad (26)$$

$$Z(t) = M_{3,1-3}^{-1} \times [J_L(t), J_M(t), J_S(t)] \quad (27)$$

M^{-1} a fotoreceptorokban kiváltott és továbbított pillanatnyi $J_L(t)$, $J_M(t)$, $J_S(t)$ ingerület értékek és az $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ színinger-összetevők közötti transzformációs mátrix, értéke:

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} 1,8601 & -1,1295 & 0,2199 \\ 0,3612 & 0,5388 & -7,1275 \cdot 10^{-6} \\ 0 & 0 & 1,0891 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Adott időpillanat színérzetének $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ színességi koordinátáit a (29)-(31) egyenletekkel számítottam ki:

$$x(t) = \frac{X(t)}{X(t)+Y(t)+Z(t)} \quad (29)$$

$$y(t) = \frac{Y(t)}{X(t)+Y(t)+Z(t)} \quad (30)$$

$$z(t) = 1 - x(t) - y(t) \quad (31)$$

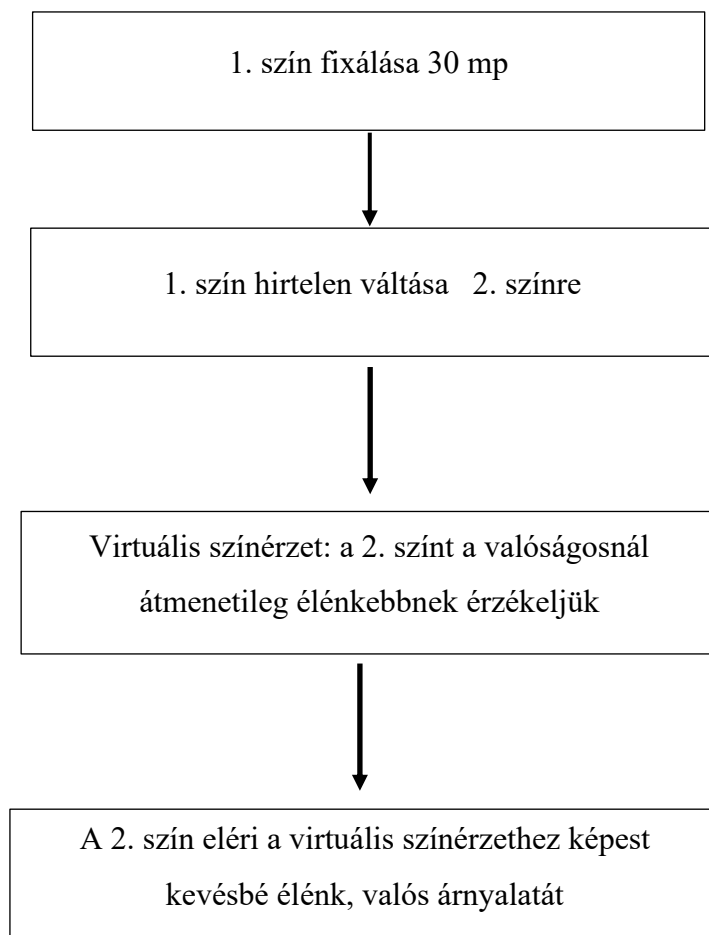
A (32)-(33) egyenletek segítségével adott időpillanat színérzetének CIE 1931 XYZ $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ színességi koordinátáit a 2.5. fejezet (7) és (8) egyenletei szerint egyenletes színingertérbe, a CIE 1976 $u'(t)$, $v'(t)$ színességi koordinátákra átszámítottam:

$$u'(t) = \frac{4x(t)}{12y(t)-2x(t)+3} \quad (32)$$

$$v'(t) = \frac{6y}{12y(t)-2x(t)+3} \quad (33)$$

A virtuális színérzet erősségének és időtartamának meghatározásához a (12)-(33) egyenletekkel számított pillanatnyi színérzetek iterációját az alábbiak szerint végeztem el.

A (12)-(33) egyenletek alkalmazásával iterációt végeztem az x_1 , y_1 , z_1 (színátmenetet megelőző 1. szín) és x_2 , y_2 , z_2 (színátmenetet követő 2. szín) színességi koordinátájú színek közötti színátmenet által kiváltott virtuális színérzet modellezésére, amelynek folyamatábrája a 36. ábrán látható, iterációs jellemzőit a 7. táblázat tartalmazza.



36. ábra
Virtuális színérzet szimulációs lépések

7. táblázat

Virtuális színérzet iterációs jellemzők a numerikus kinetikai modellben

		Bemeneti paraméterek	Kimeneti paraméterek
Iteráció előtti lépés	Δc ; $(\Delta c)_{\max}$ számításához szükséges színességi koordináták felvétele 30 mp adaptáció után	p_{0L} , p_{0M} és $p_{0S} = 0.1$; x_2, y_2, z_2 ; $t = 30$ s	u'_e, v'_e színességi koordináták
1. lépés	30 mp adaptáció a színátmenetet megelőző 1. színhez (fixálás)	p_{0L} , p_{0M} és $p_{0S} = 0.1$; x_1, y_1, z_1 ; $t = 30$ s	$p_L(t), p_M(t), p_S(t)$

		Bemeneti paraméterek	Kimeneti paraméterek
2. lépés	A színátmenetet követő 2. szín által kiváltott virtuális színérzet erősségének számítása	Az 1. lépésbeli $p_L(t)$, $p_M(t)$ és $p_S(t)$; x_2, y_2, z_2 színességi koordináták; $t = 0.1$ s; Iteráció előtti lépés u'_e, v'_e	$p_L(t_n), p_M(t_n), p_S(t_n)$; $u'(t), v'(t)$; $\Delta c; (\Delta c)_{\max}$
3...n. lépés	A színátmenetet követő 2. szín által kiváltott virtuális színérzet időtartamának számítása, a virtuális színérzet lecsengésének követése	Az előző iterációs lépésbeli $p_L(t), p_M(t)$ és $p_S(t)$; x_2, y_2, z_2 színességi koordináták; $t = 0.1$ s Iteráció előtti lépés u'_e, v'_e	Δc minimumhelyéhez tartozó iterációs szám: $(n-2) \cdot 0.1$ s a virtuális színérzet időtartam

A 7. táblázat szerinti iterációs lépéseket megelőzően a (12) - (33) egyenletekkel kiszámítottam a színátmenetet követő szín, azaz a második színnek megfelelő egyensúlyi színérzet u'_e és v'_e koordinátáit, bemeneti paraméterekként tekintve a színátmenetet követő szín, azaz a második szín x_2, y_2, z_2 színességi koordinátáit, tekintettel a $p_{0L} = p_{0M} = p_{0S} = 0.1$ kezdeti relatív fotopigment koncentrációra és a $t = 30$ másodperces időtartamra (7. táblázat, Iteráció előtti lépés).

Az iteráció 1. lépéseként a (12) - (33) egyenletekkel kiszámítottam a színátmenetet megelőző szín, azaz az első színnek megfelelő egyensúlyi színérzet koordinátákat és a $p_L(t), p_M(t), p_S(t)$ pillanatnyi relatív fotopigment koncentrációt, bemeneti paraméterekként tekintve a színátmenetet megelőző szín, azaz az első szín x_1, y_1, z_1 színességi koordinátákat, $p_{0L} = p_{0M} = p_{0S} = 0.1$ kezdeti relatív fotopigment koncentrációt és $t = 30$ másodperces időtartamot (7. táblázat 1. lépés).

Az iterációt a színátmenetet követő szín, azaz a második szín x_2, y_2, z_2 színességi koordinátákkal folytattam a 7. táblázat 2. lépése szerint. A (12) - (33) egyenletekkel kiszámítottam a $p_L(t), p_M(t), p_S(t)$ pillanatnyi relatív fotopigment koncentrációt, bemeneti paraméterekként tekintve a

színátmenetet követő szín, azaz a második szín x_2, y_2, z_2 színességi koordinátákat és a 7. táblázat 1. lépésben kapott $p_L(t), p_M(t), p_S(t)$ kimeneti paramétereket.

Az iterációt $t = 0.1$ másodperc választott időtartammal (7. táblázat 2. lépés) végeztem. A $t = 0.1$ másodperc időtartammal az iteráció gyorsan futtatható és a virtuális színérzet lecsengése pontosan követhető.

A t időpontra vonatkozó pillanatnyi virtuális színérzet erősséget (Δc) a (32)-(33) egyenletekkel kiszámított $u'(t)$ és $v'(t)$ paraméterekkel és a 7. táblázat Iteráció előtti lépésben meghatározott u'_e, v'_e színességi koordináta paraméterekkel, a (34) egyenlet szerint kiszámítottam:

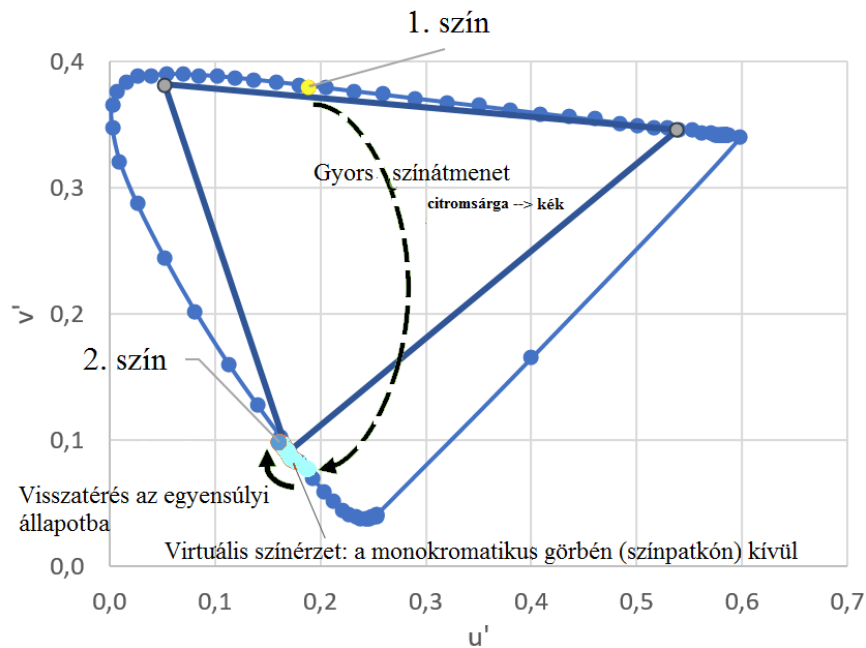
$$\Delta c = \sqrt{(u'(t) - u'_e)^2 + (v'(t) - v'_e)^2} \quad (34)$$

A 7. táblázat 2. lépésben számított Δc érték adott színátmenettel kiváltott virtuális színérzet pillanatnyi erősségének felel meg. Ugyanitt a $(\Delta c)_{\max}$ érték adott színátmenettel kiváltott virtuális színérzet erősség maximumának felel meg.

A 7. táblázat szerinti iteráció további lépéseit (3 ... n) a 2. lépéshez hasonlóan végeztem Δc minimum értékig. Ezen minimum értékhez vezető lépések száma szorozva a $t = 0.1$ s időtartammal jelenti a virtuális színérzet időtartamát.

3.2.2. Szimulációs példa

Numerikus kinetikai modellem matematikájának megértéséhez a grafikus megközelítést a 37. ábra szemlélteti. Az 1. gamut pont a pillanatnyi beeső fény színérzékelését jelenti, amely esetünkben citromsárga. Citromsárgáról kékre történő színátmenet esetén kezdetben élénk kék színt érzékelünk, amely normál kékké alakul egy idő után (37. ábra: *Visszatérés az egyensúlyi állapotba*). Ez az időtartam a relatív fotopigment koncentráció egyensúlyi állapotba visszatéréséhez szükséges, és ez a virtuális színérzet időtartama; ebben az esetben élénk kék színérzetet jelent.



37. ábra

Virtuális színérzetet kiváltó színátmenet példa. A citromsárga pont az első szín érzetét mutatja. A világoskék pontok a virtuális színérzetre utalnak, miközben a fotopigment relatív koncentráció visszatér az egyensúlyi helyzetbe.

A 8. táblázat szimulációs számokkal szemlélteti a 37. ábra virtuális színérzet erősség (Δc) számítását a léptetett időtartam (t (sec)) függvényében.

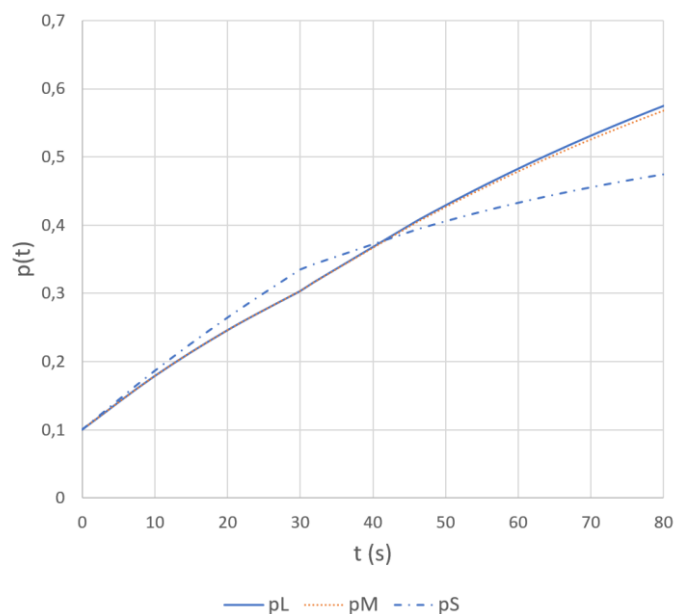
8. táblázat
Iterációs példa

t (s)	x_i	y_i	$u'(t)$	$v'(t)$	Δc
0.0	0.4250	0.56875	-	-	-
10.0	0.4250	0.56875	0.1893	0.3802	-
20.0	0.4250	0.56875	0.1892	0.3802	-
30.0	0.4250	0.56875	0.1891	0.3802	-
30.1	0.1400	0.05000	0.1748	0.0836	0.02075
30.2	0.1400	0.05000	0.1748	0.0837	0.02066
30.3	0.1400	0.05000	0.1747	0.0838	0.02057
30.4	0.1400	0.05000	0.1747	0.0838	0.02048
30.5	0.1400	0.05000	0.1746	0.0839	0.02039
30.6	0.1400	0.05000	0.1745	0.0840	0.02031
30.7	0.1400	0.05000	0.1745	0.0840	0.02022
30.8	0.1400	0.05000	0.1744	0.0841	0.02013
30.9	0.1400	0.05000	0.1744	0.0842	0.02004
31.0	0.1400	0.05000	0.1743	0.0842	0.01995

t (s)	x_i	y_i	$u'(t)$	$v'(t)$	Δc
31.1	0.1400	0.05000	0.1743	0.0843	0.01987
31.2	0.1400	0.05000	0.1742	0.0844	0.01978
...
63.9	0.1400	0.05000	0.1611	0.0991	0.000126
64.0	0.1400	0.05000	0.1611	0.0991	0.000101
64.1	0.1400	0.05000	0.1611	0.0992	0.000092
64.2	0.1400	0.05000	0.1611	0.0992	0.000102

Az első 4 adatsor az x_i , y_i színességi koordináták azonos értékét mutatja időben (0-30 mp). Ebben az időszakaszban az $u'(t)$, $v'(t)$ értékek közel állandóak. 30 mp-nél azonban a citromsárga-kék színátmenet virtuális színérzetet vált ki, amelyet a 5. sortól kezdve a 6. oszlop mutat. A 6. oszlop Δc értéke a virtuális színérzet erősségét jelöli. Ebből $(\Delta c)_{\max}$ a virtuális színérzet maximális erőssége, míg a Δc minimum a virtuális színérzet időtartamához rendelhető érték.

A 8. táblázat iterációs szimulációs adatai szerint a citromsárga-kék színátmenet által kiváltott virtuális színérzet $(\Delta c)_{\max}$ értéke 30.1 sec időtartamnál tapasztalható (8. táblázat 5. adatsor); a Δc minimum érték 64.1 sec időtartamnál volt megfigyelhető (8. táblázat 20. adatsor). A bemutatott iterációs szimulációs példa L, M és S csap fotoreceptorainak pillanatnyi relatív fotopigment koncentrációját a 38. ábra szemlélteti.



38. ábra.
Relatív fotopigment koncentráció a 8. táblázat szerinti iterálásban.

A 38. ábrán láthatóan a pS (példában kék) csapra jellemző relatív fotopigment koncentráció görbe a 30 sec időponttól csökkenő meredekséggel halad tovább. Ettől eltérően, a pM és a pL (zöld és vörös) csapok, amelyek itt együtt értékelendők a kiindulási citromsárga szín miatt (citromsárga kevert szín = vörös + zöld), relatív fotopigment koncentráció görbéje együtt futva a 30 sec időponttól enyhén nagyobb meredekséggel halad tovább. Mindez a gyors színátmenettel kiváltott virtuális színérzet (ragyogó kék szín) fellépésének kezdete. A Δc minimum érték a 64.1 sec időpontnál az előbbieket szerinti virtuális színérzet lecsengését, a relatív fotopigment koncentráció egyensúlyi állapotba térését, azaz a virtuális színérzet (utókép) időtartamát jelzi.

A virtuális színérzet szimulációjában a beeső fény gyors színátmeneteit CCFL, WLED, IPS, RGB LED és háromszínű lézeres megjelenítőkön szemléltettem, a 3.1.2 fejezet 30. ábra és 33. ábra szerinti gamut pontok között. Összesen 24 színátmenet szimulációját futtattam adott megjelenítőre jellemző gamut háromszög ismeretében.

A színátmenetekhez rendelhető színkódok a Függelék F2. fejezetében olvashatók.

Az alábbiakban feltüntetett betűk a következő alapszíneknek felelnek meg.

R = (red) vörös G = (green) zöld B = (blue) kék

A 24 színátmenet a megjelenítő gamut háromszög csúcsai közötti színátmeneteket, valamint a megjelenítő gamut háromszög csúcsok és a szemközti oldalélek mentén elhelyezkedő gamut pontok közötti színátmeneteket jelenti. A betűk melletti számok adott szín gamut menti árnyalatának számszerűsített intenzitását jelölik.

Színátmenetekre kifejtve: B→R3G1, B→R2G2, B→R1G3, R3G1→B, R1G2→B, R1G3→B, G3B1→R, G2B2→R, G1B3→R, R→G3B1, R→G2B2, R→G1B3, G→B3R1, G→B2R2, G→B1R3, B3R1→G, B2R2→G, B1R3→G, B→R, R→B, R→G, G→R, G→B, B→G (3.1.2. fejezet, 30. ábra).

3.2.3. Szimulációs környezet

A szimulációhoz saját alkalmazást készítettem az alábbiak szerint:

- futtatás PC-n, kevés lépésben telepíthető futtató környezetben,
- bemeneti paraméterek megadása és a szimuláció indítása grafikus kezelőfelületen,
- a szimulációban megjelenő színérzet értékek színdiagramon ábrázolhatók.

Három gyakori programozási nyelv, a VBA, Python és Java közül választottam ki a legmegfelelőbbet a 9. táblázat szempontjai szerint.

9. táblázat
Szoftverfejlesztő környezet kiválasztása

Szempont / Fejlesztő környezet	Python	Java	Microsoft Excel: Visual Basic for Applications (VBA)
Platform függetlenség	Python futtató környezet telepítendő (Windows, Linux, OSX). A Python futtató környezet telepítését követően külön telepítendők az alkalmazáshoz szükséges bővítmények. (Például <i>Math</i> és <i>NumPy</i> modul: matematikai számítások; <i>MathPlotLib</i> modul: diagram rajzolás)	Java futtatási környezet telepítendő. Az alkalmazás futtatható állománya (JAR fájl) tartalmazza a szükséges bővítményeket	MS Office környezet telepítendő. Az ingyenes OpenOffice-ba illetve Libre Office-ba nem vihető át kompatibilitási hiányosságok miatt
Alkalmazásfejlesztési eszközök	Integrált fejlesztő környezet, számos plugin/framework a szöveges, grafikus és Excel kimenetekhez		Excel beépített VBA szerkesztő
Átlagos iterációs idő Core 2 Duo konfigurációval	0.2 sec/színátmenet	0.5 sec/színátmenet	5 sec /színátmenet
Konfiguráció	CPU: Core 2 Duo, 2.0 GHz 4 GB DDR2 RAM SSD: 240GB, max. írási sebesség: 350 GB/s		

A szimulációs környezetet először VBA környezetben fejlesztettem ki az MS Office környezet általános elérhetősége miatt. Időközben azonban a következő korlátokra derült fény.

- Kizárólag MS Office környezetben futtatható a szimuláció, mivel OpenOffice illetve LibreOffice környezetben a VBA alkalmazásom nem működött.
- Az Excel beépített diagramsémái nem megfelelőek az eredmény diagram ábrázoláshoz. Bővítmény keresésére lenne szükség, így azonban már Java és Python környezetben ajánlatos bővítményt telepíteni.

A szimulációs alkalmazást részlegesen elkészítettem Python nyelven is. Bár a Excel környezethez képest jóval gyorsabbnak bizonyult, azonban az alkalmazásokhoz szükséges bővítményeket (pl. diagram rajzolás) minden egyes platformra külön kell telepíteni. A teljes

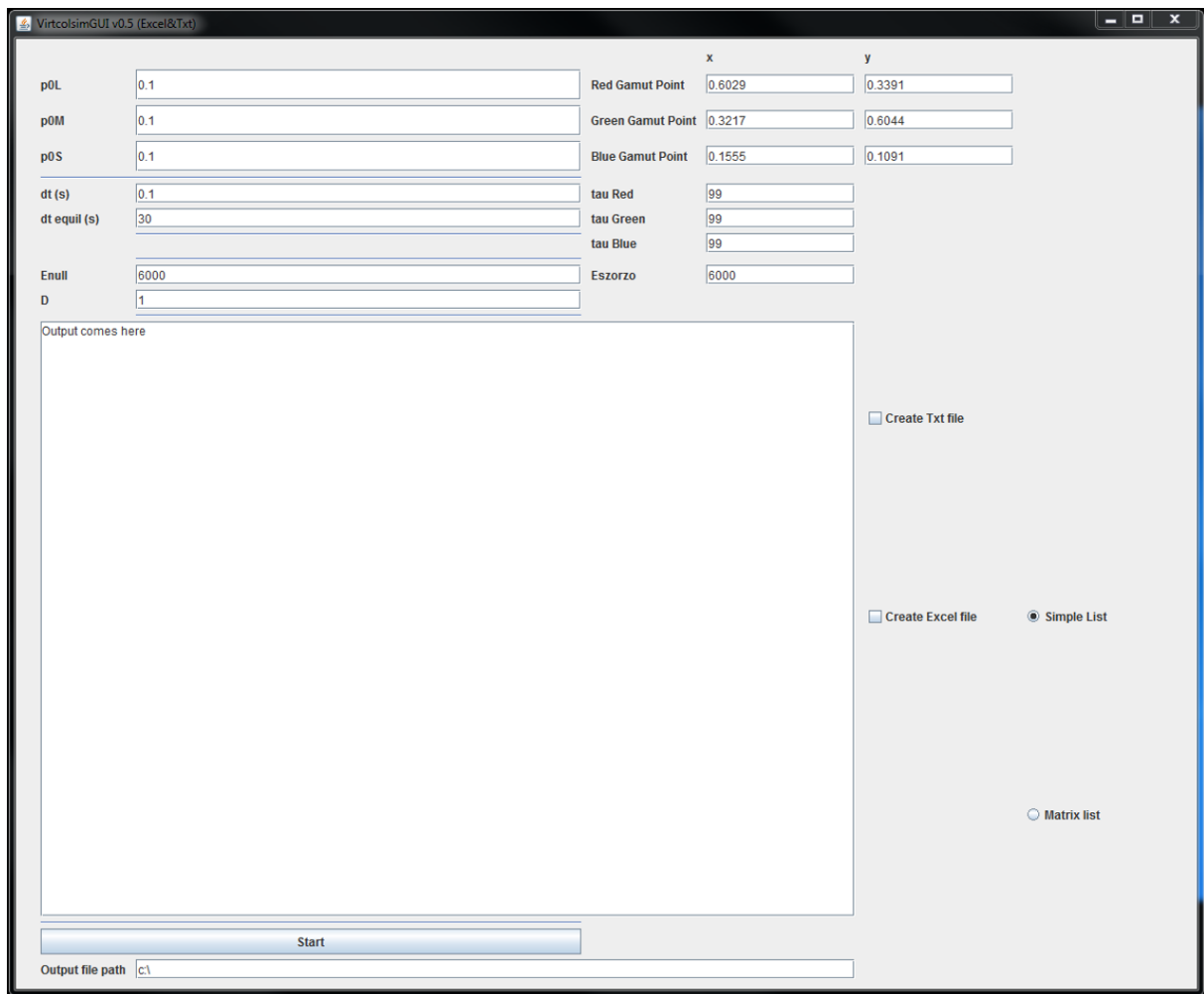
platform függetlenséget Java környezetben tudtam biztosítani: az adott platformra (Windows, MacOS, grafikus kezelőfelületű Linux) egyedül a Java Running Environment 8 (JRE 8) telepítése szükséges. Ennek megfelelően szimulációs alkalmazásomat, amelynek a VirtColSim nevet adtam, végül Java nyelven készítettem el grafikus kezelőfelülettel.

A VirtColSim nevű Java környezetű alkalmazásom a következőképpen indítható parancssorból:

```
java -jar VirtColSimGui0.5.jar
```

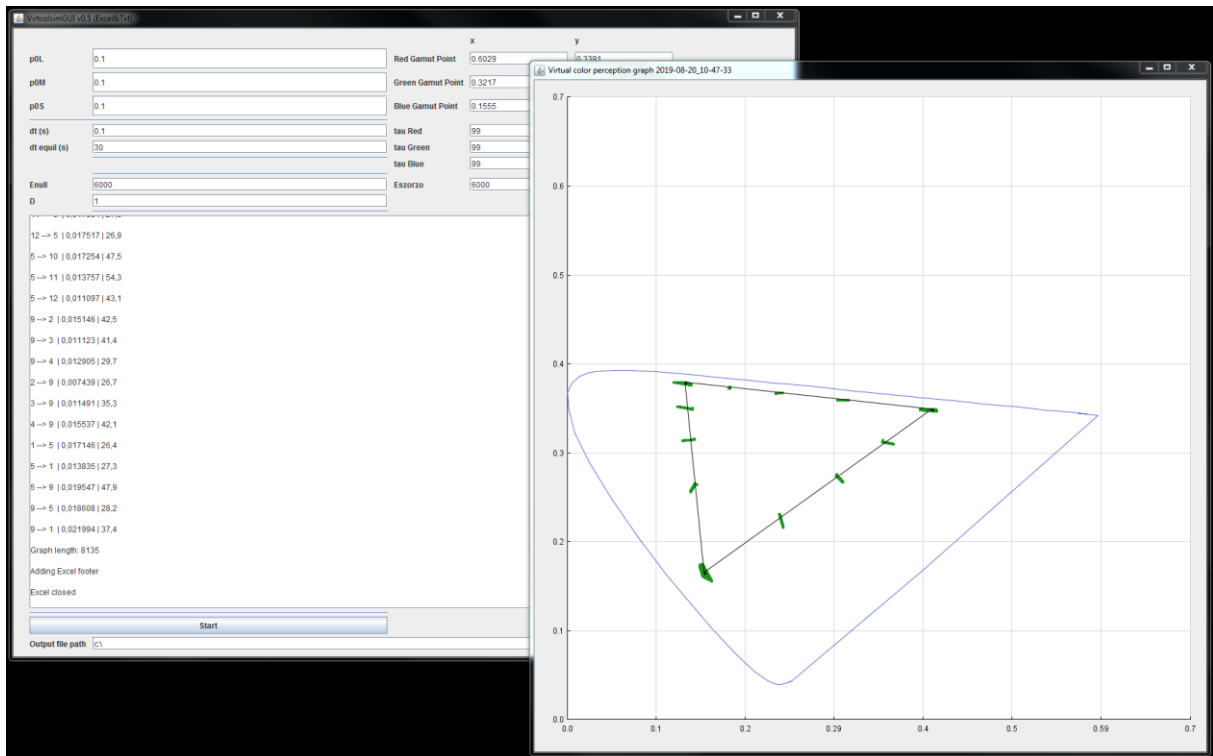
Az indítást követően megjelenő fő ablakban (39. ábra) a következő beállítások szerepelnek:

- a 7. táblázat szerinti iterációs paraméterek (ld. (12)-(31) egyenletek)
 - p_{0L}: p_{0L} ; p_{0M}: p_{0M}; p_{0S}: p_{0S}
 - dt(s): a 7. táblázat szerinti 2. lépés és 3...n. lépés t paramétere
 - dt equil(s): a 7. táblázat szerinti Iteráció előtti lépés és 1. lépés t paramétere
 - Enull: E₀; Eszorzo: E; D: D
 - Red Gamut Point: megjelenítő gamut vörös alappont x,y színességi koordinátái;
Green Gamut Point: megjelenítő gamut zöld alappont x,y színességi koordinátái;
Blue Gamut Point: megjelenítő gamut kék alappont x,y színességi koordinátái
- a szimulációban vizsgált színátmenetek köre:
 - „simple list”: 24 színátmenet, ami a megjelenítő gamut háromszög csúcsai közötti színátmeneteket, valamint a megjelenítő gamut háromszög csúcsok és a szemközti oldalélek mentén elhelyezkedő gamut pontok közötti színátmeneteket jelenti.
 - „Matrix list”: a 7. táblázatban szereplő 12 gamut pont valamennyi összes lehetséges párosítása, összesen 144 db színátmenet, kutatásomban nem volt szükség ennek alkalmazására.
- A szimulációs eredmények mentése TXT vagy Excel fájlba.



39. ábra
A VirtColSim0.5 fő ablaka

Start gombbal indítjuk a szimulációt, amelynek lefutása után a 40. ábra szerinti elrendezés látható a képernyőn.

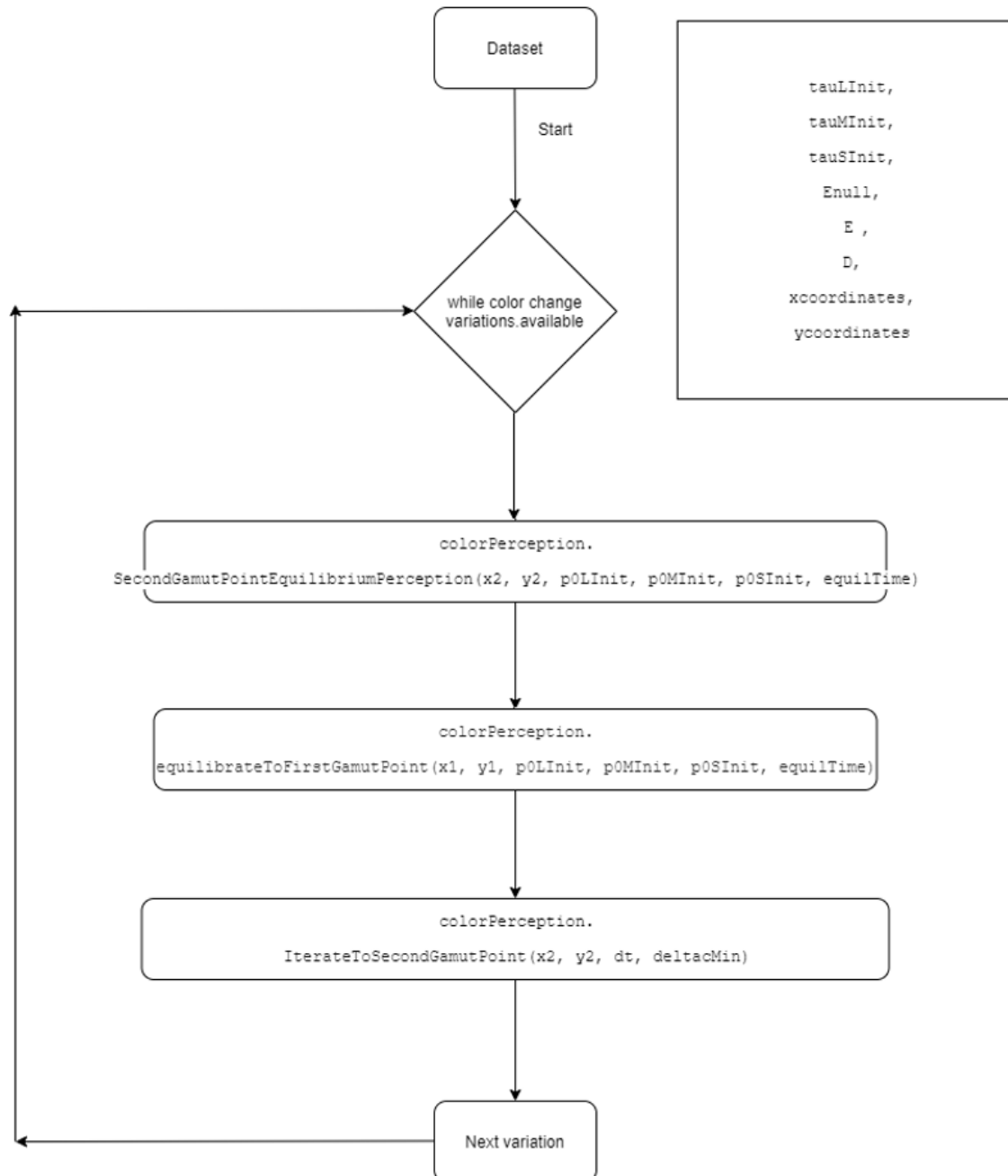


40. ábra
A VirtColSim0.5 teljes képernyőképe a szimulációs futtatás után.

A virtuális színérzet erősség és időtartam eredmények az alkalmazás fő ablakának szövegmezőjében, egy görgethető szöveges mezőben láthatók. Ezen felül az „Output file path” mezőben szereplő útvonalon megtalálható a szimuláció eredményeit tartalmazó Excel tábla és/vagy szövegfájl, ha a vonatkozó választónégyzeteket a szimuláció futtatása előtt bejelöltük. A fő ablak felett megjelenő ablakon a virtuális színérzetet reprezentáló diagram szerepel.

A 41. ábra a VirtColSim0.5 alkalmazásom virtuális színérzet szimulációs algoritmusát írja le. A „Dataset” azon színátmenetek halmaza, amelyekkel a virtuális színérzet szimulációt futtattam. A „while color change variations available” ciklusban számítom ki az egyes színátmenetekre jellemző virtuális színérzet erősséget és időtartamot a 3.1.1 fejezet 8. táblázatában szereplő iterációnak megfelelően. A *colorperception.SecondGamutPointEquilibriumPerception(...)* metódus a 7. táblázat szerinti virtuális színérzet iteráció alapozó lépését, a *colorperception.equilibrateToFirstGamutPoint(...)* metódus a táblázat 1. lépését, végül a *colorperception.IterateToSecondGamutPoint(...)* metódus a 8. táblázat 2. és 3...n. lépését hajtja végre. A *while color change variations available* ciklusban az egyes színátmenetekre

kiszámított virtuális színérzet erősségeket és időtartamokat az alkalmazás a fő ablakban megadott kimeneti formátum(ok)ban menti el.



41. ábra

Numerikus kinetikai modellel végzett szimuláció algoritmus folyamatábrája.

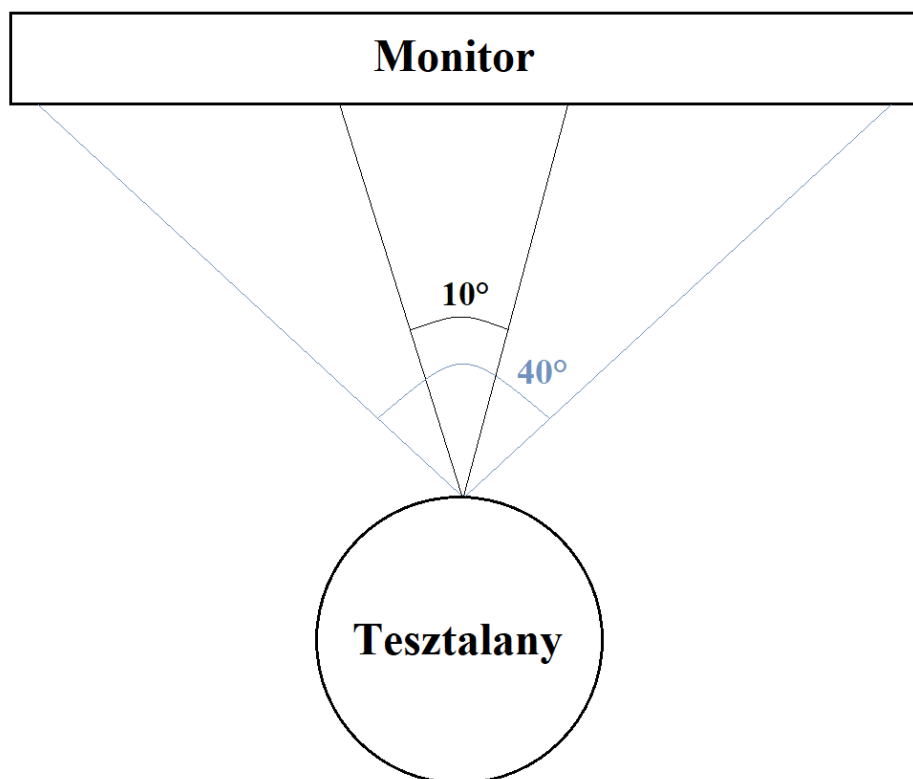
3.3. A 41 tesztalanyos színes-színes és a 16 tesztalanyos színes-szürke utókép mérés módszere

Ebben a mérési szakaszban Témavezetőmmel közös célunk volt tesztalanyokkal végzett méréssorozattal meghatározni az utókép erősségének és időtartamának kortól és nemtől való függését. A színes-színes utókép mérésekben kezdetben 27 [S5] tesztalanyal végzett mérési sorozatunk értékelése további tesztalanyok bevonásának szükségességét mutatta. A színes-színes utókép mérési sorozatunkat végül 41 tesztalanyra bővítettük.

A színes-színes utókép mérések megerősítéséhez színes-szürke utókép méréseket végeztünk 16 tesztalanyal.

3.3.1. Mérési elrendezés

A vizsgálatok azonos körülményeit biztosítva, a méréseket a Széchenyi Egyetemen végeztük, ugyanazon vizsgálati helyiségben, ugyanazon megjelenítővel és egységes elrendezéssel (42. ábra).



42. ábra

Utókép mérési elrendezés (az ábra arányai torzítottak).

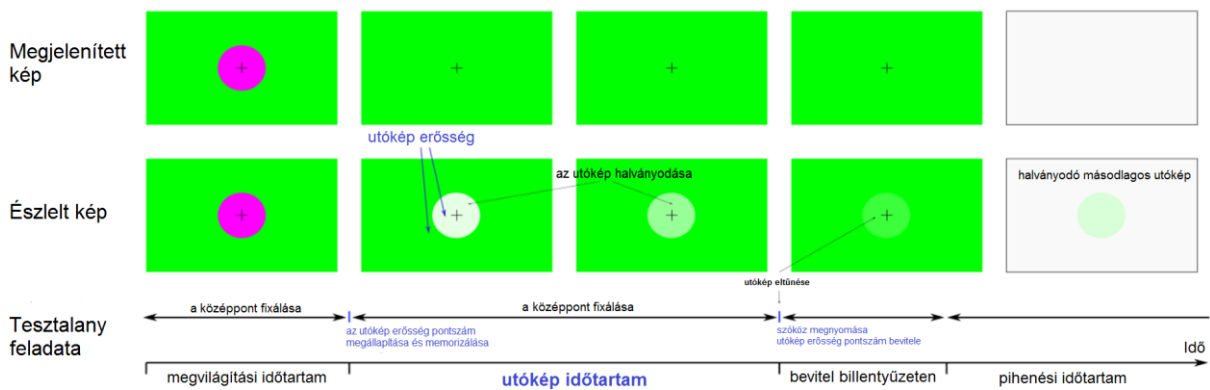
3.3.2. A mérések menete

Két mérési sorozatot hajtottunk végre: a színes-színes színátmeneteket a szimulációból kiválasztott gamut pontokkal végeztük, majd ennek megerősítésére folytattuk a színes-szürke utókép mérésekkel.

Minden tesztalany mérésénél ugyanazokat a színátmeneteket vizsgáltuk, randomizált sorrendben.

A méréseket a Témavezetőm által Python nyelven készített VirtColTest alkalmazással végeztük. A mérésekben első lépésként egy fixálandó színes körlap volt látható adott színű háttérben. A fixálási időtartam („megvilágítási időtartam”) elteltével a színes körlap az alkalmazásnak megfelelően hirtelen eltűnt, és az adott színű homogén háttér vált láthatóvá (43. ábra). Részleteiben tehát a tesztalanyok az alkalmazás hangutasításait követve,

- a képen a középponti körben látható keresztet fixálták 30 másodpercig (43. ábra, 1. oszlop),
- a kör hirtelen eltűnését követően (43. ábra, 2. oszlop) memorizálták a megjelenő utókép erősségét (43. ábra, 2. oszlop),
- megfigyelték az utókép lecsengését (43. ábra, 3. oszlop),
- majd az utókép eltűnését billentyüleütéssel jelezték (43. ábra, 4. oszlop),
- a billentyüleütés után következett 60 másodpercig a fehér képernyő (pihenés, 43. ábra, 5. oszlop). A memorizált utókép erősséget a tesztalany ebben a szakaszban adta meg a megfelelő számbillentyűvel (ld. következő oldal).



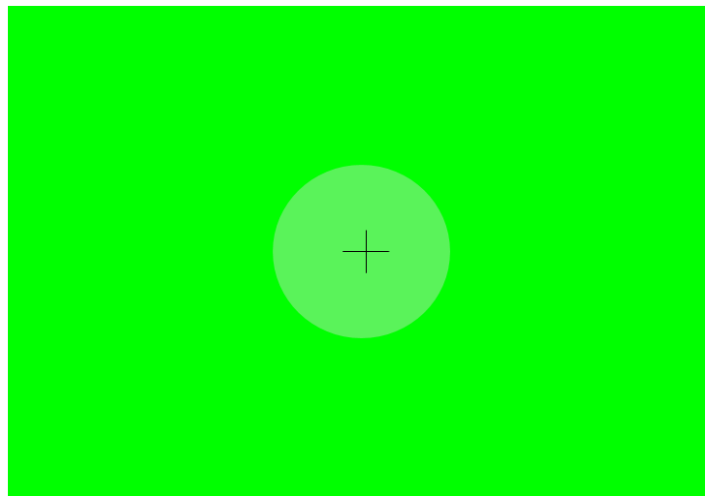
43. ábra

Egy utókép mérése [S5], [S6]

Az utókép időtartamot a VirtColTest alkalmazás századmásodperc pontossággal rögzítette, az eredményeknél ezt tizedmásodpercre kerekítettük.

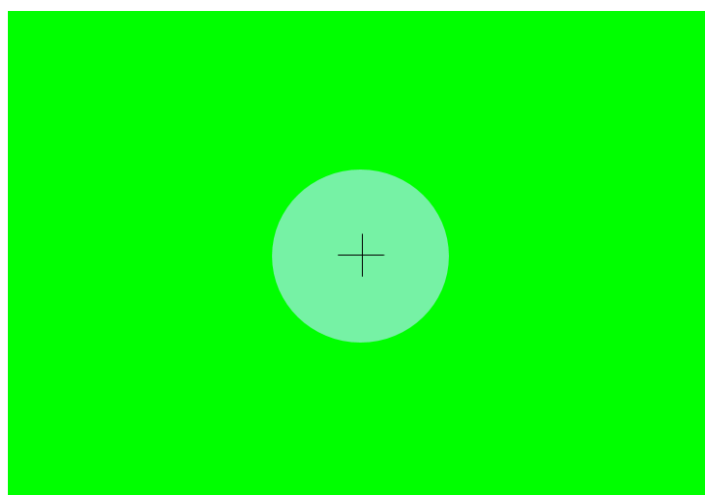
A színes-színes mérésorozatban az utókép erősséget a tesztalanyok 0-3 közötti egész számként értékelték, miszerint:

- 0: nincs utókép
- 1: enyhe utókép erősség (44. ábra)



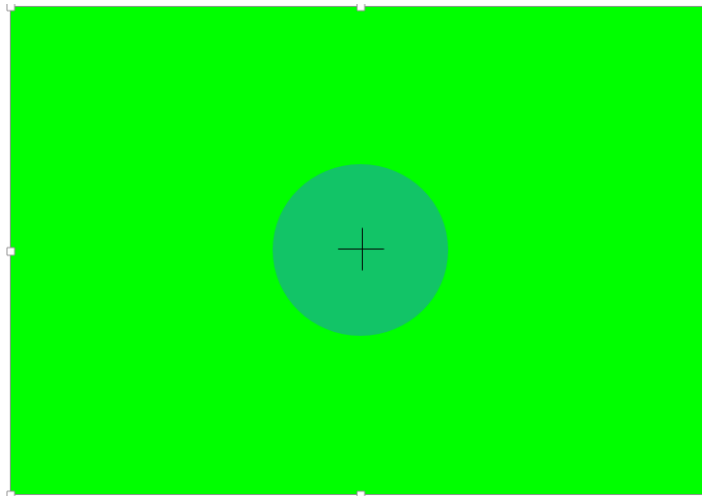
44. ábra
Enyhe erősségű utókép

- 2: közepes utókép erősség (45. ábra)



45. ábra
Közepes erősségű utókép

- 3: erős utókép (46. ábra)



46. ábra
Erős utókép

A színes-szürke átmeneteknél a tesztalanyok az utókép erősséget 0-9 közötti egész számként értékelték az alábbiak szerint:

- 0: nincs utókép
- 1-3: enyhe erősségű utókép
- 4-6: közepes erősségű utókép
- 7-9: erős utókép

A színes-színes és a színes-szürke méréssorozatokban a következő mérési körülményeket biztosítottuk:

- valamennyi tesztalany ugyanazt a megjelenítőt (Hewlett-Packard ZR2440w), és ugyanazokat a beállításokat kapta.
- valamennyi tesztalany ugyanannál az asztalnál, ugyanabban a székben ült, pontosan szemből nézte a megjelenítőt, 70 cm-es merőleges távolságból.
- a fixálandó színes körlap szögmérete mindig 10 fok, a megjelenítő oldalsó széleinek szögmérete mindig 30 fok volt.
- valamennyi tesztalany kétszemes együttlátással figyelte a megjelenítőt.
- a helyiség megvilágításával biztosítottuk az azonos környezeti megvilágítást (300 lux).
- valamennyi tesztalany rendszeresen pislogott az utókép megfigyelése során [Powell et al., 2015], és az utókép eltűnését jelentette, amikor már pislogást követően sem volt észlelhető utókép.

Egy tesztalanyra nézve a vizsgálat a következő részekből állt:

- bevezető fázis: a színes-színes méréssorozatban a tesztalanyoknak egy gyenge és egy erős utóképet kiváltó színátmenetet mutattunk be. A színes-szürke méréssorozatban a tesztalanyoknak egy közepes erősségű utóképet kiváltó színátmenetet mutattunk be.
- mérési fázis: a színes-színes méréssorozat esetében 9-féle színátmenet által kiváltott utóképek erősségeit és időtartamot mértünk. A színes-szürke méréssorozatban 12-féle színátmenet által kiváltott utóképek erősségeit és időtartamot mértünk.

Utóképek méréseink paramétereit a 10. táblázat veti össze Kline és Nestor munkájával.

10. táblázat
Saját mérési módszer összehasonlítása Kline és Nestor publikált módszerével
[Kline, Nestor, 1977]

<i>Paraméter</i>	<i>Kline és Nestor méréssorozata</i>	<i>A mi méréssorozataink</i>
<i>Színátmenet</i>	zöld-vörösből fehér	színes-színes, színes-szürke
<i>Fixálási színek</i>	vörös szín zöld háttéren	9 gamut menti színből másikkra váltás 12 színről szürkére váltás
<i>Háttér színek</i>	fehér	9 szín illetve szürke
<i>Pihenő</i>	fehér, több perc	fehér, 60 mp fehér, 30 mp
<i>Fixálás időtartam</i>	30, 60, 90 s randomizált	30 s 20 s
<i>Utóképek időtartam</i>	tesztalany szóbeli jelzéséig, 3 egymás utáni pislogás után se látja már	tesztalany space-t nyom, 2-3 egymás utáni pislogás után se látja már
<i>Utóképek erősség</i>	nincs	színes-színes méréssorozatban 0-3 közötti értékelési tartomány, színes-szürke méréssorozatban 0-9 közötti értékelési tartomány
<i>Fixált szín fényűrűség</i>	111 candela/m ² (35 millilambert (mL))	színes-színes méréssorozatban változó (45 – 300 cd/m ²) színes-szürke méréssorozatban állandó (76,3 cd/m ²)
<i>Adott színű háttér fényűrűség</i>	213 cd/m ² (67 mL)	színes-színes méréssorozatban változó (45 – 300 cd/m ²) színes-szürke méréssorozatban állandó (76,3 cd/m ²)
<i>Pihenő fényűrűség</i>	nincs adat (közelítőleg ld. környezeti fényűrűség)	színes-színes méréssorozatban 350 cd/m ² színes-szürke méréssorozatban 350 cd/m ²
<i>Környezeti megvilágítás</i>	191 cd/m ² (60 mL)	300 lux

<i>Inger geometria</i>	fixált alakzat: 2,5x2,5 cm (2,5° alatt) háttér: 17x20 cm, azaz 33,84°x39,28° megfigyelés távolsága 22 col (55,88 cm)	fixált alakzat 10° alatt, a megjelenítő oldalsó szélei 30° alatt láthatók megfigyelés távolsága 70 cm
<i>Korcsoportok</i>	18 fiatal 17-23 éves (átlag: 18.8 év) 18 idős 51-83 éves (átlag: 62.1 év)	színes-színes méréssorozatban 41 év alatt: 26 (22-40) 41 évtől: 15 (41-61) színes-szürke méréssorozatban 41 év alatt: 8 (19-40) 41 évtől: 8 (41-62)
<i>Nemek eloszlása</i>	férfi:nő = 1:1	férfi:nő ≈ 2:1
<i>Látásellenőrzés</i>	élességvizsgálat, min. 20/30 Snellen	szemüveg viselése látásélességi hiba esetén (a méréssorozatok tesztalanyainál erre nem volt szükség).

3.3.3. Utókép kiváltáshoz választott színátmenetek

Színes-színes és színes-szürke méréssorozatunkhoz egyaránt ugyanazt az IPS megjelenítőt (HP ZR2440w, sorozatszám: CNT2130190) alkalmaztuk. Az alábbiakban feltüntetett betűk a következő alapszíneknek felelnek meg.

R = (red) vörös

G = (green) zöld

B = (blue) kék

A betűk melletti számok adott szín gamut menti árnyalatának számszerűsített intenzitását jelölik.

Színes-színes utókép méréssorozatunkban 9 színátmenet, azaz az R2G2→B, B→G, B2R2→G, B→R2G2, G→B2R2, R→G2B2, G1B3→R, R→G és G2B2→R színátmenetek által kiváltott utóképeket vizsgáltuk (3.1.2 fejezet, 30. ábra, HPZR2440w megjelenítő gamut pontok).

A színátmenetekhez rendelt színkódok a Függelék F2. fejezetében követhetők.

Python nyelven készült VirtColTest alkalmazással a színátmenetek egyes színeinek képernyőn történő megjelenítéséhez szükséges volt megadni a megfelelő RGB színsaturna értékeket.

A vörös-zöld-kék megjelenítő szín alappontok RGB színsaturna értékek a következők voltak:

R=(255, 0, 0), G=(0, 255, 0), B=(0, 0, 255).

A további 9 színt a gamut háromszög egyes élein az RGB alappontok közti egyenlő arányban elhelyezkedő három gamut pont jelentette. Például: R3G1=(225, 143, 0), R2G2=(191, 191, 0), R1G3=(143, 226, 0).

Ugyanezt a módszert alkalmaztuk a G-B és a B-R gamut háromszög élein. A R2G2→B, B→G, B2R2→G, B→R2G2, G→B2R2, R→G2B2, G1B3→R, R→G és G2B2→R színátmeneteket vizsgáltuk.

A 11. táblázat mutatja a színes-színes mérésben alkalmazott 12 szín számított RGB színcsatorna értékeit. Továbbá, a megjelenítő fénysűrűségmérésével meghatároztuk az egyes színekhez tartozó fénysűrűséget (L). L segítségével az utókép mérési eredmények további értékeléséhez kiszámítottuk a 12 szín CIE L*a*b* színességi koordinátáit [Schanda, 2007]. Erre azért volt szükség, mert a CIE L*a*b* színességi koordináta-rendszer önmagában egyenletes színingertér, amelyben a színátmenetek irányszöge meghatározható.

11. táblázat
A színes-színes méréssorozathoz felhasznált színek CIE RGB és CIE L*a*b* rendszerben

Szín azonosító	R	G	B	L [cd/m ²]	L*	a*	b*
R	255	0	0	66.1	52.6	67.0	51.8
R3G1	226	143	0	102.5	63.4	18.2	64.8
R2G2	191	191	0	138.9	71.8	-20.6	74.5
R1G3	143	226	0	175.3	78.9	-53.4	82.3
G	0	255	0	211.7	85.1	-82.3	89.1
G3B1	0	226	143	169.3	77.8	-63.6	30.7
G2B2	0	191	191	126.9	69.2	-40.1	-10.3
G1B3	0	143	226	84.6	58.4	-8.4	-48.4
B	0	0	255	42.2	43.0	41.6	-90.9
B3R1	143	0	226	48.2	45.7	49.5	-69.4
B2R2	191	0	191	54.2	48.2	56.1	-44.3
B1R3	226	0	143	60.1	50.4	61.9	-11.6

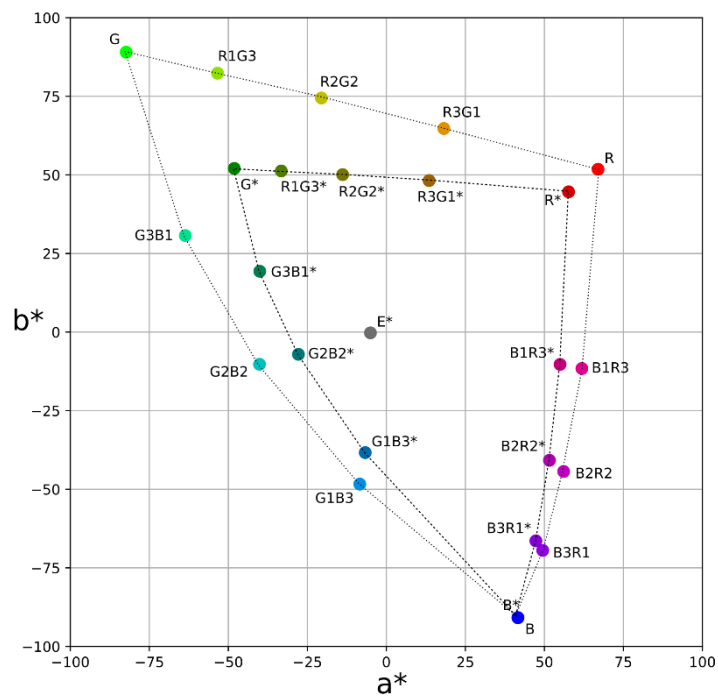
A 11. táblázatban szereplő L értékek különbözősége mutatja, hogy a gamut élein felvett 12 szín fénysűrűsége (L – candela/m² / cd/m²) illetve L*a*b* szerinti fényessége (L*) eltérő. Ebből következik, hogy az utóképek időtartamát a színátmenetek fényessége befolyásolja. Színes-szürke méréssorozatunkban a színátmeneteket úgy határoztuk meg, hogy egységes fénysűrűségük legyen. Így mindegyik szín L* értékét a legkisebb fénysűrűségű színhez igazítottuk (kék szín, 12. táblázat: B*). A színátmenetek második színe egységesen szürke volt (12. táblázat E*). A színes-szürke mérésekben alkalmazott színeket a 12. táblázat összesíti. Színes-szürke utókép méréssorozatunkban az R*→E*, R3G1*→E*, R2G2*→E*, R1G3*→E*,

$G^* \rightarrow E^*$, $G3B1^* \rightarrow E^*$, $G2B2^* \rightarrow E^*$, $G1B3^* \rightarrow E^*$, $B^* \rightarrow E^*$, $B3R1^* \rightarrow E^*$, $B2R2^* \rightarrow E^*$ és $B1R3^* \rightarrow E^*$ színátmenetek által kiváltott utókép erősséget és időtartamot vizsgáltuk.

12. táblázat
A színes-szürke kísérletsorozathoz felhasznált színek CIE RGB és CIE $L^*a^*b^*$ rendszerben

Szín azonosító	R	G	B	L [cd/m ²]	L*	a*	b*
E*	109	109	109	42.2	43.0	-5.0	-0.3
R*	211	0	0	42.2	43.0	57.7	44.6
R3G1*	156	98	0	42.2	43.0	13.5	48.2
R2G2*	116	116	0	42.2	43.0	-13.8	50.1
R1G3*	79	124	0	42.2	43.0	-33.2	51.2
G*	0	130	0	42.2	43.0	-48.1	52.0
G3B1*	0	126	80	42.2	43.0	-40.0	19.3
G2B2*	0	120	120	42.2	43.0	-27.8	-7.1
G1B3*	0	107	169	42.2	43.0	-6.7	-38.4
B*	0	0	255	42.2	43.0	41.6	-90.9
B3R1*	135	0	214	42.2	43.0	47.3	-66.4
B2R2*	172	0	172	42.2	43.0	51.6	-40.8
B1R3*	195	0	123	42.2	43.0	55.0	-10.3

A két kísérletsorozatban szereplő színességi koordinátákat kétdimenziósan, az a^*b^* színességi koordinátákkal a 47. ábra szemlélteti.



47. ábra

Színes-színes és színes-szürke méréssorozat színei a CIE a^*b^* síkon [S7]

3.3.4. Vizsgálati sorozatok

A színes-színes méréssorozatban telített színeket alkalmaztunk a fixálási színekre és a háttérszínekre egyaránt. Ezzel szemben a színes-szürke méréssorozatban csak a fixálási színek voltak telítettek (13. táblázat). E beállítás különbség magyarázza megfigyelésünket az előzetes vizsgálatoknál: a színes-színes méréssorozatban jóval hosszabb megvilágítási és pihenési időre volt szükség, mint a színes-szürke méréssorozatban.

A mérés időtartama lényeges volt a tesztalany kifáradásának elkerülésére. Ebből következően, méréseink időtartama maximum 40 perc volt. Az időtartam maximuma korlátozta a mérhető színátmenetek számát, de a színes-szürke átmenetekenél jutott idő a 12 szín lemérésére. A színátmenetek számát a 13. táblázat mutatja.

13. táblázat
Színes-színes és színes-szürke méréssorozat: színátmenetek száma és fixálási időtartamok

Méréssorozat	Fixálási időtartam	Pihenési időtartam	Színátmenetek száma
színes-színes	30 s	60 s	9
színes-szürke	15 s	20 s	12

A színes-színes méréssorozatban vizsgált színátmenetek 1. (színátmenetet megelőző, fixált) és 2. (színátmenetet követő, háttér) színeit a 14. táblázat, a színes-szürke méréssorozatban vizsgált színátmenetek színeit a 15. táblázat mutatja. ΔC az egyes színátmenetek szíkontrasztját jelzi, a színátmenetek 1.(színátmenetet megelőző, fixált) és 2. (színátmenetet követő, háttér) színe a^*b^* színességi koordinátáinak geometriai távolságával kifejezve. A ΔE^* az egyes színátmenetek erősségét jelzi, a színátmenetek 1. (színátmenetet megelőző, fixált) és 2. (színátmenetet követő, háttér) színe $L^*a^*b^*$ színességi koordinátáinak geometriai távolságával kifejezve.

ΔE^* értékét a ΔL^* és a ΔC értékekből számítottam a következőképpen: $\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta C^2)^{1/2}$.

14. táblázat
Színes-színes színátmenetek

1. szín	2. szín	ΔL^*	ΔC	ΔE^*
G2B2	R	-16.7	123.8	124.9
G1B3	R	-5.9	125.3	125.4
B	R2G2	28.8	176.6	178.9
B	G	42.0	218.5	222.5
B2R2	G	36.9	192.2	195.7
R	G	32.5	153.9	157.3
R	G2B2	16.7	123.8	124.9
R2G2	B	-28.8	176.6	178.9
G	B2R2	-36.9	192.2	195.7

15. táblázat
Színes-szürke színátmenetek

1. szín	2. szín	ΔL^*	ΔC	ΔE^*
G2B2*	E*	0.0	23.8	23.8
G1B3*	E*	0.0	38.1	38.1
B*	E*	0.0	101.9	101.9
B3R1*	E*	0.0	84.4	84.4
B2R2*	E*	0.0	69.7	69.7
B1R3*	E*	0.0	60.8	60.8
R*	E*	0.0	77.1	77.1
R3G1*	E*	0.0	51.9	51.9
R2G2*	E*	0.0	51.1	51.1
R1G3*	E*	0.0	58.7	58.7
G*	E*	0.0	67.8	67.8
G3B1*	E*	0.0	40.1	40.1

A színes-színes méréssorozat (14. táblázat) erősebb színátmeneteket (magasabb ΔE^*) mutat, mint amit a színes-szürke méréssorozatban tapasztaltunk (alacsonyabb ΔE^* , 15. táblázat). Ezért a színes-szürke méréssorozatban a színes-színes méréssorozathoz képest elegendő volt a rövidebb fixálási és pihenési időtartam.

3.3.5. Tesztalanyok

Tekintve, hogy az utókép erősség és időtartam összefüggését néztük a kor és a nem függvényében, méréseinket igyekeztünk a lehető legtöbb tesztalannyal elvégezni. Így

méréseinket kiterjesztettük idősebb és fiatalabb férfi és nő tesztalanyokra. A 16. táblázat mutatja a méréssorozatok kor és nem szerinti eloszlását.

16. táblázat
A tesztalanyok csoportjai

Sorozat		Kor \leq 40	Kor $>$ 40	Összesen
Színes-színes	Nő	10	5	15
	Férfi	16	10	26
	Összesen	23	18	41
Színes-szürke	Nő	3	3	6
	Férfi	5	5	10
	Összesen	7	9	16

Megjegyzés: egyik tesztalany sem szenvedett ismert színlátási rendellenességben. Rövidlátás, távollátás esetén, elméletben, színtelen szemüveglencse, illetve színtelen kontaktlencse viselete lett volna a megoldás.

3.3.6. Eredmények rögzítése

Az eredményeket CSV fájlformátumban rögzítette a Python nyelven készült VirtColTest alkalmazás. A tesztalanyok mérési eredményeinek rögzítését a következőképpen oldottuk meg: „test”- $\{VezetéknévKeresztnév\}$ - $\{nem\}$ - $\{kor\}$. A vezetéknéveket és a keresztnéveket jelen disszertációmban anonim módon rendszerezem. Például: „test-AbcDef-ferfi-34”. A CSV fájl felépítésének egy példáját az alábbi 13 sor szemlélteti:

```
Mon Apr 8 08:05:36 2019
9;3; 49.81;2
3;9; 26.84;3
12;5; 43.62;1
1;9; 75.03;3
1;7; 61.74;3
5;9; 45.49;1
5;11; 42.36;3
11;5; 35.36;3
7;1; 43.59;1
```

A méréssorozatok eredményeinek feldolgozását az általam e célra fejlesztett Java alkalmazással végeztem. Az eredmények statisztikai és klaszteranalízisét a Java alkalmazásba beépített Apache Commons Math 3.6 API modullal végeztem.

3.4. Önmérés

Önmérési módszerrel (azaz: saját magamon saját magam által végzett méréssel) a 2. tételben szereplő két megjelenítő típuson kiváltott virtuális színérzet erősségét és időtartamát hasonlítottam össze. Az önmérési módszer hátránya, hogy csak egy tesztalanyra jellemző eredményt ad, és értelemszerűen alacsony a mintaszám. Azért választottam mégis ezt a módszert, mert így kizárhatóvá vált a több tesztalanyal végzett mérésorozat eredményeinek igen magas varianciája, amely elfedheti a két megjelenítő típuson kiváltott virtuális színérzet erősségében és időtartamában megmutatkozó reális különbségeket. Az önmérés a 3.3. fejezetben leírt színes-színes mérésorozat módszerére épül, a következő módosításokkal:

- a kiváltott utókép erősségének értékelésében a 0 - 9 terjedelmű tartományt jelöltem meg az alábbiak szerint:
 - 0: nincs utókép,
 - 1-3: enyhe erősségű utókép,
 - 4-6: közepes erősségű utókép,
 - 7-9: erős utókép.
- Az önmérési mérésorozatban három párhuzamos mérést végeztem.

A 2.7. fejezetben részletezett célkitűzéseim 3. – 3.4. fejezet szerinti szimulációs számítási és mérési megvalósításának eredményeit a 4.1. - 4.4. fejezetekben felállított tétispontokban mutatom be.

Eredmények, Tézisek

4. Eredmények, Tézisek

4.1. - 1. téziscsoport

1.1. tézis: [S1]

Numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulált hirtelen színátmenetekkel elérhető, hogy CCFL, LCD-TN, RGB LED és háromszínű lézer megjelenítőkön gamuton kívüli és színpatkón belüli utóképet, azaz relatív virtuális színérzetet érzékeljünk.

Bizonyítás

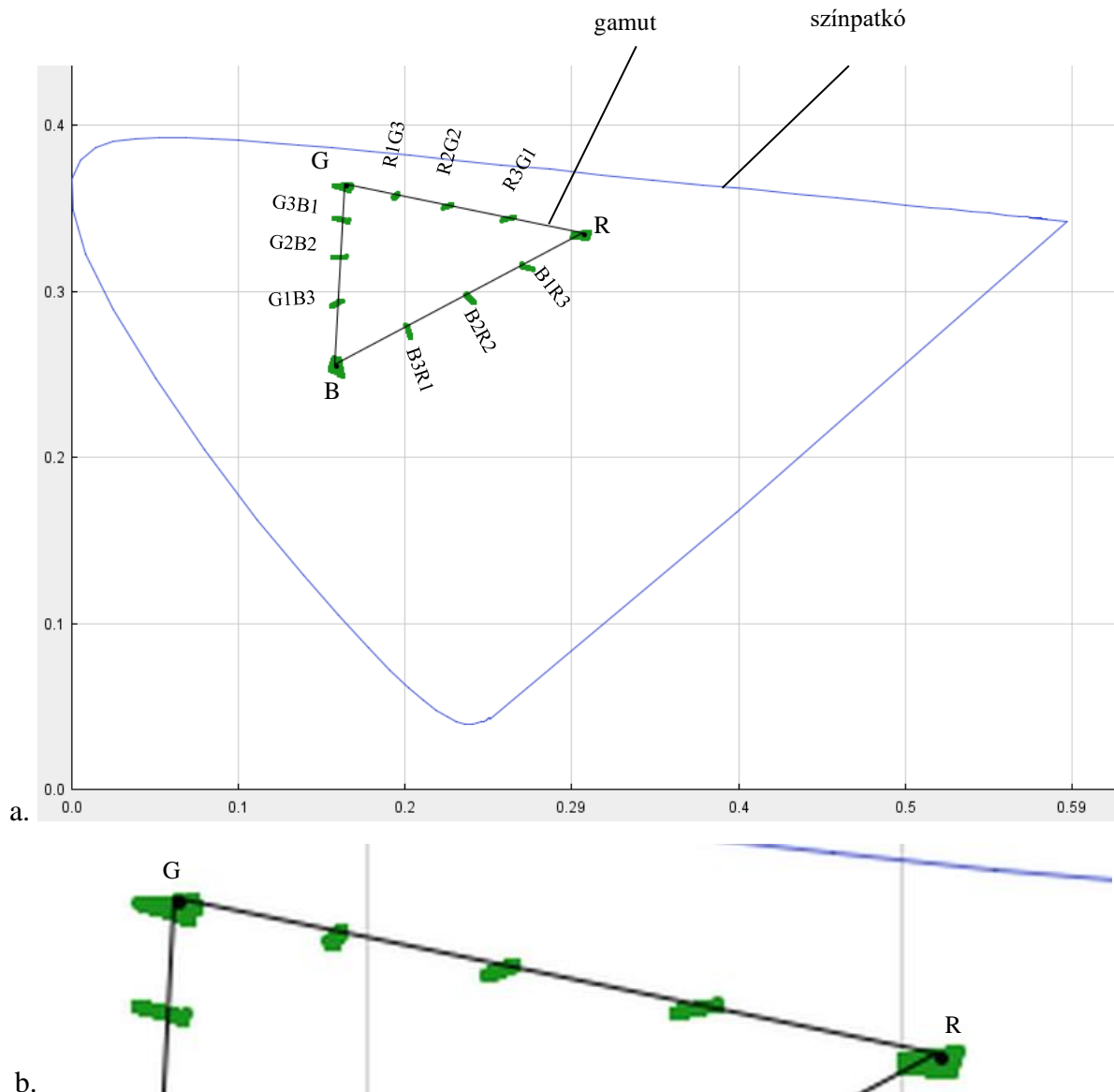
Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modellel végzett szimuláció segítségével különböző színátmenetekre számított virtuális színérzetek halmazát CIE 1976 u'v' rendszerben ábrázoltam a színpatkóval és a megjelenítő gamuttal összevetve. A szimuláció bemeneti paramétereként tekintett RGB LED megjelenítő gamut irodalmi adat [Guenther, Steel 2018], a CCFL és IPS megjelenítők gamutja munkámban mért adatok.

Vizsgálataimban arra kerestem választ, hogy mely megjelenítő típusokkal érzékelhető a hirtelen színátmenettel kiváltott relatív és valódi virtuális színérzet (disszertáció 2.6. fejezet). Az 1.1. tézisben az általam kidolgozott numerikus kinetikai modell szimulációs alkalmazásával grafikusán vizsgáltam, hogy megjelenítő típustól függetlenül elérhető-e gamuton kívüli, relatív virtuális színérzet.

CCFL (Acer 1670) és IPS (HPZR2440w, sorozatszám: CNT2130190) megjelenítőknél a munkámban mért (disszertáció 3.1.3. fejezet) gamuttal, RGB LED és háromszínű lézeres megjelenítőknél az irodalom szerinti gamuttal (disszertáció 2.5.2. fejezet) végeztem el a szimulációt. A szimuláció módszere a disszertáció 3.2. fejezetében olvasható részletesen.

Az egyes színátmenetekkel kiváltott virtuális színérzetek halmazát (disszertáció 3.1.1. fejezet 7. táblázat, 2. és 3...n. iterációs lépések) CIE 1976 u'v' színességi koordináta-rendszerben a VirtColSim nevű, Java környezetben futtatott alkalmazással (disszertáció 3.2.3. fejezet) generált diagramokon zöld színű szakaszokkal ábrázolom (48-51. ábra). Azt vizsgáltam, hogy a virtuális színérzet halmaz tartalmaz-e gamuton kívüli részhalmazt, azaz, hogy érzékelhető-e gamuton kívüli utókép, relatív virtuális színérzet.

A 48.a. és 48.b. ábra a CCFL megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció grafikus eredményét mutatja.



48. ábra

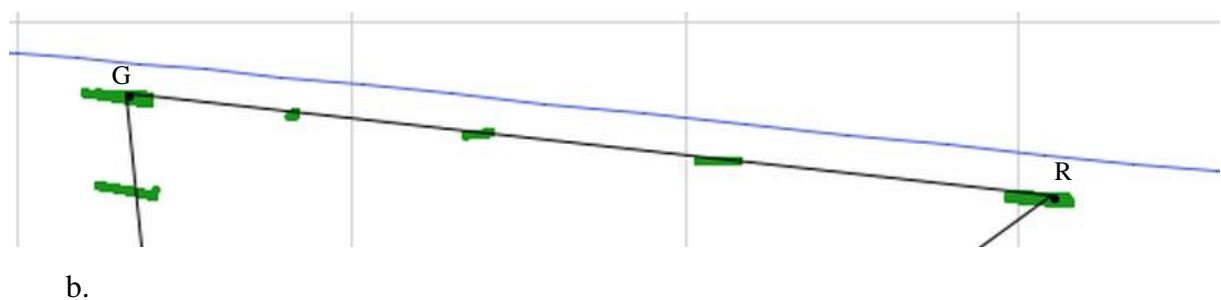
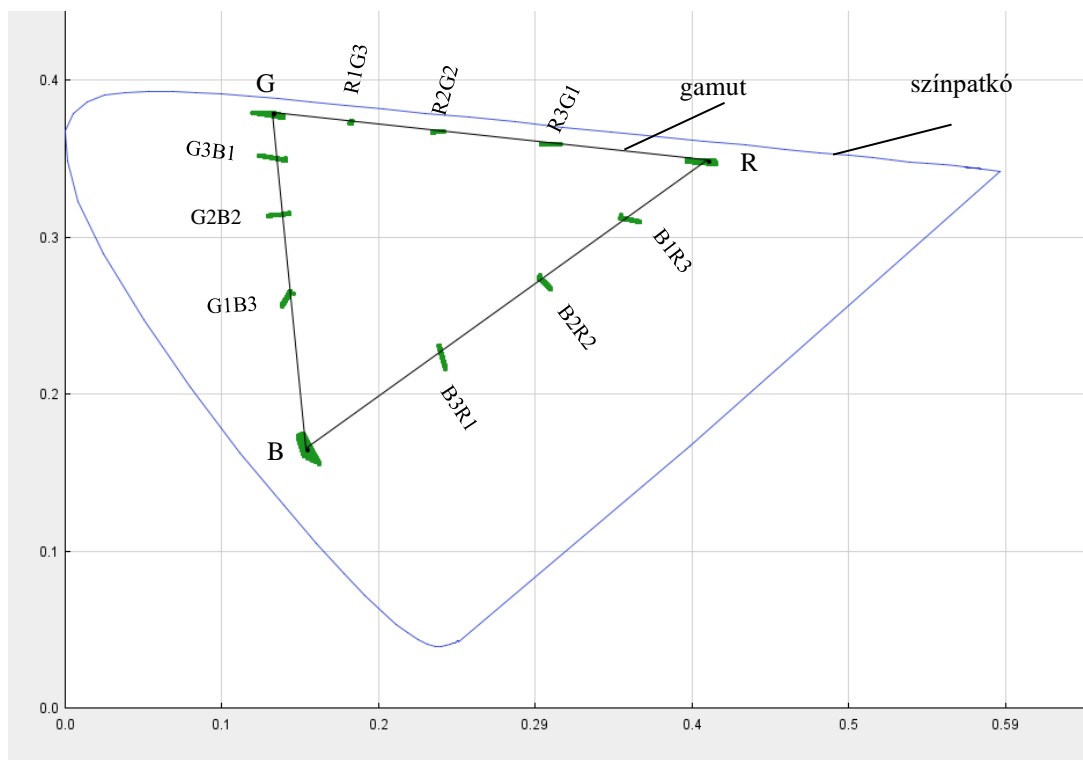
a. CCFL megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 $u'v'$ színességi koordináta-rendszerben.

b. Gamut háromszög G-R él kinagyítva

A gamut háromszög valamennyi gamut pontjánál a virtuális színérzetek halmaza részben a megjelenítő gamuton kívül (48.a. és 48.b ábrán a gamut éleken túlnyúló zöld szakaszok) és teljesen a színpatkón belül helyezkedik el. Következésképpen, CCFL megjelenítőn relatív virtuális színérzet érzékelhető.

Az 49.a. és 49.b. ábra IPS megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció grafikus eredményét mutatja.

CCFL megjelenítőhöz hasonlóan, IPS megjelenítő esetében is a gamut háromszög valamennyi jelzett pontjánál a virtuális színérzetek halmaza részben a megjelenítő gamuton kívül (ábrán a gamut éleken túlnyúló zöld szakaszok) és teljesen a színpatkón belül helyezkedik el. Következésképpen, IPS megjelenítőn relatív virtuális színérzet érzékelhető.



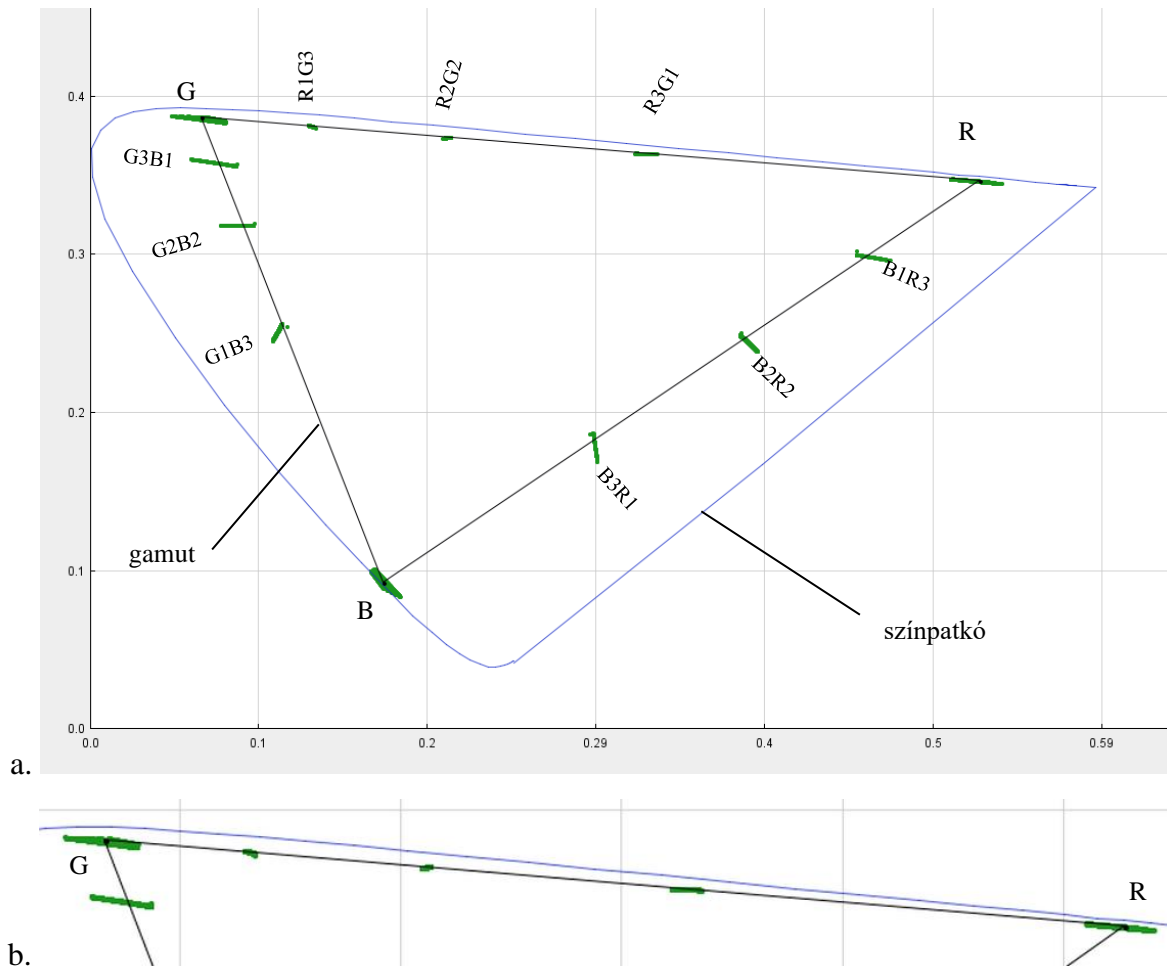
49. ábra

a. IPS megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 u'v' színességi koordináta-rendszerben.

b. Gamut háromszög G-R él kinagyítva

Az 50. ábra RGB LED megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció grafikus eredményét mutatja. A virtuális színérzetek halmaza B gamut ponttól eltekintve, valamennyi gamut pontnál részben

a megjelenítő gamuton kívül (ábrán a gamut éleken túlnyúló zöld szakaszok) és teljesen a színpatkón belül helyezkedik el. Következésképpen, RGB LED megjelenítőn relatív virtuális színérzet érzékelhető.

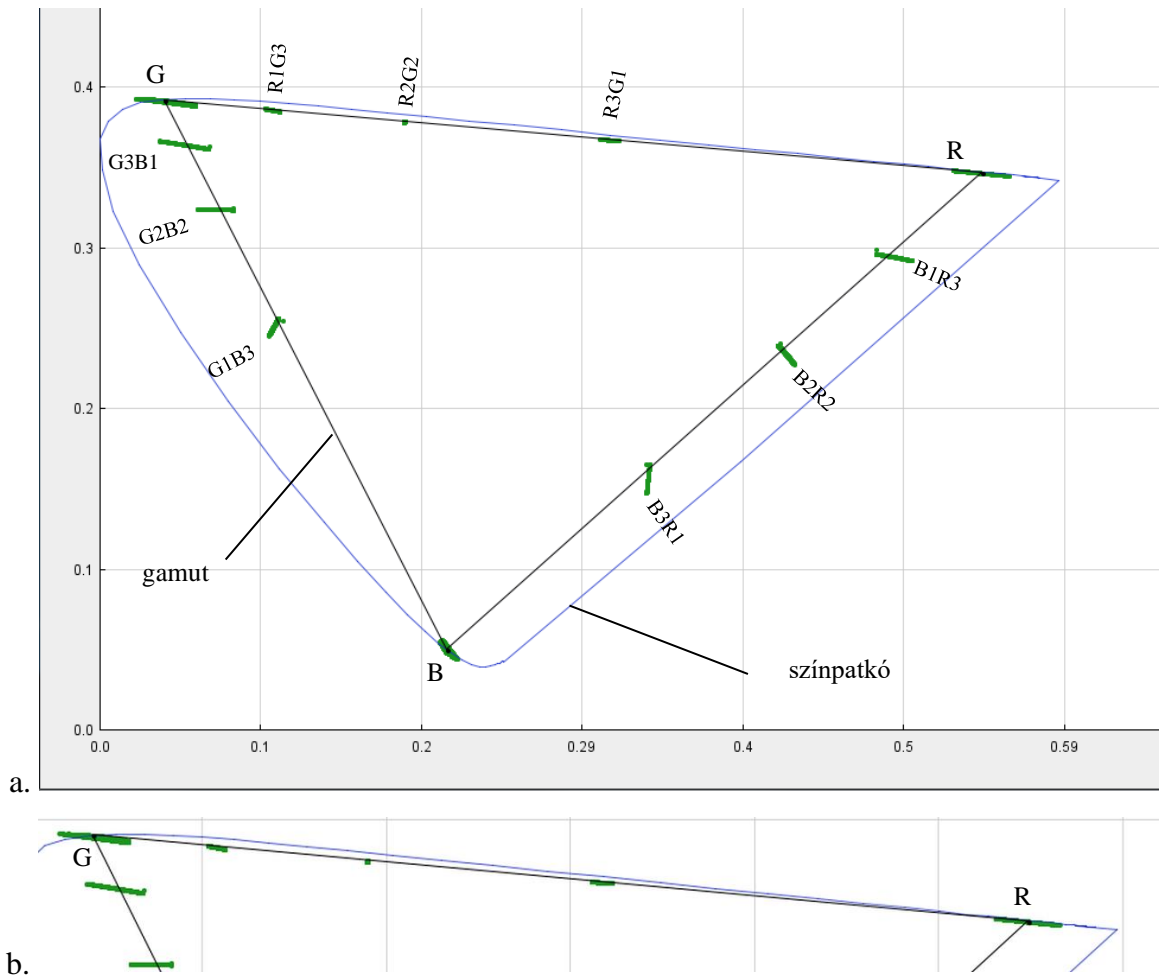


50. ábra

a. RGB LED megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 $u'v'$ színességi koordináta-rendszerben.

b. Gamut háromszög G-R él kinagyítva

Háromszínű lézeres megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció eredményét az 51. ábra szemlélteti. A virtuális színérzetek halmaza R2G2 kivételével valamennyi gamut pontnál részben a megjelenítő gamuton kívül és teljesen a színpatkón belül helyezkedik el. Következésképpen, háromszínű lézeres megjelenítőn relatív virtuális színérzet érzékelhető.



51. ábra

- a. Háromszínű lézeres megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 $u'v'$ színességi koordináta-rendszerben.
 b. Gamut háromszög G-R él kinagyítva

Összegzés

Numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulált hirtelen színátmenetekkel CCFL, IPS, RGB LED és háromszínű lézeres megjelenítők mindegyikén érzékelhető hirtelen színátmenettel kiváltott gamuton kívüli és színpatkón belüli utókép, azaz relatív virtuális színérzet.

1.2. tézis: [S1], [S2]

Numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulált hirtelen színátmenetekkel a CCFL és IPS megjelenítőkön csak gamuton kívüli és színpatkón belüli utókép, azaz relatív virtuális színérzet tapasztalható. RGB LED és háromszínű lézeres megjelenítőkön megközelíthető színpatkón és gamuton kívüli utókép, azaz valódi virtuális színérzet.

Bizonyítás

Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modellel végzett szimuláció segítségével különböző színátmenetekre számított virtuális színérzetek halmazát CIE 1976 u'v' rendszerben ábrázoltam a színpatkóval és a megjelenítőre jellemző gamuttal összevetve. A szimuláció bemeneti paraméterének tekintett CCFL és IPS megjelenítő gamutok munkámban mért adatok. Az RGB LED és háromszínű lézeres megjelenítő gamutok irodalmi adat [Guenther, Steel, 2018].

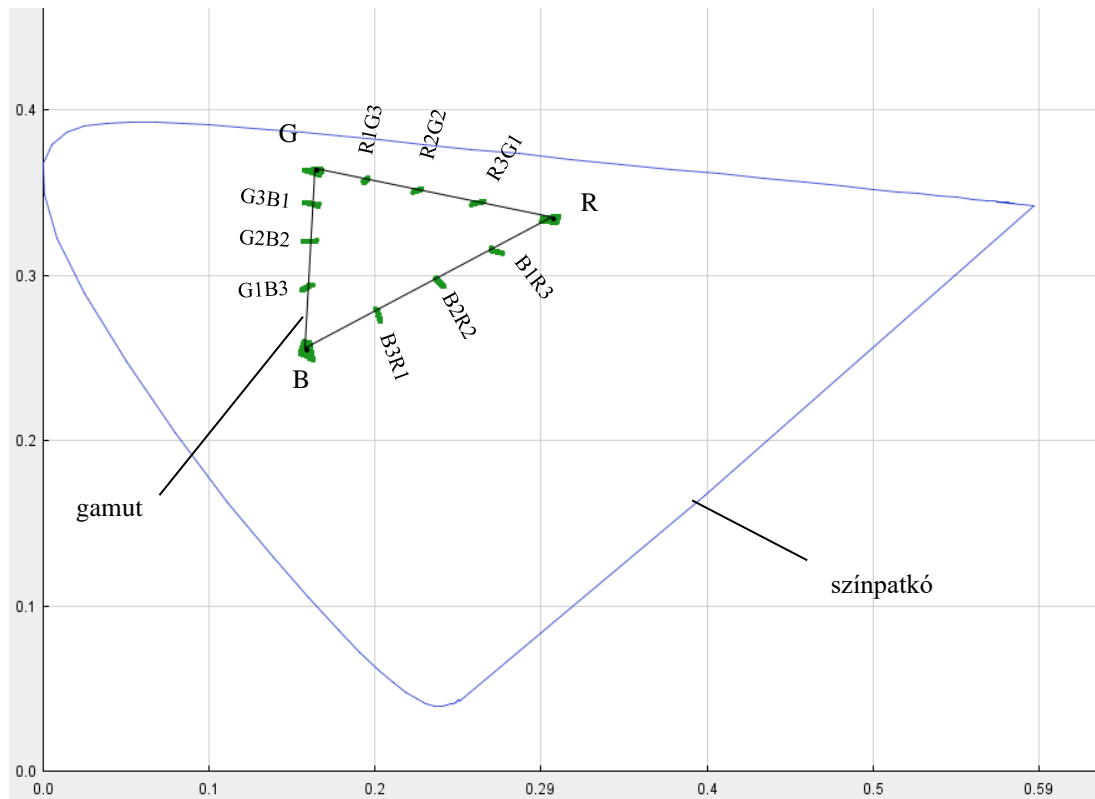
Vizsgálataimban arra kerestem választ, hogy milyen megjelenítő típusokon lehetséges hirtelen színátmenettel kiváltott relatív és valódi virtuális színérzetet kelteni. Az 1.2. tézisben az általam kidolgozott numerikus kinetikai modell szimulációs alkalmazásával grafikusán vizsgáltam, hogy a megjelenítő típustól függetlenül elérhető-e gamuton és színpatkón kívüli, azaz valódi virtuális színérzet.

CCFL (Acer 1670) és IPS (HPZR2440w, sorozatszám: CNT2130190) megjelenítőknél a munkámban mért gamutokkal (disszertáció 3.1.3. fejezet), RGB LED és háromszínű lézeres megjelenítőknél az irodalom szerinti gamutokkal (disszertáció 2.5.2. fejezet) végeztem a szimulációs számításokat. A módszert a disszertáció 3.2. fejezetében részletezem.

Az egyes színátmenetekkel kiváltott virtuális színérzetek halmazát (disszertáció 3.1.1. fejezet 7. táblázat, 2. és 3...n. iterációs lépések) CIE 1976 u'v' színességi koordináta-rendszerben a VirtColSim nevű, Java környezetben futtatott alkalmazással (disszertáció 3.2.3. fejezet) generált diagramokon zöld színű szakaszokkal ábrázolom (52-55. ábra). Azt vizsgáltam, hogy a virtuális színérzet halmaz tartalmaz-e gamuton és színpatkón kívüli részhalmazt, azaz, tapasztalható-e valódi virtuális színérzet.

Az 52. ábra CCFL megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció grafikus eredményét mutatja.

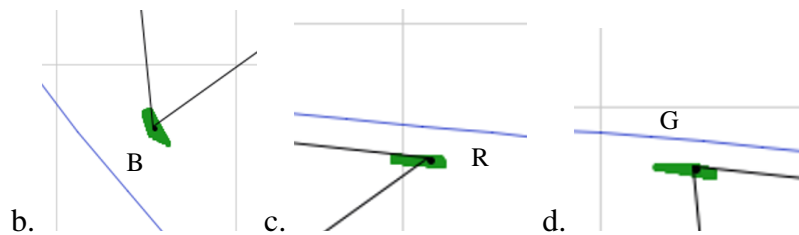
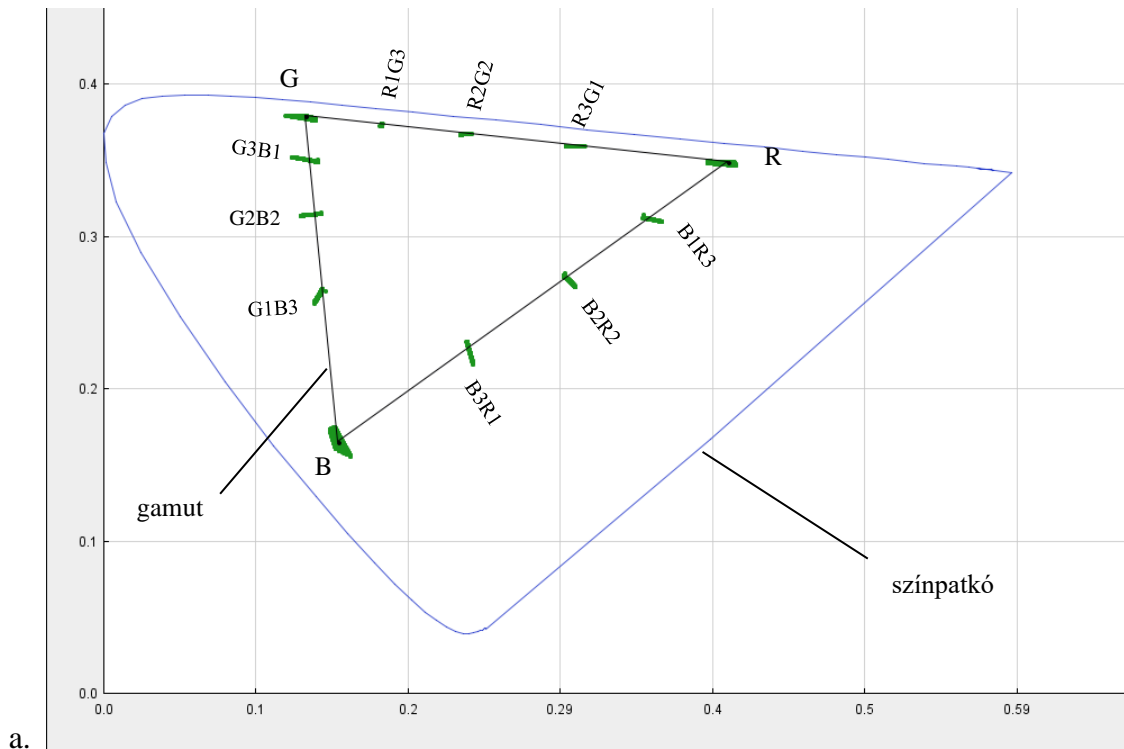
A gamut háromszög valamennyi jelölt pontjánál a virtuális színérzetek halmaza részben a megjelenítő gamuton kívül helyezkedik el és teljesen a színpatkón belül marad, azaz CCFL megjelenítón csak relatív virtuális színérzet tapasztalható.



52. ábra
Szimulációs eredmények CCFL megjelenítón (CIE 1976 u'v' színességi koordináta-rendszer).

Az 53.a. - 53.d. ábrák IPS megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció grafikus eredményét mutatják.

A gamut háromszög valamennyi jelölt pontjánál a virtuális színérzetek halmaza részben a megjelenítő gamuton kívül helyezkedik el és teljesen a színpatkón belül marad, azaz IPS megjelenítón csak relatív virtuális színérzet tapasztalható.



53. ábra

a. IPS megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 $u'v'$ színességi koordináta-rendszerben.

b. Gamut kinagyítva B gamut pontnál

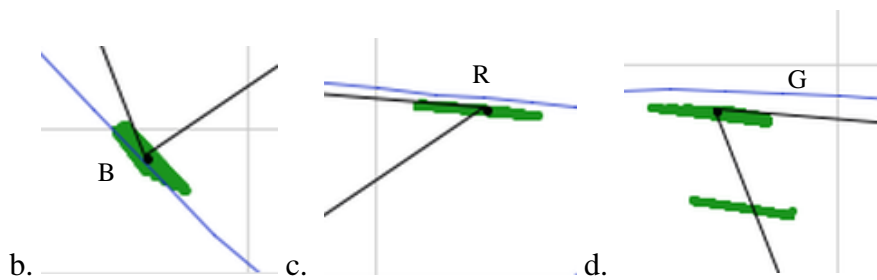
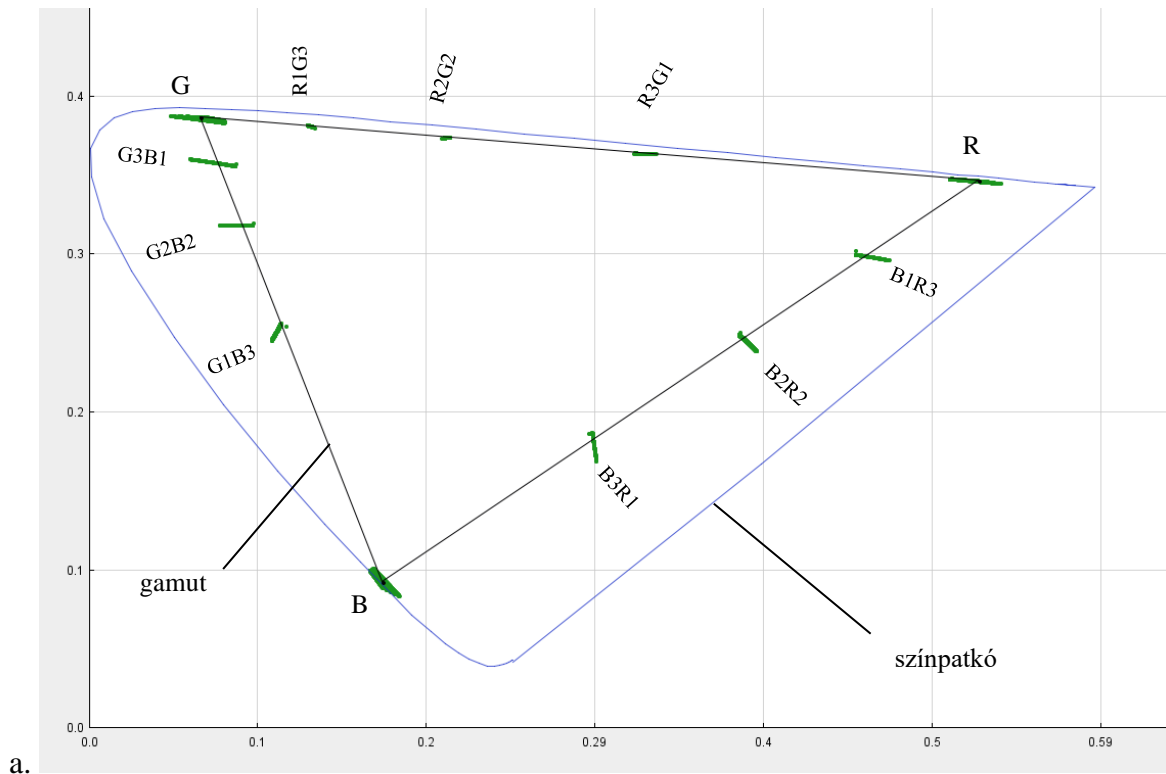
c. Gamut kinagyítva R gamut pontnál

d. Gamut kinagyítva G gamut pontnál

A 54.a. – 54.d. ábrák RGB LED megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció grafikus eredményét mutatják.

A gamut háromszög valamennyi jelölt gamut pontjánál a virtuális színérzetek halmaza részben a megjelenítő gamuton kívül helyezkedik el és a színpatkón belül marad. Ez relatív virtuális színérzetnek felel meg.

B gamut pontnál a virtuális színérzetek halmaza részben a színpatkó határvonalra fekszik (55.b. ábra), azaz RGB LED megjelenítőn a B (kék) gamut pontnál közel valódi virtuális színérzet tapasztalható.



54. ábra

a. RGB LED megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 $u'v'$ színességi koordináta-rendszerben.

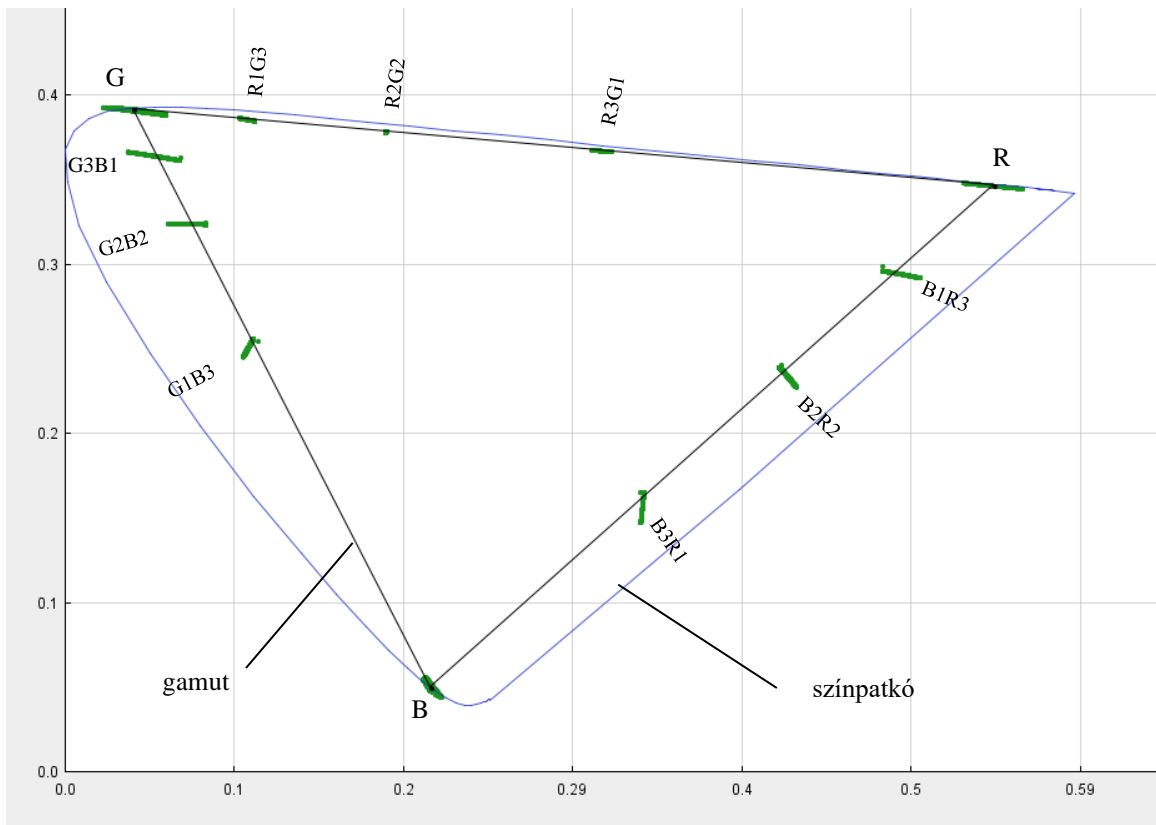
b. Gamut kinagyítva B gamut pontnál

c. Gamut kinagyítva R gamut pontnál

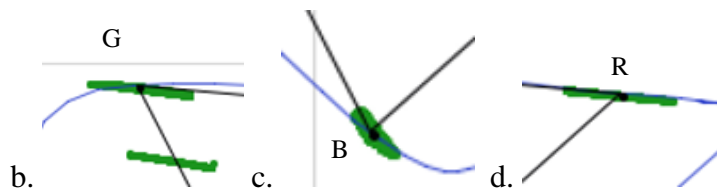
d. Gamut kinagyítva G gamut pontnál

A 55.a. – 55.d. ábrák a háromszínű lézeres megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció grafikus eredményét mutatják.

A gamut háromszög éleken jelölt gamut pontoknál a virtuális színérzetek halmaza részben a megjelenítő gamuton kívül helyezkedik el és a színpatkón belül marad. Ez relatív virtuális színérzetnek felel meg. Ugyanakkor, G, B és R gamut pontoknál a virtuális színérzetek halmaza részben a színpatkó határvonalra fekszik (55. b., c., d. ábra). Így megállapítható, hogy háromszínű lézeres megjelenítőn a G (zöld), a B (kék) és az R (vörös) gamut pontoknál közel valódi virtuális színérzet tapasztalható.



a.



55. ábra

- a. Háromszínű lézeres megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 $u'v'$ színességi koordináta-rendszerben.**
b. Gamut kinagyítva G gamut pontnál
c. Gamut kinagyítva B gamut pontnál
d. Gamut kinagyítva R gamut pontnál

Összegzés

Numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulált hirtelen színátmenetekkel CCFL és IPS megjelenítőkön gamuton és színatkón kívüli utókép, azaz valódi virtuális színérzet nem tapasztalható. CCFL és IPS megjelenítőkön csak gamuton kívüli és színatkón belüli utókép, azaz relatív virtuális színérzet tapasztalható. RGB LED megjelenítőn a B (kék) gamut pontnál, háromszínű lézeres megjelenítőknél pedig az R (vörös), a G (zöld) és a B (kék) gamut pontoknál közel valódi virtuális színérzet érzékelhető.

4.2. - 2. tézis

2. tézis: [S1], [S2], [S3], [S4]

Numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulált hirtelen színátmenetekkel kiváltott virtuális színérzet a régebbi sorozatú Dell E4200 (LCD-TN) és az újabb sorozatú HP ZR2440w (IPS) folyadékkristályos megjelenítők tekintetében az újabb sorozatú IPS megjelenítőn átlagosan 54%-kal erősebb.

Bizonyítás

Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modell szimulációs számításaival LCD-TN és IPS megjelenítőkre meghatároztam a hirtelen színátmenetekkel kiváltott virtuális színérzet erősségeket. A szimuláció bemeneti paramétereinek tekintett LCD-TN és IPS megjelenítő gamutok munkámban mért adatok (disszertáció 3.1.2. fejezet 33. ábra).

A szimulációs módszer részletesen a disszertáció 3.2. fejezetében olvasható.

A színátmenetekhez rendelhető színekódok a Függelék F2. fejezetében olvashatók.

Önmérési módszerrel ugyanezen LCD-TN és IPS megjelenítő típusokon összehasonlítottam a hirtelen színátmenetekkel kiváltott virtuális színérzet erősségeket.

Ezt követően összehasonlítottam a virtuális színérzet erősség numerikus kinetikai modellel számított szimulációs és önmérési módon kapott eredményeit.

A szimulációs és az önmérési vizsgálatokban a következő megjelenítőket alkalmaztam:

- Dell E4200 notebook (Dell E4200, sorozatszám: CN-05HWX0-12961-03U-2100-A00, 5. táblázat), a fentiekben említett LCD-TN kijelzővel,
- HP ZR2440w típus saját példánya (sorozatszám: CN43270K9B, 5. táblázat), a fentiekben említett IPS megjelenítő.

A/ Virtuális színérzet erősség szimulációs számításának eredményei

A virtuális színérzet erősség szimulációval számított $(\Delta c)_{\max}$ eredményeit az alábbi 17. táblázat tartalmazza. A táblázatban jelölt 1. szín a hirtelen színátmenetet megelőző színt, a 2. szín a színátmenetet követő színt jelöli. A szimulációs számításokhoz 24 színátmenetet választottam. A 24 színátmenet a megjelenítő gamut háromszög csúcsai közötti színátmeneteket, valamint a

megjelenítő gamut háromszög csúcsok és a szemközti oldalélek mentén elhelyezkedő gamut pontok közötti színátmeneteket jelenti (disszertáció 3.2. fejezet).

17. táblázat

A szimulációval kapott virtuális színérzet erősségek

Színátmenet		$(\Delta c)_{\max}$		
1. szín	2. szín	LCD-TN	IPS	IPS eltérés az LCD-TN-hez képest, %
B	R3G1	0.01017	0.01261	24
B	R2G2	0.00746	0.00785	5
B	R1G3	0.00494	0.00330	-33
R3G1	B	0.00909	0.01451	60
R2G2	B	0.00966	0.01614	67
R1G3	B	0.01057	0.01798	70
G3B1	R	0.01065	0.01719	61
G2B2	R	0.01135	0.01711	51
G1B3	R	0.01210	0.01703	41
R	G3B1	0.00996	0.01639	65
R	G2B2	0.00904	0.01341	48
R	G1B3	0.00825	0.01117	35
G	B3R1	0.00820	0.01384	69
G	B2R2	0.00617	0.01004	63
G	B1R3	0.00696	0.01179	69
B3R1	G	0.00288	0.00640	122
B2R2	G	0.00498	0.01038	108
B1R3	G	0.00766	0.01438	88
B	R	0.01289	0.01696	32
R	B	0.00893	0.01319	48
R	G	0.01045	0.01835	76
G	R	0.01004	0.01728	72
G	B	0.01173	0.01996	70
B	G	0.00309	0.00280	-9

A 17. táblázatban látható, hogy a legtöbb színátmenetnél a virtuális színérzet erősség $(\Delta c)_{\max}$ értéke IPS megjelenítőn lényegesen magasabb az LCD-TN típusú megjelenítőn mért $(\Delta c)_{\max}$ értékhez képest. Kivételt képeznek a B→R1G3 (kék→zöldessárga) és B→G (kék→zöld) színátmenetek. Esetükben az LCD-TN típusú megjelenítő $(\Delta c)_{\max}$ értéke magasabb az IPS megjelenítő $(\Delta c)_{\max}$ értékéhez képest (utolsó oszlop százalékos eltérések).

Összességében, numerikus kinetikai modellel végzett szimulációs számítások alapján a régi sorozatú LCD-TN megjelenítőhöz képest az újabb sorozatú IPS típusú megjelenítőn a virtuális színérzet átlagosan 54%-kal erősebb.

B/ Önmérések

Önmérési módszerrel összehasonlítottam a fentiek szerinti LCD-TN (Dell E4200, sorozatszám: CN-05H WX0-12961-03U-2100-A00) és IPS (HP ZR2440w, sorozatszám: CN43270K9B) megjelenítő típusokon hirtelen színátmenetekkel kiváltott virtuális színérzet erősségeket. Önmérési vizsgálataimhoz a szimulációs számításoknál (előző oldal 17. táblázat) szereplő 24 színátmenetből választottam ki 9 színátmenetet a következő szempontok figyelembe vételével:

* a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín távolsága a CIE 1931 xy színességi koordináta-rendszer szerint (disszertáció 2.5. fejezet) minél nagyobb legyen a színfényesség és a szinkontraszt érvényesüléséhez.

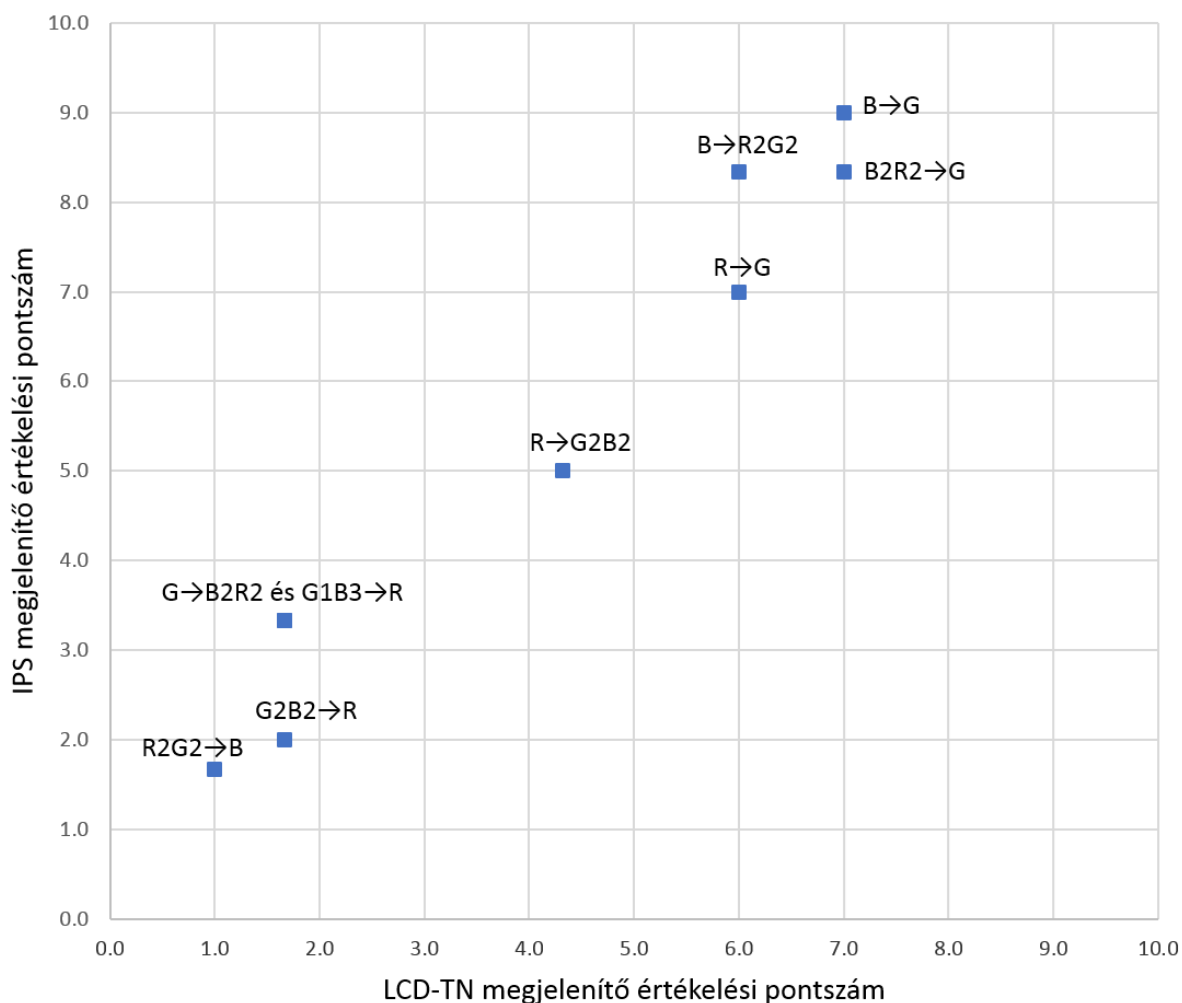
* a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín egyike alapszín (vörös vagy kék vagy zöld), a másik kevert szín legyen.

* a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín egyaránt alapszín (vörös vagy kék vagy zöld) legyen.

Az önmérési vizsgálat kivitelezése a disszertáció 3.4. fejezetében olvasható részletesen.

Az 56. ábra grafikusán bemutatja a két vizsgált megjelenítő típusal kapott mérési eredményeket, az értékelési pontszámokat. Az x tengelyen LCD-TN, az y tengelyen IPS megjelenítőre kapott értékelési pontszámok láthatók. E pontszámok a színátmenetekkel kiváltott utóképek erősségét fejezik ki 0-9 értéktartományban, az alábbiak szerint:

- 0: nincs utókép,
- 1-3: enyhe erősségű utókép,
- 4-6: közepes erősségű utókép,
- 7-9: erős utókép.



56. ábra

9 színátmenettel kiváltott, önméréssel mért virtuális színérzet erősség értékelési pontszámok LCD-TN és IPS megjelenítőn

Az ábrán látható, hogy az IPS (HP ZR2440w) megjelenítő értékelési pontszáma minden színátmenet esetében magasabb, mint az LCD-TN (Dell E4200) megjelenítővel kapott értékelési pontszámok.

Megállapítható, hogy numerikus kinetikai modellel végzett szimulációs számításokkal (17. táblázat) és önmérési vizsgálatokkal (grafikusan 56. ábra) a hirtelen színátmenettel kiváltott virtuális színérzet az újabb sorozatú IPS folyadékkristályos megjelenítőn erősebb.

Amikor a két megjelenítő értékelési pontszámait t-próbával $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten összehasonlítom (18. táblázat), az önmérési eredmények az előbbiekhöz képest árnyaltabbá válnak.

18. táblázat

Az 56. ábrán feltüntetett színátmenetekkel kiváltott virtuális színérzet erősségek önmérési összehasonlítása LCD-TN és IPS megjelenítőkön

Színátmenet	LCD-TN			IPS			t-próba p ($\alpha = 0.05$)
	Értékelési pontszám	Szórás	Relatív szórás	Értékelési pontszám	Szórás	Relatív szórás	
R2G2→B	1.0	0.0	0%	1.7	0.9	57%	0.374
B→G	7.0	0.0	0%	9.0	0.0	0%	nincs adat
B2R2→G	7.0	0.0	0%	8.3	0.5	6%	0.016
G→B2R2	1.7	0.5	28%	3.3	0.5	14%	0.024
B→R2G2	6.0	0.0	0%	8.3	0.5	6%	0.002
R→G2B2	4.3	0.5	11%	5.0	0.0	0%	0.116
G1B3→R	1.7	0.5	28%	3.3	0.9	28%	0.089
R→G	6.0	0.0	0%	7.0	0.0	0%	nincs adat
G2B2→R	1.7	0.5	28%	2.0	0.8	41%	0.643

- Színátmenetek, amikor a 18. táblázatban feltüntetett t-próba a két megjelenítő típuson mért virtuális színérzet (utókép) erősségében szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$). B2R2→G (bíbor→zöld), G→B2R2 (zöld→bíbor), B→R2G2 (kék→olivazöld) színátmeneteknél az IPS megjelenítő értékelési pontszámok szignifikánsan magasabbnak bizonyultak az LCD-TN megjelenítő értékelési pontszámoknál.

- Színátmenetek, amikor a 18. táblázatban feltüntetett t-próba nem volt elvégezhető. B→G (kék→zöld) és R→G (vörös→zöld) színátmeneteknél az önmérési párhuzamos mérésekben kapott értékelési pontszámok megjelenítőnként azonosak voltak (LCD-TN 7-7-7 // IPS 9-9-9 és LCD-TN 6-6-6 // IPS 7-7-7), szórásuk 0, így a t-próbát nem tudtam elvégezni.

A két megjelenítő értékelési pontszámát mégis eltérőnek tekintettem, mert B→G és R→G színátmeneteknél az IPS megjelenítő értékelési pontszáma 0% relatív szórással 2 ill. 1 értékelési ponttal volt magasabb az LCD-TN megjelenítő értékelési pontszámánál.

- Színátmenetek, amikor a 18. táblázatban feltüntetett t-próba a két megjelenítő típuson mért virtuális színérzet (utókép) erősségében nem mutat szignifikáns különbséget ($p > 0.05$).

R2G2→B (olivazöld→kék), R→G2B2 (vörös→türkizkék), G1B3→R (középkék→vörös) és G2B2→R (türkizkék→vörös) színátmeneteknél a két megjelenítő értékelési pontszámait közel azonosnak tekintettem az eltérést jelző szignifikancia hiánya és az IPS megjelenítőn mért virtuális színérzet (utókép) erősség értékelési pontszámok statisztikai szórásai miatt.

C/ Virtuális színérzet erősség *szimulációs és önméréses*, statisztikailag árnyaltabb eredményeinek összehasonlítása.

Numerikus kinetikai modellel végzett szimulációs számítási eredményeim (18. táblázat) szerint a régi sorozatú, LCD-TN folyadékkristályos megjelenítőhöz képest az újabb sorozatú, IPS típusú folyadékkristályos megjelenítőn tapasztalható erőteljesebb virtuális színérzet (magasabb $(\Delta c)_{\max}$ értékek). Kivételt képeznek a B→R1G3 (kék→zöldessárga) és B→G (kék→zöld) színátmenetek, amelyek esetében az LCD-TN típusú megjelenítőn számítottam magasabb $(\Delta c)_{\max}$ értéket.

Önméréses összehasonlításban (56. ábra, 18. táblázat) a 9 választott színátmenetből 5 színátmenetnél a kiváltott virtuális színérzet az IPS megjelenítőn bizonyult erősebbnek. Ezen 5 színátmenetből 4 színátmenet megerősíti a szimulációs IPS eredményeket, míg az ötödik, a B→G (kék→zöld) színátmenet csak az önméréses vizsgálatban bizonyult erőteljesebbnek IPS megjelenítőn. A további 4 önméréses színátmenetnél az LCD-TN és IPS megjelenítőkön közel azonosnak tekinthetők a hirtelen színátmenettel kiváltott virtuális színérzet erősségei.

Összegzés

A virtuális színérzet erősség *önméréses* módszerrel kapott, statisztikailag árnyaltabb eredményei négy színátmenetnél, a B2R2→G (bíbor→zöld), G→B2R2 (zöld→bíbor), B→R2G2 (kék→olívazöld), R→G (vörös→zöld) színátmeneteknél szignifikáns módon megerősítik a numerikus kinetikai modellel végzett *szimulációs számításokat*. Mindkét módszerrel az újabb sorozatú IPS folyadékkristályos megjelenítőn tapasztalható erősebb virtuális színérzet. A szimulációs eredmények szerint az IPS megjelenítőn tapasztalható virtuális színérzet átlagosan 54%-kal erősebb.

Az R2G2→B (olívazöld→kék), R→G2B2 (vörös→türkizkék), G1B3→R (középkék→vörös), G2B2→R (türkizkék→vörös) színátmeneteknél az LCD-TN és IPS megjelenítőkön tapasztalt virtuális színérzet erősségei között nincs szignifikáns eltérés. Ez utóbbi alapján a hirtelen színátmenettel kiváltott virtuális színérzet erősségének platform függetlensége nem kizárható. Az eredmények támogatják a numerikus kinetikai modell alkalmazhatóságát és rávilágítanak továbbfejlesztésének szükségességére.

4.3. - 3. tézis

3. tézis: [S5], [S6], [S7]

Azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége független az életkortól és a nemtől.

Bizonyítás

Témavezetőmmel színes-színes utókép méréssorozatot végeztünk 41 tesztalany és színes-szürke utókép méréssorozatot végeztünk 16 tesztalany bevonásával. Mindkét méréssorozatban azonos mérési körülmények között vizsgáltuk a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége, az életkor és a nem közötti összefüggést. A módszer részletesen a disszertáció 3.3. fejezetében olvasható.

A színes-színes méréssorozat statisztikai elemzését az alábbi A/ bekezdésben mutatom be. A színes-szürke méréssorozat statisztikai elemzését a B/ bekezdés tartalmazza. A C/ bekezdésben a színes-színes és a színes-szürke méréssorozatok utókép erősség értékelési pontszám átlagait 10 éves korcsoportokra bontva értékelem. A D/ bekezdés a színes-színes méréssorozat színátmeneteivel kiváltott utókép erősség klaszteranalízisét tartalmazza.

A/ Színes-színes méréssorozat eredmények a tesztalanyok életkora és neme szerint

A színes-színes méréssorozathoz a 9 színátmenet (disszertáció 3.3. fejezet, 14. táblázat) a következő szempontok figyelembevételével került kiválasztásra:

* a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín távolsága a CIE 1931 xy színességi koordináta-rendszer szerint (disszertáció 2.5. fejezet) minél nagyobb legyen a színfényesség és a színkontraszt érvényesüléséhez.

* a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín egyike alapszín (vörös vagy kék vagy zöld), a másik kevert szín legyen.

* a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín egyaránt alapszín (vörös vagy kék vagy zöld) legyen.

pontszám átlagokat $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney (M-W) próba segítségével összehasonlítottam.

19. táblázat
Színes-színes méréssorozat utókép erősség értékelési pontszám átlagok összehasonlítása
életkor és nem szerinti bontásban
(„+” szignifikáns eltérés $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten)

Értékelési pontszám átlagok							
Részhalmaz	Összehasonlítás	Átlag (1)	Átlag (2)	t-próba	M-W próba	t-próba	M-W próba
Férfi + Nő	1. Kor \leq 40 2. Kor $>$ 40	2.04	2.10	0.612	0.543	-	-
Férfi + Nő	1. Férfiak 2. Nők	2.01	2.16	0.126	0.185	-	-
Kor \leq 40	1. Férfiak 2. Nők	2.03	2.07	0.754	0.916	-	-
Kor $>$ 40	1. Férfiak 2. Nők	1.98	2.36	0.020	0.050	+	-
Férfiak	1. Kor \leq 40 2. Kor $>$ 40	2.03	1.98	0.764	0.527	-	-
Nők	1. Kor \leq 40 2. Kor $>$ 40	2.07	2.36	0.009	0.012	+	+

- Amikor a t-próba és a Mann-Whitney próba az összehasonlított értékelési pontszám átlagokban (Átlag (1) és Átlag (2)) szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$)

A legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti nők értékelési pontszám átlagai szignifikánsan eltérnek egymástól. A 40 év feletti nők értékelési pontszám átlaga szignifikánsan magasabbnak mutatkozott (19. táblázat 6. adatsor). Eszerint a 40 év feletti nők erősebb utóképet érzékelnek, mint a legfeljebb 40 éves nőtársaik. A 40 év feletti nők erősebb utókép érzékelésének értékelésekor azonban nem hagyható figyelmen kívül, hogy a szignifikáns eltérés alacsony mintaszámot (legfeljebb 40 éves nő - 10 fő, 40 év feletti nő - 5 fő; ld. disszertáció 3.3. fejezet 13. táblázat) kísér. Határozottabb szignifikanciához az elemszám (tesztalany létszám) növelése szükséges.

- Amikor a t-próba az összehasonlított értékelési pontszám átlagokban (Átlag (1) és Átlag (2)) szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$) és a Mann-Whitney próba nem mutat szignifikáns eltérést ($p > 0.05$)

A t-próba szerint a 40 év feletti férfiak és nők értékelési pontszám átlagai szignifikánsan eltérnek, nők esetében az érték magasabb, azonban a Mann-Whitney próbával ez az eltérés nem szignifikáns (23. táblázat 4. adatsor).

Tekintettel az alacsony elemszámra (10 férfi, 5 nő; ld. disszertáció 3.3. fejezet 18. táblázat), a Mann-Whitney próba nem szignifikáns eredményét fogadtam el. Ebből következően a 40 év feletti férfiak és nők által érzékelt utókép erősséget közel azonosnak tekintem. Az értékelés kiegészítéseként megjegyzendő, hogy határozottabb szignifikanciához az elemszám (tesztalany létszám) növelése szükséges.

- Amikor az összehasonlított értékelési pontszám átlagokban (Átlag (1) és Átlag (2)) a t-próba és a Mann-Whitney próba egyike sem mutat szignifikáns különbséget ($p > 0.05$) Nem látható szignifikáns különbség a legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti Férfi+Nő értékelési pontszámok között (23. táblázat 1. adatsor). Nem látható szignifikáns különbség a Férfi+Nő értékelési pontszámok között a teljes eredményhalmazon (23. táblázat 2. adatsor). Hasonlóképpen, nincs szignifikáns eltérés a legfeljebb 40 éves férfiak és nők értékelési pontszámai között (23. táblázat 3. adatsor). A legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti férfiak értékelési pontszámai között ugyancsak nem található szignifikáns eltérés (23. táblázat 5. adatsor). Színes-színes mérésorozatunk eredményei alapján az utókép erősséget életkortól és nemtől függetlennek tekintem.

B/ Színes-szürke mérésorozat eredmények a tesztalanyok életkora és neme szerint

A színes-szürke mérésorozathoz a 12 színátmenet (disszertáció 3.3. fejezet, 17. táblázat) a következő szempontok figyelembevételével került kiválasztásra:

* A színátmenetek között szerepel a három alapszín és 9 kevert szín

* A színátmenetet követő 2. szín (háttérszín) egységesen szürke. A színátmenetek második színe egységesen szürke volt (disszertáció 3.3. fejezet 12. táblázat E*).

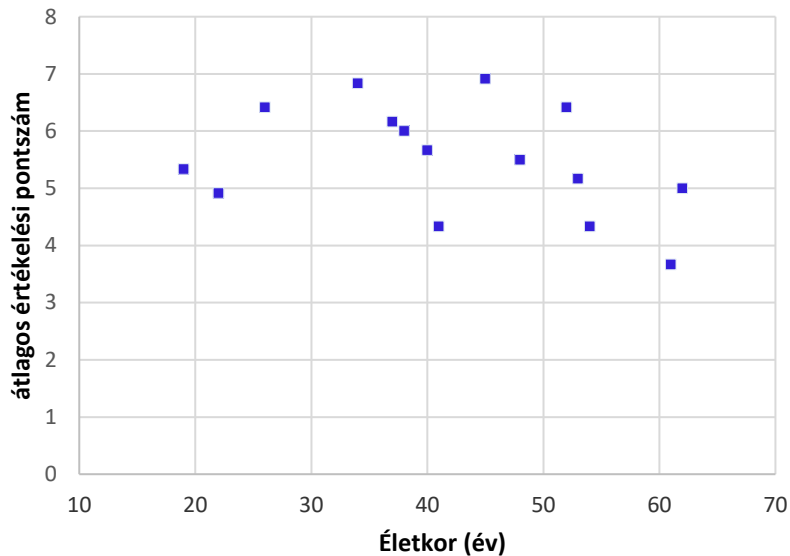
A színátmenetek fénysűrűsége egységes legyen. Így mindegyik szín CIELAB L értékét a legkisebb fénysűrűségű színhez, a kék színhez igazítottuk (disszertáció 3.3. fejezet, 16. táblázat: B*).

A színes-szürke mérésorozat módszere a disszertáció 3.3. fejezetben részletesen olvasható.

A színes-szürke mérésorozatban a tesztalanyok utókép erősség értékelési pontszámai a színátmenetekkel kiváltott utóképek erősségét fejezik ki 0 - 9 értéktartományban, az alábbiak szerint:

- 0: nincs utókép,
- 1-3: enyhe erősségű utókép,
- 4-6: közepes erősségű utókép,
- 7-9: erős utókép.

Az utókép erősség, valamint az életkor és a nem közötti összefüggések értékeléséhez minden tesztalanyra kiszámítottam a 12 színátmenet értékelési pontszám átlagot. Az értékelési pontszám átlagokat az életkor függvényében a 58. ábra szemlélteti.



58. ábra

Színes-szürke mérőssorozat utókép erősség értékelési pontszám átlagok az életkor függvényében

Az 58. ábrán bemutatott pontfelhő diagramon a 20-60 életév tartományban a férfi+nő értékelési pontszám átlagok a kiugró érték mellett haranggörbéhez hasonló lefutást mutat, az 50-60 éves életkor tartományban látható lehajlással. Tekintve, hogy a diagram pontfelhő eloszlása önmagában nem támpont az utókép erősség életkor függésének tisztázására, a 20. táblázatnak megfelelően a tesztalanyokat két életkor csoportba osztottam. Az utókép erősség értékelési pontszám átlagokat a legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti részhalmazokra bontottam, majd $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney (M-W) próba segítségével összehasonlítottam. Ugyancsak a 20. táblázatban látható az utókép erősség értékelési pontszám átlagok nemek szerinti bontása is. Az értékelési pontszám átlagokat $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney (M-W) próba segítségével összehasonlítottam. Az alacsony mintaszám (kevés tesztalany) miatt az életkor és a nem részhalmazokat a színes-színes mérőssorozattól eltérően, nem bontottam tovább (19. táblázat).

20. táblázat

Színes-szürke mérésorozat utókép erősség értékelési pontszám átlagok összehasonlítása („+” szignifikáns eltérés $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten)

Összehasonlítás	Átlag (1)	Átlag (2)	t-próba p ($\alpha = 0.05$)	M-W próba p ($\alpha = 0.05$)	t-próba	M-W próba
1. Kor ≤ 40 2. Kor > 40	5.78	5.17	0.206	0.270	-	-
1. Férfiak 2. Nők	5.56	5.33	0.672	0.551	-	-

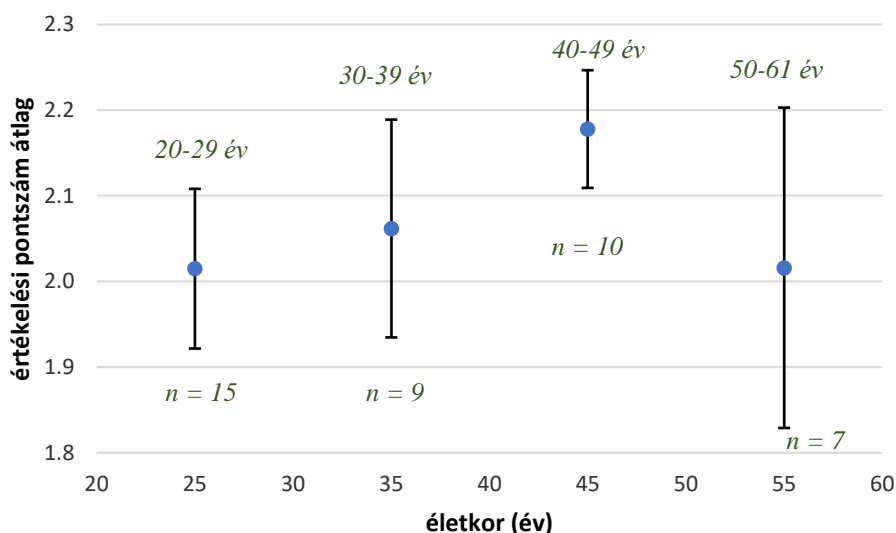
A 24. táblázat adatai szerint az értékelési pontszám átlagok (Átlag (1) és Átlag (2)) között nem jelentkezett szignifikáns eltérés sem az életkor (24. táblázat 1. adatsor), sem a nem (24. táblázat 2. adatsor) függvényében. A színes-szürke mérésorozatban az utókép erősséget ezért életkortól és nemtől függetlennek tekintem.

C/ Színes-színes és színes-szürke mérésorozatok utókép erősség részletes értékelése 10 éves korcsoportokban

Az utókép erősség értékelési pontszám átlagok korfüggését részletes összehasonlításban, 10 éves korcsoportokban is megvizsgáltam.

A *színes-színes* mérésorozat korcsoportok utókép erősség értékelési pontszám átlagait az 59. ábra mutatja. Az ábra az értékelési pontszám átlagokat 10 éves korcsoportokban a standard hibával együtt mutatja. Ha a hibasávok között nincs átfedés, akkor az értékelési pontszám átlagok eltérése szignifikáns.

A *színes-színes* mérésorozatban részt vevő egyedüli 61 éves tesztalanyt az 50-59 éves korcsoportba soroltam, amely a továbbiakban az 50-61 éves korcsoport (25. táblázat).



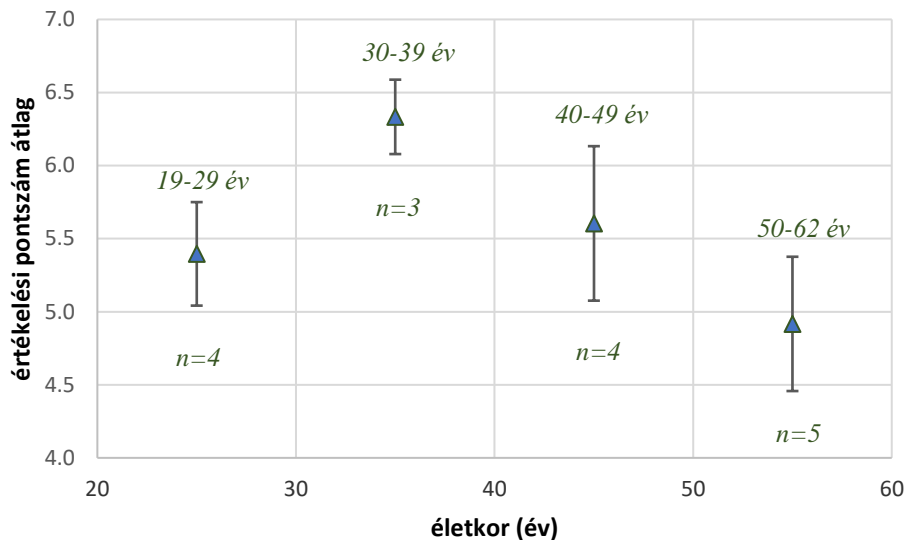
59. ábra
Utókép erősség értékelési pontszám átlagok színes-színes méréssorozat 10 éves
korcsoportokban.
n = korcsoport tesztalany létszám

A 59. ábrán egyértelműen látható, hogy a tízéves korcsoportok értékelési pontszám átlagaiban nincs szignifikáns különbség. Tekintve, hogy a színes-színes méréssorozat tízéves korcsoportjainak t-próba ($\alpha = 0.05$ szignifikanciaszint) és Mann-Whitney próba szerinti összehasonlításában nem tapasztalható szignifikáns eltérés (21. táblázat), a tízéves korcsoportos részletes összehasonlítással megerősítem, hogy a *színes-színes* méréssorozatban az utókép erőssége az életkortól független.

21. táblázat
Színes-színes méréssorozat utókép értékelési pontszám átlagok 10 éves korcsoportok
szerinti összehasonlítása
(„+” szignifikáns eltérés $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten)

Korcsoport	t-próba p ($\alpha = 0.05$)	M-W próba p ($\alpha = 0.05$)	t-próba	M-W próba
20-29 és 30-39	0.770	0.571	-	-
20-29 és 40-49	0.173	0.244	-	-
20-29 és 50-61	0.996	0.888	-	-
30-39 és 40-49	0.437	0.653	-	-
30-39 és 50-61	0.843	1.000	-	-
40-49 és 50-61	0.441	0.661	-	-

A *színes-szürke* mérőszorozat 10 éves korcsoportjainak értékelési pontszám átlagait a 60. ábra mutatja. Az ábra az értékelési pontszám átlagokat 10 éves korcsoportokban a standard hibával együtt mutatja. Ha a hibasávok között nincs átfedés, akkor az értékelési pontszám átlagok eltérése szignifikáns.



60. ábra
Utókép erősség értékelési pontszám átlagok színes-szürke mérőszorozat 10 éves
korcsoportokban.
n = korcsoport tesztalany létszám

A 60. ábrán látható hibasáv átfedések alapján a 19-29 éves, a 40-49 éves és az 50-62 éves korcsoportok által érzékelt utókép erősségben nincs szignifikáns eltérés. A 30-39 éves korcsoport azonban az előbbi három korcsoporthoz képest szignifikánsan erősebb utóképet érzékel a *színes-szürke* mérőszorozatban.

Amikor a *színes-szürke* mérőszorozat korcsoportjait t-próba ($\alpha = 0.05$ szignifikanciaszint) és Mann-Whitney próba segítségével összehasonlítom, az eredmények homogénebbé válnak (22. táblázat). Az egyetlen 19 éves tesztalanyt a 20-29 éves korcsoportba soroltam, amely a továbbiakban a 19-29 éves korcsoport. A *színes-szürke* mérőszorozatban részt vevő 61 éves és 62 éves tesztalanyt az 50-59 éves korcsoportba soroltam, amely a továbbiakban az 50-62 éves korcsoport (22. táblázat).

22. táblázat
Színes-szürke méréssorozat utókép értékelési pontszám átlagok 10 éves korcsoportok
szerinti összehasonlítása
(„+” szignifikáns eltérés $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten)

Korcsoport	t-próba p ($\alpha = 0.05$)	M-W próba p ($\alpha = 0.05$)	t-próba	M-W próba
19-29 és 30-39	0.202	0.178	-	-
19-29 és 40-49	0.807	0.813	-	-
19-29 és 50-62	0.495	0.510	-	-
30-39 és 40-49	0.279	0.320	-	-
30-39 és 50-62	0.037	0.069	+	-
40-49 és 50-62	0.362	0.357	-	-

- Amikor a 22. táblázatban feltüntetett 10 éves korcsoportok értékelési pontszám átlagaiban a t-próba szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$), de a Mann-Whitney próba nem szignifikáns ($p > 0.05$)

A 30-39 és 50-62 éves korcsoportoknál (26. táblázat 5. adatsor) a két korcsoport értékelési pontszám átlaga a t-próba szerint szignifikánsan eltér, a Mann-Whitney próba szerint azonban nincs szignifikáns eltérés. A kis elemszám (30-39: 3 fő, 50-62: 5 fő, disszertáció 3.3. fejezet 138. táblázat) miatt a Mann-Whitney próba negatív eredményét fogadtam el. Ezért a 30-39 és az 50-62 éves korcsoportok összehasonlító eredménye alapján az utókép erősséget életkortól függetlennek tekintem.

- Amikor a 22. táblázatban feltüntetett 10 éves korcsoportok értékelési pontszám átlagaiban a t-próba és a Mann-Whitney próba nem szignifikáns

A 19-29 és 30-39; a 19-29 és 40-49; a 19-29 és 50-62; a 30-39 és 40-49; a 40-49 és 50-62 korcsoportok értékelési pontszám átlagai között nincs szignifikáns eltérés. A felsorolt korcsoportok által érzékelt utókép erősségét ezért életkortól függetlennek tekintem.

D/ Klaszteranalízis

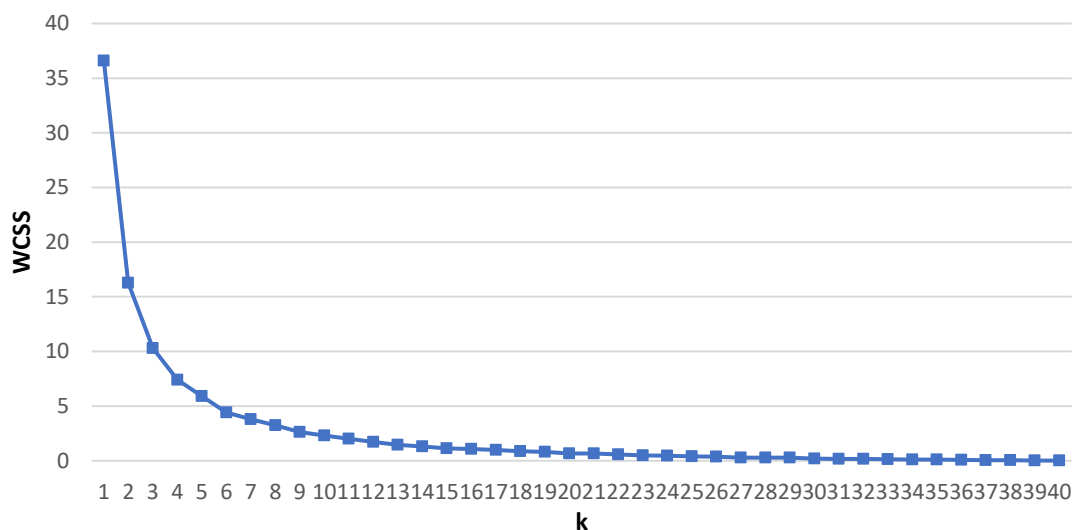
A nagyobb mintaszám és az erőteljes utókép miatt klaszteranalízist a *színes-színes* méréssorozaton végeztem. Klaszteranalízissel az utókép erősség és az utóképet kiváltó színátmenet közötti összefüggést vizsgáltam. Ennek megfelelően az utókép erősség értékelése és az utóképet kiváltó színátmenet szerint a teszталanyok klaszter csoportokba sorolhatók.

A színes-színes méréssorozat adathalmazának klaszteranalíziséhez a hierarchia szerint felosztó, az adatpontok és klaszter összerendezés szerint kizáró, a méréssorozat adathalmazának

klaszterezésbe bevont pontjai szerint teljes klaszterezési algoritmust, a disszertáció 2.9. fejezetében a 25.(b) ábra szerinti k-közép klaszterezést alkalmaztam. A k klaszterszám meghatározás az ún. „könyök” módszerrel történik, miszerint rögzítjük az egyes k értékek szerinti futtatásokkal kapott klaszteren belüli eltérések négyzetösszegét (Within-Cluster Sum of Square, WCSS). Ezeket a négyzetösszegeket a k függvényében ábrázolva olyan görbét kapunk, amelynek könyökszerű elhajlása (inflexió) megadja a klaszterek számát jelentő k értéket. Klaszteranalízist a méréssorozatok eredményeinek feldolgozását végző Java alkalmazásomba beépített Apache Commons Math 3.6 API modullal végeztem (disszertáció 3.3. fejezet).

A klaszterezésben a színes-színes méréssorozathoz választott 9 színátmenet értékelési pontszámainak alábbiak szerint számított viszonyszámait alkalmaztam.

Tesztalanyonként kiszámítottam a 9 színátmenettel kiváltott utókép értékelési pontszám átlagot, majd ehhez viszonyítottam tesztalanyonként a 9 színátmenettel kiváltott utókép erősség értékelési pontszámokat. A klaszterszám meghatározáshoz a $k = 1$ és $k = 40$ közötti futtatásokkal kapott klaszteren belüli eltérések négyzetösszegét (Within-Cluster Sum of Square, WCSS) a 61. ábra szemlélteti.



61. ábra
Utókép erősség WCSS-klaszterszám diagramja

A 61. ábrán látható WCSS értékek inflexió pontja a $k = 2$, a $k = 3$ és a $k = 4$ klaszterszámhoz egyaránt hozzárendelhető. Eszerint a tesztalanyok 2, 3, illetve 4 klasztercsoportba sorolhatók.

A klaszterszám egyértelmű megállapítására a $k = 2$, $k = 3$ és $k = 4$ klaszterszámú futtatásokban kapott klasztereket az alábbi kritériumok szerint szűrtem:

1. egy klaszterben legalább 10 tesztalany szerepeljen.
2. tekintve, hogy a színes-színes mérésorozatban a férfiak aránya 65.7%, klaszteranalízisemben klaszterenként 50-75% arányban szerepeljenek férfiak.
3. a centroid vektorok, amelyek definícióm szerint egy-egy színátmenetben az utókép értékelési pontszám átlagot jelölik, ne vegyenek fel „0” értéket.

A $k = 4$ klaszterszámnál a fenti 1., 2. és 3. kritérium nem teljesül maradéktalanul.

A 23. táblázat szerint a $k = 4$ esetben kapott 1., 2. és 4. klaszterben a tesztalanyok száma kevesebb mint 10. A férfiak aránya klaszterenként az 53.8% - 100% tartományban van.

23. táblázat
Tesztalanyok száma és a férfiak aránya klaszterenként a $k = 4$ esetben

Klaszter	1. klaszter	2. klaszter	3. klaszter	4. klaszter
tesztalanyok száma	8	8	24	1
férfiak aránya	53.8%	75%	58.3%	100%

A 24. táblázatban szereplő centroid vektorok közül a 4. klaszter centroid vektora $B \rightarrow R2G2$ és $R2G2 \rightarrow B$ színátmenetekenél 0 értéket vesz fel.

24. táblázat
Klaszteranalízis – utókép értékelési pontszám centroidok $k = 4$

Klaszter	$B \rightarrow R2G2$	$B \rightarrow G$	$G2B2 \rightarrow R$	$G1B3 \rightarrow R$	$B2R2 \rightarrow G$	$R \rightarrow G2B2$	$R \rightarrow G$	$R2G2 \rightarrow B$	$G \rightarrow B2R2$
1. klaszter	1.239	1.350	1.232	1.001	1.178	1.067	0.762	0.585	0.588
2. klaszter	1.418	1.193	1.352	1.060	0.979	0.470	0.591	1.201	0.737
3. klaszter	1.046	1.259	0.764	0.944	1.233	0.871	1.049	0.789	1.044
4. klaszter	0.000	2.077	1.385	1.385	0.692	2.077	0.692	0.000	0.692

Tekintve, hogy $k = 4$ klaszterszámnál a 3 szűrő kritérium nem teljesül, a további klaszteranalízisben ettől a klaszterszámtól eltekintettem.

A $k = 3$ klaszterszám megfelel a fenti 3 szűrő kritériumnak. A 25. táblázat szerint a $k = 3$ esetben kapott klaszterek elemszáma mind a 3 klaszterben 10 feletti és a férfiak aránya 64.7% - 72.7% között található.

25. táblázat
Tesztalanyok száma és a férfiak aránya klaszterenként a k = 3 esetben

Klaszter	1. klaszter	2. klaszter	3. klaszter
tesztalanyok száma	13	11	17
férfiak aránya	53.8%	72.7%	64.7%

A 26. táblázat három klasztert és a centroid vektorokat mutatja. A 26. táblázatban szereplő centroid vektorokban nem található 0 érték. A táblázatban vastagon jelöltem a színátmenetekkel kiváltott utókép erősség értékelési pontszámok kiemelkedően alacsony és kiemelkedően magas viszonzszámát.

26. táblázat
Klaszteranalízis – utókép értékelési pontszám centroidok k = 3

Utókép értékelési pontszám viszonzszám									
Klaszter	B →R2G2	B→G	G2B2→R	G1B3→R	B2R2→G	R →G2B2	R→G	R2G2→B	G→B2R2
1. klaszter	1.016	1.250	1.394	1.200	0.933	0.887	0.926	0.798	0.595
2. klaszter	1.051	1.206	0.638	0.820	1.401	0.938	1.178	0.597	1.170
3. klaszter	1.269	1.360	0.897	0.936	1.177	0.789	0.688	0.958	0.926

A 30. táblázatban látható, hogy:

- az 1. klaszterben a G→B2R2 (zöld→bíbor) színátmenetnél kiemelkedően gyenge az utókép.
- a 2. klaszterben a B2R2→G (bíbor→zöld) színátmenetnél kiemelkedően erős az utókép.
- a 3. klaszter nem tartalmaz kiemelkedő értéket, köztes viszonzszámok tartománya.

A 30. táblázatból megállapítható, hogy a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erősségek csoportosításában k = 3 klaszterszámnál a két szélső határ a B2R2→G (bíbor→zöld) színátmenet kiemelkedően magas és az *inverz* G→B2R2 (zöld→bíbor) színátmenet kiemelkedően alacsony értékelési pontszáma, azaz az utókép erősségét kifejező viszonzszám.

A k = 2 klaszterszám is megfelel a 3 szűrő kritériumnak. A 31. táblázat szerint a k = 2 esetben kapott klaszterek elemszáma mindkét klaszterben 10 feletti és a férfiak aránya 60% – 66.7% között található.

27. táblázat
Tesztalanyok száma és a férfiak aránya klaszterenként a k = 2 esetben

Klaszter	1. klaszter	2. klaszter
tesztalanyok száma	21	20
férfiak aránya	66.7%	60%

A 32. táblázat két klasztert és a centroid vektorokat mutatja. A 32. táblázatban szereplő centroid vektorokban nem található 0 érték, azaz $k = 2$ esetben a 3. szűrő kritérium is teljesül.

28. táblázat
Klaszteranalízis – utókép értékelési pontszám centroidok $k = 2$

Klaszter	B →R2G2	B→G	G2B2→R	G1B3→R	B2R2→G	R →G2B2	R→G	R2G2→B	G→B2R2
1. klaszter	1.083	1.324	0.713	0.833	1.356	0.896	0.973	0.756	1.066
2. klaszter	1.181	1.242	1.271	1.152	0.954	0.823	0.814	0.867	0.698

Ugyanakkor, a 32. táblázatban a centroid vektorok értékelési pontszám viszonyozásai között nem található kiemelkedően alacsony és kiemelkedően magas érték. Következésképpen, nincs kiemelkedően alacsony, vagy kiemelkedően magas utókép erősséghez rendelhető színátmenet. Ezért a $k = 2$ klaszterszámtól eltekintek, mert a $k = 3$ klaszterszámú csoportosítás biztosítja a klaszteranalízishez választott hierarchia szerint felosztó, k -közép klaszterezést (disszertáció 2.9. fejezet 25.(b) ábra).

Összegzés

A *színes-színes* mérésorozat statisztikai elemzése, továbbá részletesebb, 10 éves korcsoportokra bontott statisztikai értékelése szerint az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége független az életkortól és a nemtől.

A *színes-szürke* mérésorozat statisztikai elemzése, továbbá részletesebb, 10 éves korcsoportokra bontott statisztikai értékelése szerint az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége független az életkortól és a nemtől.

Klaszteranalízissel a nagyobb elemszámmal (tesztalany létszám) rendelkező *színes-színes* mérésorozatban a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erősség kiemelkedően magas és kiemelkedően alacsony értékei mentén k -közép klaszterezéssel csoportosítottam. A csoportosítással 3 klaszterbe rendeztem a B2R2→G (bíbor→zöld) színátmenetet kísérő kiemelkedően magas és a G→B2R2 (zöld→bíbor) inverz színátmenetet kísérő kiemelkedően alacsony utókép erősség értékelési viszonyozások közötti értéktartományt.

4.4. - 4. tézis

4. tézis: [S5], [S6], [S7]

Azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama független a nemtől, és átlagosan 45%-kal rövidebb a 40 év feletti korcsoportban, mint a legfeljebb 40 éves korcsoportban.

Bizonyítás

Témavezetőmmel színes-színes utókép méréssorozatot végeztünk 41 tesztalany és színes-szürke utókép méréssorozatot végeztünk 16 tesztalany bevonásával. Mindkét méréssorozatban azonos mérési körülmények között vizsgáltuk a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama, valamint az életkor és a nem közötti összefüggést. A módszer a disszertáció 3.3. fejezetében olvasható részletesen.

A színes-színes méréssorozat statisztikai elemzését az alábbi A/ bekezdésben mutatom be. A színes-szürke méréssorozat statisztikai elemzését a B/ bekezdés tartalmazza. A C/ bekezdésben a színes-színes és a színes-szürke méréssorozatok utókép időtartam átlagait 10 éves korcsoportokra bontva részletezem. A D/ bekezdés a színes-színes méréssorozat színátmeneteivel kiváltott utókép időtartamok klaszteranalízisét tartalmazza.

A/ Színes-színes méréssorozat eredmények összehasonlítása a tesztalanyok életkora és neme szerint

A színes-színes méréssorozathoz a 9 színátmenet (disszertáció 3.3. fejezet, 16. táblázat) a következő szempontok figyelembevételével került kiválasztásra:

- * a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín távolsága a CIE 1931 xy színességi koordináta-rendszer szerint (disszertáció 2.5. fejezet) minél nagyobb legyen a színfényesség és a színkontraszt érvényesüléséhez.
- * a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín egyike alapszín (vörös vagy kék vagy zöld), a másik kevert szín legyen.
- * a színátmenetet megelőző 1. és a színátmenetet követő 2. szín egyaránt alapszín (vörös vagy kék vagy zöld) legyen.

29. táblázat
Színes-színes méréssorozat utókép időtartam átlagok összehasonlítása életkor és nem szerinti bontásban

(„+” szignifikáns eltérés $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten)

Utókép időtartam átlagok							
Halmaz	Összehasonlítás	Átlag (1)	Átlag (2)	t-próba	M-W próba	t-próba	M-W próba
Férfi + Nő	1. Kor \leq 40 2. Kor $>$ 40	35.8	19.6	0.002	0.014	+	+
Férfi + Nő	1. Férfiak 2. Nők	30.9	28.1	0.625	0.871	-	-
Kor \leq 40	1. Férfiak 2. Nők	38.4	31.6	0.400	0.635	-	-
Kor $>$ 40	1. Férfiak 2. Nők	19.0	20.9	0.756	0.903	-	-
Férfiak	1. Kor \leq 40 2. Kor $>$ 40	38.4	19.0	0.006	0.058	+	-
Nők	1. Kor \leq 40 2. Kor $>$ 40	31.6	20.9	0.185	0.178	-	-

- Amikor a t-próba és a Mann-Whitney próba az utókép időtartam átlagok összehasonlításakor (Átlag (1) és Átlag (2)) szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$)

A legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti Férfi+Nő utókép időtartamok szignifikánsan eltérnek egymástól. A 40 év feletti tesztalányok utókép időtartama szignifikánsan rövidebbnek mutatkozik (29. táblázat 1. adatsor). Eszerint a teljes mintahalmazban a 40 év feletti tesztalányok a hirtelen színátmenettel kiváltott utóképet átlagosan 45%-kal rövidebb időtartamban érzékelik, mint legfeljebb 40 éves társaik.

- Amikor a t-próba szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$) és a Mann-Whitney próba nem mutat szignifikáns eltérést ($p > 0.05$) az utókép időtartam átlagok összehasonlításakor (Átlag (1) és Átlag (2))

A t-próba szerint a legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti Férfiak utókép időtartam átlagai szignifikánsan eltérnek; az eltérés a legfeljebb 40 éves férfiaknál magasabb. Mann-Whitney próbával azonban ez az eltérés nem szignifikáns (29. táblázat 5. adatsor). Jóllehet, alacsony az elemszám (legfeljebb 40 éves férfi – 16 fő, 40 év feletti férfi – 10 fő, disszertáció 3.3. fejezet 16. táblázat), de a 29. táblázat 3. és 4. oszlopa szerint a legfeljebb 40 éves férfiak utókép időtartam átlaga (Átlag(1)) kétszerese a 40 év feletti férfiak utókép időtartam átlagának (Átlag(2)). Ezért a t-próba eredményét elfogadtam. Következésképpen, a 40 év feletti

férfiakhoz képest a legfeljebb 40 éves férfiak a hirtelen színátmenettel kiváltott utóképet hosszabb időtartamban érzékelik.

- Amikor az utókép időtartam átlagok összehasonlításakor (Átlag (1) és Átlag (2)) a t-próba és Mann-Whitney próba egyike sem mutat szignifikáns különbséget

Nem látható szignifikáns különbség a Férfi+Nő utókép időtartamok között a teljes mintahalmazon (29. táblázat 2. adatsor). Hasonlóképpen, nincs szignifikáns eltérés a legfeljebb 40 éves férfiak és nők utókép időtartamai között (29. táblázat 3. adatsor). A 40 év feletti férfiak és nők utókép időtartamai között ugyancsak nem található szignifikáns eltérés (29. táblázat 4. adatsor).

Nem szignifikáns az eltérés, de a legfeljebb 40 éves nők utókép időtartam átlaga a 40 év feletti nők utókép időtartam átlagának másfélszerese (29. táblázat 6. adatsor). A határozottabb szignifikancia értékeléshez alacsony az elemszám (10 fő legfeljebb 40 éves nő, 5 fő 40 év feletti nő; disszertáció 3.3. fejezet 16. táblázat). Ugyanakkor, a teljes mintahalmazban a legfeljebb 40 éves Férfi+Nő utókép időtartam átlagok szignifikánsan magasabbak a 40 év feletti Férfi+Nő utókép időtartam átlagoknál. Ez utóbbiak figyelembevételével a legfeljebb 40 éves nők utókép időtartam átlagértékeit hosszabbnak tekintem a 40 év feletti nőknél tapasztaltakhoz képest.

Fentiek alapján a színes-színes méréssorozat teljes mintahalmazának eredményeiből megállapítható, hogy a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama független a nemtől. A legfeljebb 40 éves tesztalanyoknál a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartam mindkét nemnél meghaladta a 40 év feletti tesztalanyoknál tapasztalt utókép időtartamokat, azaz az utókép időtartam az életkorral csökken.

B/ Színes-szürke méréssorozat eredmények összehasonlítása a tesztalanyok életkora és neme szerint

A színes-szürke méréssorozathoz a 12 színátmenet (disszertáció 3.3. fejezet, 17. táblázat) a következő szempontok figyelembevételével került kiválasztásra:

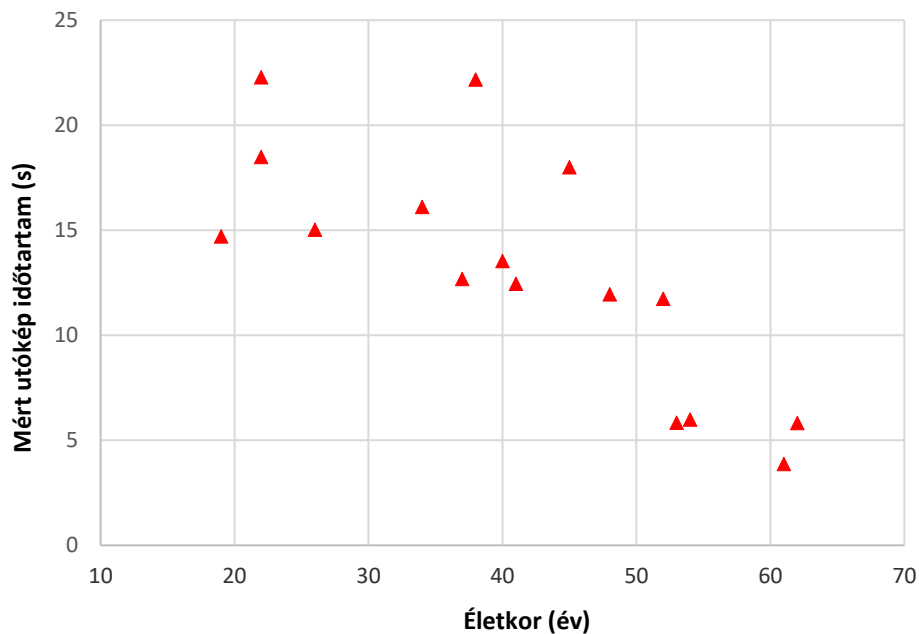
* A színátmenetek között szerepel a három alapszín és 9 kevert szín

* A színátmenetet követő 2. szín (háttérszín) egységesen szürke (disszertáció 3.3. fejezet 12. táblázat E*).

A színátmenetek fénysűrűsége egységes legyen. Így mindegyik szín CIELAB L értékét a legkisebb fénysűrűségű színhez, a kék színhez igazítottuk (disszertáció 3.3. fejezet, 12. táblázat B*).

A színes-szürke méréssorozat módszere a disszertáció 3.3. fejezetében részletesen olvasható.

Az utókép időtartam, valamint az életkor és a nem közötti összefüggések értékeléséhez minden tesztalanyra kiszámítottam a 12 színátmenet időtartam átlagát. Az utókép időtartam átlagokat az életkor függvényében a 63. ábra szemlélteti.



63. ábra
Színes-szürke mérésorozat utókép időtartam átlagok az életkor függvényében

A 63. ábrán a pontfelhő diagramon a 20-60 életév tartományban az utókép időtartam átlagok életkorral csökkenő tendenciája figyelhető meg. Tekintve, hogy az adatpontok a korrallal csökkenő tendencia mellett széles tartományban szóródnak, a diagram önmagában nem elegendő támpont az utókép időtartam életkor függésének tisztázására. Ezért a tesztalanyokat a 30. táblázatnak megfelelően két életkor csoportba osztottam. Az utókép időtartam átlagokat a legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti részhalmazokra bontottam és a részhalmazok összehasonlítását $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney (M-W) próbának vettem alá. Ugyancsak a 30. táblázatban látható az utókép időtartam átlagok nemek szerinti bontása is. Az utókép időtartam átlagokat $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney (M-W) próba segítségével a nemek szerinti bontásban is összehasonlítottam.

Az alacsony mintaszám (kevés tesztalany) miatt az életkor és a nem részhalmazokat a színes-színes mérésorozat értékeléstől eltérően, nem bontottam tovább (30. táblázat).

30. táblázat
Színes-szürke mérésorozat utókép időtartam átlagok összehasonlítása
(„+” szignifikáns eltérés $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten)

Összehasonlítás	Átlag (1)	Átlag (2)	t-próba eredmény	M-W próba eredmény	t-próba	M-W próba
1. Kor \leq 40 2. Kor $>$ 40	16.9	9.46	0.004	0.005	+	+
1. Férfiak 2. Nők	12.8	13.7	0.754	0.588	-	-

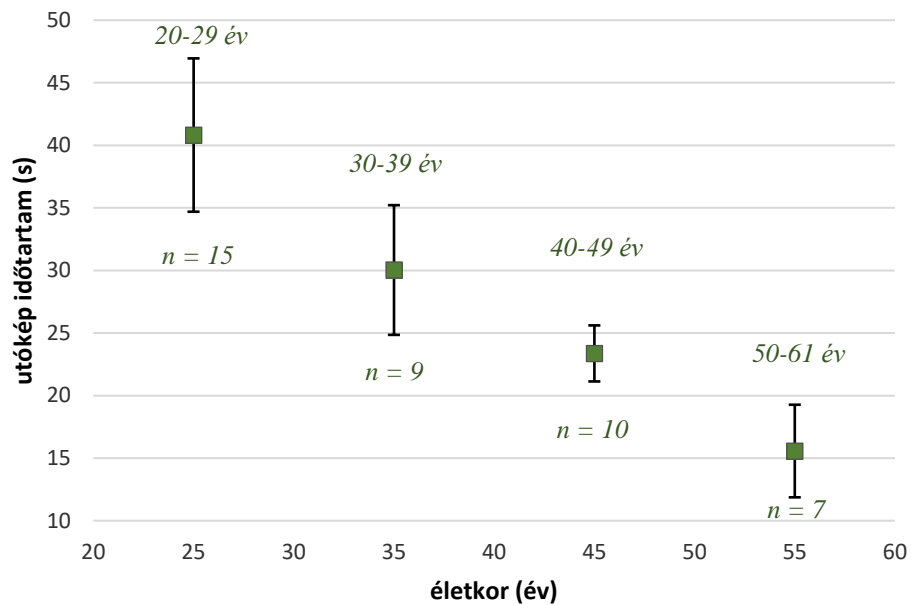
- Amikor a t-próba és a Mann-Whitney próba az utókép időtartam átlagok összehasonlításakor (Átlag (1) és Átlag (2)) szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$)
A legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti tesztalányok utókép időtartam átlagai szignifikánsan eltérnek. A legfeljebb 40 éves tesztalányok utókép időtartam átlaga szignifikánsan magasabb, mint a 40 év felettieké (30. táblázat 1. adatsor). A színes-szürke mérésorozat eredményei szerint a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama az életkorral csökken.
- Amikor az utókép időtartam átlagok összehasonlításakor (Átlag (1) és Átlag (2)) a t-próba és Mann-Whitney próba egyike sem mutat szignifikáns különbséget
Nem látható szignifikáns különbség a férfi és nő utókép időtartam átlagok között (30. táblázat 2. adatsor). A színes-szürke mérésorozat eredményei szerint a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama független a nemtől.

C/ Színes-színes és színes-szürke mérésorozatok utókép időtartamának részletes értékelése 10 éves korcsoportokban

Az utókép időtartamok korfüggését részletes összehasonlításban, 10 éves korcsoportokban is megvizsgáltam.

A *színes-színes* mérésorozat 10 éves korcsoportok utókép időtartam átlagait a 64. ábra mutatja. Az ábra az utókép időtartam átlagokat a standard hibával együtt mutatja. Ha a hibasávok között nincs átfedés, akkor az utókép időtartam átlagok eltérése szignifikáns.

A színes-színes mérésorozatban részt vevő egy fő 61 éves tesztalnyt az 50-59 éves korcsoportba soroltam, amely a továbbiakban az 50-61 éves korcsoport (31. táblázat).



64. ábra
Utókép időtartam átlagok színes-színes mérésorozat 10 éves korcsoportokban.
n = korcsoport tesztalny létszám

A 64. ábrán egyértelműen látható, hogy a 20-29 év és 40-49 év; a 30-39 év és 50-61 év korcsoportok utókép időtartama szignifikánsan eltér, hossza az életkorral csökken. Ugyancsak szignifikáns az eltérés a 40-49 év és az 50-61 év korcsoportok utókép időtartama között. Következésképpen, a pontfelhő diagramon (63. ábra) megjelölt tendenciát a 64. ábra megerősíti, miszerint a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama az életkorral csökken.

A 31. táblázatban a színes-színes mérésorozat 10 éves korcsoportjainak utókép időtartam átlagait hasonlítottam össze t-próba és Mann-Whitney próba segítségével $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten.

31. táblázat
Színes-színes méréssorozat utókép időtartam átlagok 10 éves korcsoportok szerinti
összehasonlítása
(„+” szignifikáns eltérés $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten)

Utókép időtartam átlagok				
Korcsoport (év)	t-próba ($\alpha = 0.05$)	M-W próba ($\alpha = 0.05$)	t-próba	M-W próba
20-29 és 30-39	0.193	0.325	-	-
20-29 és 40-49	0.016	0.134	+	-
20-29 és 50-61	0.002	0.008	+	+
30-39 és 40-49	0.263	0.683	-	-
30-39 és 50-61	0.040	0.039	+	+
40-49 és 50-61	0.101	0.051	-	-

- Amikor a 31. táblázatban feltüntetett 10 éves korcsoportok utókép időtartam átlagaiban a t-próba és a Mann-Whitney próba egyaránt szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$) A 20-29 és 50-61; a 30-39 és 50-61 korcsoportok összehasonlításakor az utókép időtartam átlagok szignifikánsan eltérnek (31. táblázat 3. és 5. adatsor). A 20-29 korcsoport utókép időtartam átlaga szignifikánsan magasabb az 50-61 korcsoport utókép időtartam átlagához képest (31. táblázat 3. adatsor). A 30-39 korcsoport utókép időtartam átlaga szignifikánsan magasabb az 50-61 korcsoport utókép időtartam átlagához képest (31. táblázat 5. adatsor). A 31. táblázatban látható 10 éves korcsoportokra bontott eredmények megerősítik, hogy a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama az életkorral csökken.

- Amikor a 31. táblázatban feltüntetett 10 éves korcsoportok utókép időtartam átlagaiban a t-próba szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$), és a Mann-Whitney próba nem szignifikáns

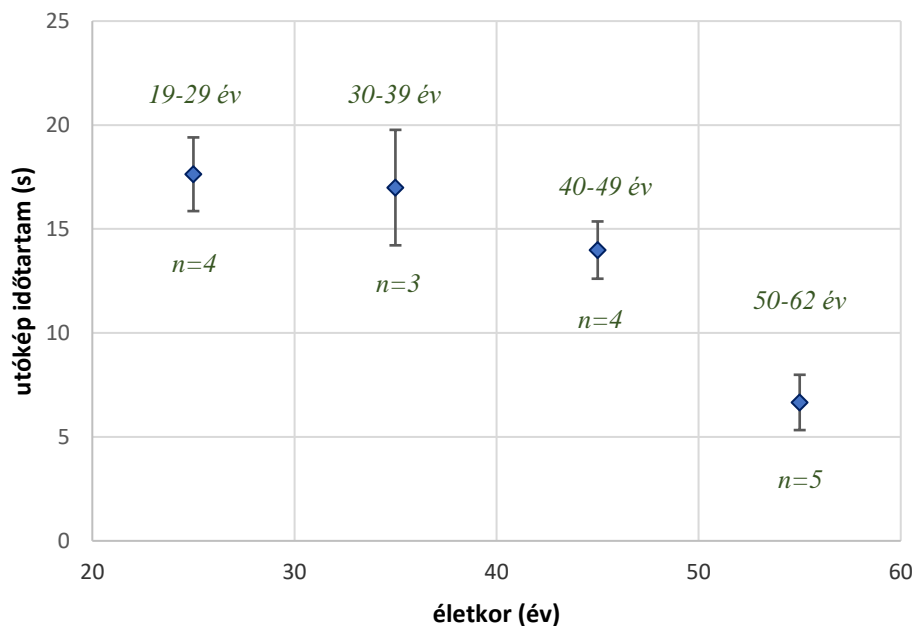
A 20-29 és 40-49 korcsoportok összehasonlításakor az utókép időtartam átlagok a t-próba szerint szignifikánsan eltérnek, de a Mann-Whitney próba nem mutat szignifikáns különbséget. Tekintve, hogy a 20-29 korcsoport utókép időtartam átlaga a 40-49 korcsoport utókép időtartam átlagának csaknem kétszerese (64. ábra), a t-próba szignifikáns eredményét elfogadtam. Ebből következően a 20-29 korcsoport által érzékelt utókép időtartamot hosszabbnak tekintem.

- Amikor a 31. táblázatban feltüntetett 10 éves korcsoportok utókép időtartamában a t-próba és a Mann-Whitney próba egyike sem mutat szignifikáns eltérést

Érdekes tapasztalat, hogy a 20-29 és 30-39; a 30-39 és 40-49; a 40-49 és 50-61 korcsoportok, tehát a 10 évnyi korkülönbséget mutató korcsoportok összehasonlításakor az utókép időtartam átlagok között nincs szignifikáns eltérés. 20 évnyi korkülönbséget mutató korcsoportok, így a 20-29 és 40-49; a 30-39 és 50-61 korcsoportok összehasonlításakor a hirtelen színátmenettel

kiváltott utókép időtartamban szignifikáns eltérést találunk, amely a fiatalabb korcsoportokban az idősebbekhez képest szignifikánsan hosszabb utókép időtartammal társul.

A *színes-szürke* mérésorozat 10 éves korcsoportjainak utókép időtartam átlagait a 65. ábra mutatja. Az ábra az utókép időtartam átlagokat 10 éves korcsoportokban a standard hibával együtt mutatja. Ha a hibasávok között nincs átfedés, akkor az utókép időtartam átlagok eltérése szignifikáns.



65. ábra
Utókép időtartam átlagok színes-szürke mérésorozat 10 éves korcsoportokban.
n = korcsoport tesztalany létszám

A 65. ábrán látható, hogy a 19-29 év, 30-39 év és 40-49 év korcsoportok hasonló utókép időtartamot érzékelnek, míg az 50-62 év korcsoport az előbbieknél szignifikánsan rövidebb utókép időtartamot érzékel. Ebből következik, hogy az 50-62 éves korcsoporthoz képest a fiatalabb korcsoportok hosszabb utókép időtartamot érzékelnek. A 65. ábra megerősítése annak, hogy a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama az életkorral csökken.

A 32. táblázatban a színes-szürke mérésorozat utókép időtartam átlagokat 10 éves korcsoportok szerint összehasonlítottam a t-próba és a Mann-Whitney próba segítségével ($\alpha = 0.05$ szignifikanciaszint).

Egy fő 19 éves tesztalanyt a 20-29 éves korcsoportba soroltam, amely a továbbiakban a 19-29 éves korcsoport. A színes-szürke mérésorozatban részt vevő 61 éves és 62 éves tesztalanyt az

50-59 éves korcsoportba soroltam, amely a továbbiakban az 50-62 éves korcsoport (32. táblázat).

32. táblázat
Színes-szürke mérésorozat utókép időtartam átlagok 10 éves korcsoportok szerinti összehasonlítása
(„+” szignifikáns eltérés $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten)

Utókép időtartam átlagok				
Korcsoportok	t-próba p ($\alpha = 0.05$)	M-W próba p ($\alpha = 0.05$)	t-próba	M-W próba
19-29 és 30-39	0.669	0.513	-	-
19-29 és 40-49	0.146	0.077	-	-
19-29 és 50-62	0.011	0.025	+	+
30-39 és 40-49	0.404	0.289	-	-
30-39 és 50-62	0.045	0.025	+	+
40-49 és 50-62	0.007	0.014	+	+

- Amikor a 32. táblázatban feltüntetett 10 éves korcsoportok utókép időtartam átlagai között a t-próba és a Mann-Whitney próba szignifikáns különbséget mutat ($p < 0.05$)

A 19-29 és 50-62; 30-39 és 50-62; 40-49 és 50-62 korcsoportok utókép időtartam átlagai szignifikánsan eltérnek egymástól. A legidősebb korcsoport utókép időtartama szignifikánsan rövidebb a legfiatalabb korcsoport utókép időtartamánál (65. ábra és 32. táblázat 3. adatsor).

- Amikor a 32. táblázatban feltüntetett 10 éves korcsoportok utókép időtartam átlagai között a t-próba és a Mann-Whitney próba egyike sem mutat szignifikáns eltérést ($p > 0.05$)

A 19-29 és 30-39; 19-29 és 40-49; 30-39 és 40-49 korcsoportok utókép időtartam átlagai között nincs szignifikáns eltérés (32. táblázat 1., 2., 4. adatsor). A felsorolt korcsoportok által érzékelt utókép időtartamát ezért közel azonosnak tekintem.

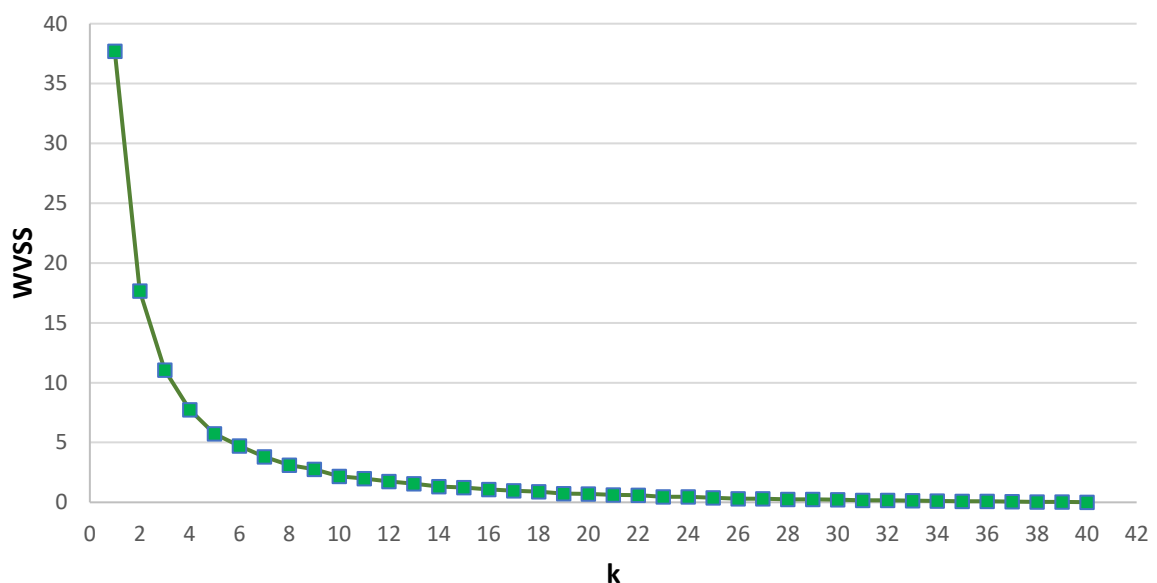
D/ Klaszteranalízis

A nagyobb mintaszám és a hosszú utókép időtartam miatt klaszteranalízist a színes-színes mérésorozaton végeztem. Klaszteranalízissel az utókép időtartam és az utóképet kiváltó színátmenet közötti összefüggést vizsgáltam. Ennek megfelelően az utókép időtartam értékelése és az utóképet kiváltó színátmenet szerint a tesztalanyok klaszter csoportokba sorolhatók.

A színes-színes mérésorozat adathalmazának klaszteranalíziséhez a hierarchia szerint felosztó, az adatpontok és klaszter összerendezés szerint kizáró, a mérésorozat adathalmazának klaszterezésbe bevont pontjai szerint teljes klaszterezési algoritmust, a disszertáció 2.9. fejezetében a 25.(b) ábra szerinti k-közép klaszterezést alkalmaztam. A k klaszterszám meghatározás az ún. „könyök” módszerrel történik, miszerint rögzítjük az egyes k értékek szerinti futtatásokkal kapott klaszteren belüli eltérések négyzetösszegét (Within-Cluster Sum of Square, WCSS). Ezeket a négyzetösszegeket a k függvényében ábrázolva olyan görbét kapunk, amelynek könyökszerű elhajlása (inflexió) megadja a klaszterek számát jelentő k értéket. A klaszteranalízist a mérésorozatok eredményeinek feldolgozását végző Java alkalmazásomba beépített Apache Commons Math 3.6 API modullal végeztem (disszertáció 3.3. fejezet).

A klaszterezésben a színes-színes mérésorozathoz választott 9 színátmenet utókép időtartamainak alábbiak szerint számított viszonyszámait alkalmaztam.

Tesztalanyonként kiszámítottam a 9 színátmenettel kiváltott utókép időtartam átlagot, majd ehhez viszonyítottam tesztalanyonként a 9 színátmenettel kiváltott utókép időtartamokat. A klaszterszám meghatározáshoz a $k = 1$ és $k = 40$ közötti futtatásokkal kapott klaszteren belüli eltérések négyzetösszegét (Within-Cluster Sum of Square, WCSS) a 66. ábra szemlélteti.



66. ábra
Utókép időtartam WCSS-klaszterszám diagramja

A 66. ábrán látható WCSS értékek inflexiós pontja a $k = 2$, a $k = 3$ és a $k = 4$ klaszterszámhoz egyaránt hozzárendelhető. Eszerint a tesztalányok 2, 3, illetve 4 klasztercsoportba sorolhatók. A klaszterszám egyértelmű megállapítására a $k = 2$, $k = 3$ és $k = 4$ klaszterszámú futtatásokban kapott klasztereket az alábbi kritériumok szerint szűrtem:

1. egy klaszterben legalább 10 tesztalány szerepeljen.
2. tekintve, hogy a színes-színes mérésorozatban a férfiak aránya 65.7%, klaszteranalízisemben klaszterenként 50%-75% arányban szerepeljenek.
3. a centroid vektorok, amelyek definícióm szerint egy-egy színátmenetben az utókép időtartam átlagot jelölik, ne vegyenek fel „0” értéket.

A $k = 4$ esetben az 1. szűrő kritérium nem teljesül maradéktalanul, ugyanis a 33. táblázatban a 2., 3. és 4. klaszterben a tesztalányok száma kevesebb mint 10.

33. táblázat

Tesztalányok száma és férfiak aránya a $k = 4$ klaszteranalízissel kapott klaszterekben

Klaszter	1. klaszter	2. klaszter	3. klaszter	4. klaszter
n	23	8	8	2
férfiak aránya	56.1%	75%	75%	50%

A $k = 4$ esetben a 2. szűrő kritérium teljesül, mert a klaszterekben a férfiak aránya 50% - 75% (33. táblázat).

A $k = 4$ esetben a 3. szűrő kritérium teljesül, ugyanis a 34. táblázatban a centroid vektorok nem vesznek fel „0” értéket.

34. táblázat

A $k = 4$ klaszteranalízissel kapott utókép időtartam klaszter centroidok

Utókép időtartam viszonyszám									
Klaszter	B →R2G2	B→G	G2B2→R	G1B3→R	B2R2→G	R →G2B2	R→G	R2G2→B	G→B2R2
1. klaszter	1.253	1.349	1.027	1.097	0.834	0.939	0.782	0.748	0.972
2. klaszter	1.346	1.045	0.794	0.676	0.541	1.448	1.102	0.827	1.221
3. klaszter	1.011	1.308	0.613	0.740	1.271	1.773	0.663	0.739	0.882
4. klaszter	2.227	0.689	0.769	0.712	0.793	0.361	1.563	0.811	1.076

Tekintve, hogy a $k = 4$ klaszterszámnál az 1. szűrő kritérium nem teljesül maradéktalanul, ettől a klaszterszámtól a továbbiakban eltekintettem.

A $k = 3$ klaszterszám esetében az 1. szűrő kritérium teljesülése hiányos, ugyanis a 35. táblázatban a 3. klaszterben a tesztalányok száma kevesebb mint 10.

35. táblázat

Tesztalányok száma és férfiak aránya a $k = 3$ klaszteranalízissel kapott klaszterekben

Klaszter	1. klaszter	2. klaszter	3. klaszter
n	12	21	8
férfiak aránya	66.7%	66.7%	50%

A $k = 3$ klaszterszám esetében a 2. szűrő kritérium teljesül, mivel a klaszterekben a férfiak aránya 50% - 66.7% (35. táblázat).

A $k = 3$ klaszterszám esetében a 3. szűrő kritérium is teljesül, mert a centroid vektorok nem vesznek fel 0 értéket, ami a 36. táblázat centroid vektoraiban jól látható.

36. táblázat

$k = 3$ klaszteranalízissel kapott utókép időtartam klaszter centroidok

Utókép időtartam viszonyszám									
	B→R2G2	B→G	G2B2→R	G1B3→R	B2R2→G	R→G2B2	R→G	R2G2→B	G→B2R2
1. klaszter	1.168	1.297	0.552	0.657	1.105	1.525	0.844	0.872	0.981
2. klaszter	1.203	1.389	1.035	1.064	0.731	1.118	0.768	0.668	1.024
3. klaszter	1.606	0.812	1.009	0.971	0.830	0.787	1.121	0.858	1.006

A 36. táblázatban az 1. klaszter centroidban az R→G2B2 (vörös → türkizkék) színátmenetnél kiemelkedően hosszú a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama, míg az előbbinek inverz G2B2→R (türkizkék → vörös) színátmenetnél kiemelkedően rövid az utókép időtartam.

A 2. klaszter centroid nem tartalmaz kiemelkedő viszonyszámot.

A 3. klaszter centroidban kiemelkedően hosszú utókép időtartam tapasztalható a B→R2G2 (kék → olívaöld) színátmenetnél. Megjegyzendő, hogy e színátmenet inverze, az R2G2→B (olívaöld → kék) színátmenet nem eredményezett kiemelkedően rövid utókép időtartamot.

Össességében a $k = 4$ klaszterszámhoz képest a $k = 3$ klaszterszám közelebb áll a szűrő kritériumok teljes megvalósulásához. A hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartamok csoportosításában a $k = 3$ klaszterszámnál három kiemelkedő értékelési viszonyszám, mégpedig két kiemelkedően magas (hosszú utókép időtartam) és egy kiemelkedően alacsony (rövid utókép időtartam) értékelési viszonyszám adja meg a hierarchia szerint felosztó, k -közép klaszterezés szélső értékeit (36. táblázat). A centroidokban a többi viszonyszám a kiemelkedő értékek közötti köztes tartomány.

A $k = 2$ klaszterszám esetében mindhárom szűrő kritérium teljesül.

A 37. táblázatban látható, hogy a két klaszterben a tesztalanyok száma meghaladja a 10 főt (1. szűrő kritérium teljesülése).

37. táblázat
Tesztalanyok száma és férfiak aránya a $k = 2$ klaszteranalízissel kapott klaszterekben

Klaszter	1. klaszter	2. klaszter
tesztalanyok száma	20	21
férfiak aránya	65%	61.9%

A férfiak aránya klaszterenként a 61.9% - 65% tartományban van (2. szűrő kritérium teljesülése).

A 38. táblázat centroid vektoraiban nem található 0 érték (3. szűrő kritérium teljesülése).

Tehát a $k = 2$ klaszterszám megfelel mindhárom szűrő kritériumnak.

38. táblázat
A $k = 2$ klaszteranalízissel kapott klaszter centroidok

Klaszter	B → R2G2	B → G	G2B2 → R	G1B3 → R	B2R2 → G	R → G2B2	R → G	R2G2 → B	G → B2R2
1. klaszter	1.430	0.978	0.826	0.779	0.811	1.328	0.965	0.788	1.097
2. klaszter	1.120	1.508	0.948	1.068	0.907	1.025	0.758	0.743	0.924

A 38. táblázat szerinti 1. klaszterben a B → R2G2 (kék → olívazöld) színátmenetnél kiemelkedően magas viszonyszám jelzi a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartam kiemelkedő hosszát. Figyelemre méltó, hogy ugyanez a színátmenet eredményezte a $k = 3$ klaszterszám szerinti kiemelkedően hosszú utókép időtartamot is (36. táblázat).

A 38. táblázat szerinti 2. klaszterben a B → G (kék → zöld) színátmenetnél is kiemelkedően magas viszonyszám tükrözi a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép kiemelkedően hosszú időtartamát. Ugyanebben a klaszterben kiemelkedően alacsony viszonyszám kíséri az R2G2 → B (olívazöld → kék) színátmenetet, amely inverze az 1. klaszterben kiemelkedő magas viszonyszámot eredményező színátmenetnek.

A hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartamok csoportosításában $k = 2$ klaszterszámnál ugyancsak három kiemelkedő értékelési viszonyszám, konkrétan két kiemelkedően magas (hosszú utókép időtartam) és egy kiemelkedően alacsony (rövid utókép időtartam) értékelési viszonyszám adja meg a hierarchia szerint felosztó, k -közép klaszterezés szélső értékeit (38. táblázat). A két klaszter centroidjaiban a többi viszonyszám a kiemelkedően magas és kiemelkedően alacsony utókép időtartam értékek közötti köztes tartomány.

Összegzés

A *színes-színes* méréssorozat teljes mintahalmazának statisztikai elemzése alapján az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama független a nemtől. A teljes mintahalmaz statisztikai elemzésében a 40 év feletti tesztalanyoknál a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama mindkét nemnél átlagosan 45%-kal rövidebb volt a legfeljebb 40 éves tesztalanyoknál tapasztalt utókép időtartamokhoz képest, azaz, az utókép időtartam az életkorral csökken, amelyet a *színes-színes* méréssorozat utókép időtartam átlagok 10 éves korcsoportokra bontott statisztikai elemzése is megerősít.

A *színes-szürke* méréssorozat eredményei és 10 éves korcsoportokra bontott elemzései megerősítik a *színes-színes* méréssorozatban levont következtetéseket, miszerint az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama független a nemtől és az életkorral csökken.

Klaszteranalízissel a nagyobb elemszámmal (tesztalany létszám) rendelkező *színes-színes* méréssorozatban a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartam kiemelkedően magas és kiemelkedően alacsony értékei mentén hierarchia szerint felosztó, k-közép klaszterezéssel csoportosítottam. A csoportosítással $k = 2$ és $k = 3$ számú klaszterbe rendeztem a hirtelen színátmenettel kiváltott utóképek kiemelkedően magas (hosszú) és kiemelkedően alacsony (rövid) időtartam értékeit, a közöttük elhelyezkedő köztes utókép időtartam értékekkel. Klaszteranalízis során megállapítottam, hogy a kiemelkedően hosszú utókép időtartamot kiváltó színátmenet inverze kiemelkedően rövid időtartamú utóképet eredményezhet, és fordítva, a kiemelkedően rövid utókép időtartamot kiváltó színátmenet inverze kiemelkedően hosszú utókép időtartamot eredményezhet. Azaz, az inverz színátmenetek ellentétesen eltérő utókép időtartamot eredményezhetnek.

4.5. Szimulációs és önméréses kiegészítő vizsgálatok a házi védés során feltett opponensi kérdések megválaszolásához

A házi védés során a 2., a 3. és a 4. tézissel kapcsolatos opponensi kérdések megválaszolásához szimulációs és önméréses kiegészítő vizsgálatokat végeztem. A kiegészítő vizsgálatok részletesen a Függelék F3. fejezetében olvashatók.

2. tézishez kapcsolódó opponensi kérdés:

A kutatás során egy Dell E4200 laptop kijelzőjét használta, valamint egy HP ZR2440w típusú monitort vizsgált. Miből lehet következtetni arra, hogy további megjelenítők bevonása is hasonló eredményeket szolgáltatna? (Függelék F3.1. fejezet)

Kiegészítő vizsgálataim eredményeként ismét megállapíthattam, hogy újabb sorozatú IPS megjelenítő bevonásával – ez esetben Fujitsu B22W-6 LED IPS megjelenítővel – az érzékelt utókép a régebbi sorozatú megjelenítőn tapasztaltnál képest szignifikánsan erősebb. Mindez megerősíti a 2. tézisben szereplő állításokat a régebbi sorozatú (Dell E4200 notebook) és az újabb sorozatú (HP ZR2440w típus saját példány) megjelenítők összehasonlító értékelésében.

3. és 4. tézishez kapcsolódó opponensi kérdés:

A CIE színínger-megfeleltető függvényei 10 fokos és 2 fokos látómező esetén is adottak. Hogyan befolyásolná a kapott eredményeket, ha a 43. ábrán bemutatott 10 fokos látómező helyett 2 fokos látómezővel vizsgálná a jelenséget? (Függelék F3.2. fejezet)

Kiegészítő vizsgálataim eredményeként megállapítottam, hogy az utókép erősséget és időtartamot nem befolyásolja szignifikánsan a vizsgálati látótér 10° vagy 2° elrendezése.

4.6. A kutatás folytatásának irányai

Kutatásom folytatásaként a későbbiekre a következőket tervezem:

- hirtelen színátmenettel kiváltott utókép mérések mintaszámának növelése további tesztalanyok bevonásával, a statisztikai szignifikancia megerősítésére.
- numerikus kinetikai szimulációs modell további fejlesztése.
- valós élethez illesztett alkalmazások fejlesztése például környezetadaptáció, közlekedésbiztonság és látványtervezés területeken. A közlekedésbiztonság területén például felmerül a lehetőség az adott útszakaszon elhelyezett világító reklámtáblák zavaró hatásának vizsgálatára. Utókép-jellemzéssel, a helyszíni megvilágítás spektrum és fénysűrűség mérések alapján, megfelelően fejlesztett szimuláció alkalmazásával várhatóan megállapítható, hogy adott világító reklámtábla zavaró hatása veszélyesnek minősül, vagy sem.
- a szimulált utókép folyamat megjelenítése PDT diagramon, és ennek alkalmazása a szintévesztéssel összefüggő vizsgálatok fejlesztésében.
- a kutatásomban kidolgozott utókép mérési módszerek alkalmazhatósága a szintévesztés diagnosztikában.
- a továbbfejlesztett szimulációs modell beépítése a RetModel, illetve a VirtColSim alkalmazásokba.

Összefoglalás

5. Összefoglalás

Látószervünk, a szem az ember kiemelkedően fontos orientációs és környezetadaptációs érzékszerve. Látószervünkben az A-vitamin (retinol, fotopigment kromofór csoport előanyag) nélkülözhetetlen szereplője a fényingert ingerületté alakító biokémiai-élettani folyamatnak. Ismeretes, hogy napi szinten szükség van megfelelő mennyiségű A-vitamin bevitelre (férfiak 700 µg/nap, nők 600 µg/nap; maximum 1,5 mg/nap [NHS, 2021]). Ez utóbbi élelmiszeranalitikai megközelítések, Doktori Iskolát megelőző korábbi feladataimmal kapcsolatosan műszeres analitikai méréseket végeztem, végül továbbfejlesztettem az A-vitamin és mellette az antioxidáns tulajdonságokkal rendelkező E-vitamin meghatározás szabvány szerinti analitikai módszerét, konkrétan optimalizáltam a vizsgálati mintaelőkészítést. Margarin minták A- és E-vitamin meghatározásakor a mintaelőkészítés optimális hőmérséklet és optimális időtartam paramétereit a forrásponti hőmérsékletben és az elszappanosításhoz szükséges lehető legrövidebb időtartamban állapítottam meg.

Élettani jelentősége mellett a látás folyamatának egyik kiemelt társadalmi vetülete a közlekedésbiztonság kérdése. Például, éjszakai közlekedés során lényeges, hogy a színes reklámtáblák utóképe mennyi ideig, és milyen mértékben okoz szubjektív eltérést (virtuális színérzetet), akár zavart a látásviszonyokban.

Kutatásomban a hirtelen színátmenettel kiváltott virtuális színérzet erősséget és időtartamot szimulációs számításokkal és önmérési módszerrel meghatároztam.

Ennek megfelelően, kutatásom első részében numerikus kinetikai modellt dolgoztam ki, amellyel szimulációsan meghatároztam a beeső fény hirtelen színátmenetével kiváltott virtuális színérzet (utókép) erősségét és időtartamát. E munkámhoz a csapok érzékenységi dinamikáját leíró korábbi kinetikai modellből merítettem [Alpern et al., 1971; Smith et al., 1983]. A szimulációs számításokat önmérési vizsgálatokkal ellenőriztem (1. tétiscsoport, 2. tétis).

Kutatásom második részében a virtuális színérzet (utókép) erősségét és időtartamát Témavezetőmmel együtt színes-színes és színes-szürke méréssorozatokban határoztam meg az életkor és a nem befolyásának megállapítására. Az eddigi eredményeket statisztikai elemzéssel és klaszteranalízissel értékeltem (3-4. tétis).

Az 1. tétiscsoport 1.1. tétisében részletezettek szerint megállapítottam, hogy numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulált hirtelen színátmenetekkel CCFL, IPS, RGB LED és háromszínű lézeres megjelenítők mindegyikén érzékelhető hirtelen színátmenettel kiváltott gamuton kívüli és színatkón belüli utókép, azaz relatív virtuális színérzet.

A relatív virtuális színérzet különböző megjelenítőkön történő érzékelhetősége a 2-4. tézisben foglalt munkák alapja.

Az 1. téziscsoport 1.2. tézisében részletezettek szerint megállapítottam, hogy numerikus kinetikai modell alkalmazásával szimulált hirtelen színátmenetekkel CCFL és IPS megjelenítőkön gamuton és színpatkón kívüli utókép, azaz valódi virtuális színérzet nem tapasztalható. CCFL és IPS megjelenítőkön csak gamuton kívüli és színpatkón belüli utókép, azaz relatív virtuális színérzet tapasztalható. RGB LED megjelenítőkön a B (kék) gamut pontnál, háromszínű lézeres megjelenítők esetében pedig az R (vörös), a G (zöld) és a B (kék) gamut pontoknál közel valódi virtuális színérzet érzékelhető.

A 2. tézisben részletezettek szerint megállapítottam, hogy a virtuális színérzet erősség *önmérési* módszerrel kapott, statisztikailag árnyaltabb eredményei négy színátmenetnél, a B2R2→G (bíbor→zöld), G→B2R2 (zöld→bíbor), B→R2G2 (kék→olívazöld), R→G (vörös→zöld) színátmeneteknél megerősítik a numerikus kinetikai modellel végzett *szimulációs számításokat*. Mindkét módszerrel az újabb sorozatú IPS folyadékkristályos megjelenítőkön tapasztalható erősebb virtuális színérzet. Numerikus kinetikai modellel végzett szimulációs számítások alapján a régi sorozatú LCD-TN megjelenítőhöz képest az újabb sorozatú IPS típusú megjelenítőkön a virtuális színérzet átlagosan 54%-kal erősebb.

Az eredmények támogatják a numerikus kinetikai modell alkalmazhatóságát és rávilágítanak továbbfejlesztésének szükségességére.

A 3. tézisben részletezettek szerint megállapítottam, hogy a *színes-színes* méréssorozat statisztikai elemzése, továbbá részletesebb, 10 éves korcsoportokra bontott statisztikai értékelése szerint az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége független az életkortól és a nemtől.

A *színes-szürke* méréssorozat statisztikai elemzése, továbbá részletesebb, 10 éves korcsoportokra bontott statisztikai értékelése szerint az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége független az életkortól és a nemtől.

Klaszteranalízissel a nagyobb elemszámmal (tesztalany létszám) rendelkező *színes-színes* méréssorozatban a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erősség kiemelkedően magas és kiemelkedően alacsony értékei mentén k-közép klaszterezéssel csoportosítottam. A csoportosítással 3 klaszterbe rendeztem a B2R2→G (bíbor→zöld) színátmenetet kísérő kiemelkedően magas és a G→B2R2 (zöld→bíbor) inverz színátmenetet kísérő kiemelkedően alacsony utókép erősség értékelési viszonyszámok közötti értéktartományt.

A 4. tézisben részletezettek szerint megállapítottam, hogy a *színes-színes* méréssorozat teljes mintahalmazának statisztikai elemzése alapján az azonos mérési körülmények között hirtelen

színátmenettel kiváltott utókép időtartama független a nemtől. A teljes mintahalmaz statisztikai elemzésében a 40 év feletti tesztalanyoknál a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama mindkét nemnél átlagosan 45%-kal rövidebb volt a legfeljebb 40 éves tesztalanyoknál tapasztalt utókép időtartamokhoz képest, azaz, az utókép időtartam az életkorral csökken, amelyet a *színes-színes* méréssorozat utókép időtartam átlagok 10 éves korcsoportokra bontott statisztikai elemzése is megerősít.

A *színes-szürke* méréssorozat eredményei és 10 éves korcsoportokra bontott elemzései megerősítik a *színes-színes* méréssorozatban levont következtetéseket, miszerint az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama független a nemtől és az életkorral csökken.

Klaszteranalízissel a nagyobb elemszámmal (tesztalany létszám) rendelkező *színes-színes* méréssorozatban a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartam kiemelkedően magas és kiemelkedően alacsony értékei mentén hierarchia szerint felosztó, k-közép klaszterezéssel csoportosítottam. A csoportosítással $k = 2$ és $k = 3$ számú klaszterbe rendeztem a hirtelen színátmenettel kiváltott utóképek kiemelkedően magas (hosszú) és kiemelkedően alacsony (rövid) időtartam értékeit, a közöttük elhelyezkedő köztes utókép időtartam értékekkel. Klaszteranalízis során megállapítottam, hogy a kiemelkedően hosszú utókép időtartamot kiváltó színátmenet inverze kiemelkedően rövid időtartamú utóképet eredményezhet, és fordítva, a kiemelkedően rövid utókép időtartamot kiváltó színátmenet inverze kiemelkedően hosszú utókép időtartamot eredményezhet. Azaz, az inverz színátmenetek ellentétesen eltérő utókép időtartamot eredményezhetnek.

Irodalomjegyzék

6. Irodalomjegyzék

6.1. Disszertációhoz kapcsolódó saját publikációk

[S1] Garai L., Horvath A., Modelling of human color perception depending on quick color shifts on screen, 9th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2018) August 22-44, 2018, Budapest, Hungary, p. 223-226, DOI: 10.1109/CogInfoCom.2018.8639909

[S2] Garai L., Horvath A., Simulation of color afterimages: an approach to computing virtual color perception, Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 2019 47(1), p. 17-23, DOI: <https://doi.org/10.33927/hjic-2019-04>

[S3] Garai L., Horvath A., Computing virtual color perception, Tavaszi Szél Konferencia / Spring Wind 2019, II. kötet pp. 518-529

[S4] Garai L., Horvath A., Colour afterimages: computing and measuring virtual colour perception provided by two display types, 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2020) September 23-25, 2020, Stockholm, Sweden (online), pp. 109-114, DOI: 10.1109/CogInfoCom50765.2020.9237835

[S5] Garai L., Horvath A., Measuring colour afterimage perception, 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2020) September 23-25, 2020, Stockholm, Sweden (online), pp. 191-196, DOI: 10.1109/CogInfoCom50765.2020.9237851

[S6] Garai L., Horvath A., Persistence and subjective scoring of colour afterimages depending on age and gender, 12th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2021) September 23-25, 2021, Budapest (online), pp. 25-30

[S7] Garai L., Horvath A., Measuring Age-Dependence of Colour Afterimage Perception, Light and Engineering, 2022, Volume 30, No. 2, pp. 70-81, DOI: 10.33383/2021-061

6.2. Disszertációhoz kapcsolódó korábbi saját publikációk

[S8] Garai L.: Improving HPLC Analysis of Vitamin A and E: Use of Statistical Experimental Design, *Procedia Computer Science* 108C (2017), p. 1500–1511, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.177>

[S9] Garai L.: Use of statistical software for experimental design, *Proceedings of the 10th International Conference on Applied Informatics*, Eger, Hungary, January 30–February 1, 2017, pp. 103–110, DOI: 10.14794/ICAI.10.2017.103

[S10] Garai L.: Design of Experiment - Optimization of HPLC Analysis of Vitamin A and E in Margarine and Vegetable Oil, *Journal of Food Technology Research*, 2016, (3):2, p. 99-104, ISSN(e): 2312-3796/ISSN(p): 2312-6426

[S11] Garai L., Fekete J.: LC Determination of Residual Primary Amine Content in Epoxy-Amine Adducts, *LCGC Europe*, 2015, 28(7): 370-375

[S12] Garai L., Bálint M., Örsi F.: Az A- és E-vitaminok szabvány szerinti HPLC-meghatározási módszerének felülvizsgálata, *Élelmiszervizsgálati Közlemények*, 2010, 56(1): 5-17

[S13] Fekete J., Vilimi L., Garai L.: Aromás diaminok kioldódásának vizsgálata indirekt és direkt polikarbamid vastagbevonatokból, *Műanyag és Gumi*, 2009, 46(8): 317-320

6.3. Irodalomjegyzék

224/2011. (X. 21.) Korm. rendelet a reklámtáblák, reklámhordozók és egyéb reklám célú berendezések közutak melletti elhelyezésének részletes szabályairól

Acer Aspire 1670 adatlap, https://www.miniputer.com/Acer/Aspire_1670.html

Adelson, HE (1982): The delayed rod afterimage, *Vision Res.* 1982, 22 pp. 1313 - 1328, Vision Research Laboratory, University of Michigan, Department of Psychology, Ann Arbor, MI 48109, U.S.A.

Alpern M, Maaseidvaag F, Ohba N (1971): The kinetics of cone visual pigments in man, *Vision Research*, 1971, 11(6), pp. 539-549

Anderson B (2019): Pattern Recognition: An introduction, *Scientific e-Resources*, 2019, pp. 105-107

Ábrahám Gy, Kovács G, Antal Á, Németh Z, Veres ÁL (2014a): Jármű optika, BME MOGI, 2014a, 2.1. fejezet (https://mogi.bme.hu/TAMOP/jamu_optika/ch02.html#ch-II.1); Letöltve: 2022.05.18.)

Ábrahám Gy, Wenzelné Gerőfy K., Antal Á., Kovács G (2014b): Műszaki Optika, BME-MOGI, 2014b, 3.2. fejezet, p. 74

Ábrahám Gy, Wenzelné GK., Antal Á., Kovács G (2014c): Műszaki Optika, BME-MOGI, 2014c, 3.2. fejezet, pp. 124-126

Ábrahám Gy, Wenzelné GK., Antal Á, Kovács G (2014d): Műszaki Optika, BME-MOGI, 2014d, 11.1.2. fejezet, p. 135

Ábrahám Gy, Wenzelné GK., Antal Á, Kovács G (2014e): Műszaki Optika, BME-MOGI, 2014e, 4.13.1. fejezet, pp. 168-172

Bailey KD (1994): *Typologies and Taxonomies*, Sage Publications, Thousand Oaks, 1994, pp. 34-35

Barris CM, Frumkes ET (1978): Rod-Cone interaction in human scotopic vision – IV. cones stimulated by contrast flashed influence rod threshold, *Vision Research*, 1978, 18:801-808

Bódis B (2017): TN, IPS, OLED, QLED - milyen kijelzőt válasszak?, *PC World*, 2017, <https://pcworld.hu/pcwpro/tn-ips-oled-qled-milyen-kijelzot-valasszak-240570.html> (Letöltve: 2022.05.18.)

Buck SL (1997): Influence of Rod Signals on Hue Perception: Evidence from Successive Scotopic Contrast, *Vision Research*, 1997, 37(10): pp. 1295-1301

Calabria AJ, Fairchild MD (2001): Herding CATs: A Comparison of linear chromatic adaptation transforms for CIECAM97s, *Society for Imaging Science and Technology 9th Color and Imaging Conference*, 2001, pp. 174-178(5)

CIE 15:2018 Colorimetry

Claude J (2008): *Morphometrics with R*, Springer Science & Business Media, 2008, p. 123

Csuti P (2016): Világítódíóták fotometriai és színingermetriai jellemzése, doktori értekezés: Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar, 2016

Dell E4200 adatlap: <https://www.dell.com/learn/us/en/04/shared-content~data-sheets~en/documents~e4200-e4300-specsheet-unitedstates.pdf> (Letöltve: 2022.05.18.)

- Dervic EH (2016): Soil data clustering by using K-means and fuzzy K, Telfor Journal, 2016, (8):1, pp. 56-61
- Dong B, Holm L, Bao Min (2017): Cortical mechanisms for afterimage formation: evidence from interocular grouping, Nature Scientific Reports, 2017, 7: p. 1-13
- Duane TD (2005): Clinical Ophthalmology, Medical Department Harper & Row, 2005 (2), pp. 38-55
- EIZO FlexScan® L360 és L66 specifikáció, 1998, <https://www.eizoglobal.com/support/db/files/catalogs/lcd/l360-l66.pdf> (Letöltve: 2022.05.18.)
- Elliott SL, Werner JS, Webster MA (2012): Individual and age-related variation in chromatic contrast adaptation, 2012, Journal of Vision 12(8):11, pp. 1-21
- Engbert R, Kliegl R (2003): Microsaccades uncover the orientation of covert attention Vision Research 2003, (43):9, pp. 1035-1045 New York, 1964
- Erber JT (2020): Aging & Older Adulthood, Fourth Edition, Wiley Blackwell, 2020, p. 115
- Estivill-Castro V (2002): Why so many clustering algorithms: a position paper, ACM SIGKDD Explorations Newsletter, 2002, Volume 4, Issue 1, pp. 65-75
- Everitt BS (2011): Cluster analysis, Wiley, Chichester, West Sussex, U.K, 2011, ISBN 9780470749913.
- Fekete RT, Tamás P, Antal Á, Décsei-Paróczy A (2014): 3D megjelenítési technikák, BME-MOGI, 2014, 2.4. fejezet
- Fonyó A, Kollai M (2011): Orvosi élettan, Medicina Könyvkiadó, Budapest, 2011, 3.2. fejezet
- Fränti P, Sieranoja S (2019): How much can k-means be improved by using better initialization and repeats? Pattern Recognition, 2019, Volume 93, pp. 95-112
- Griew S, Fellows BJ, Howes R (1963): Duration of spiral aftereffects as a function of stimulus exposure and age, Perceptual and Motor Skills, 1963, (17):1, pp. 210-210
- Guenther BD., Steel D (2018): Encyclopedia of Modern Optics, Second Edition, Academic Press (Cambridge, MA), 2018
- Guild J (1931): The Colorimetric Properties of the Spectrum, Phil. Trans. Roy. Soc., London, Series A, 1931, Volume 230, pp. 149-187.
- Hayhoe MM, Benimoff NI, Hood DC (1987): The time course of multiplicative and subtractive adaptation processes, Vision Research, 1987, 27, pp. 1981–1996.
- Herceg J (2017): LCD evolúció - 5, Magyar Elektronika, 2017.06.08., <https://www.magyar-elektronika.hu/10005-tartalom/1884-lcd-evolucio> (Letöltve: 2022.05.18.)
- HP ZR2440w adatlap: <https://support.hp.com/in-en/document/c03025540#AbT0> (Letöltve: 2022.05.18.)
- HP ZR2440w gamut: https://www.tftcentral.co.uk/reviews/hp_zr2440w.htm#calibration (Letöltve: 2022.05.18.)
- Horváth A (2013): A fényterjedés fizikája, SZE-MTK, Fizika és Kémia Tanszék, Győr, 2013, pp. 165-178, ISBN 978-963-7175-97-8
- Horváth A, Dömötör G (2014): Computational Simulation of Mesopic Vision Based on Camera Recordings, Light and Engineering, 2014, (22):1 pp. 61-67 (2014)

- Horváth A, Dömötör G (2015): Egy retina--szimulációs szoftver és lehetséges alkalmazásai, Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 10. Országos Konferenciája, 2015, pp. 408-417
- Hunt RWG (2005): The reproduction of colour, John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2005, pp. 11-12
- Hurvich LM (1981): Color Vision, Sinauer Associates Inc., Sunderland, Massachusetts, USA 1981
- Ikeda M, Phuangsuwan C (2018): Strong effect of the simultaneous color contrast in an afterimage, Color Research And Application, 2018, pp. 1-4
- ISO/CIE 10527-1991, Colorimetric Observers, Table 1
- Katoh N, Ito M (2000): Applying non-linear compression to the three-dimensional gamut mapping, Journal of Imaging Science and Technology, 2000, Volume 44, Number 4, pp. 328-333(6)
- Kefalov VJ (2012): Rod and Cone Visual Pigments and Phototransduction through Pharmacological, Genetic, and Physiological Approaches. The Journal of Biological Chemistry, 2012, 287(3): 1635-1641.
- Kennel G (2006): Color and Mastering for Digital Cinema, Focal Press, Oxford, 2006, first edition, p. 173
- Kingdom FAA, Touma S, Jennings BJ (2020): Negative afterimages facilitate the detection of real images. Vision Research, 170: 25-34.
- Kline DW, Nestor S (1977): Persistence of complementary afterimages as a function of adult age and exposure, Experimental Aging Research, 1977, 3(3)
- Kline DW, Orme-Rogers C (1978): Examination of stimulus persistence as the basis for superior visual identification performance among older adults, Journal of Gerontology, 1978, (33):1, pp. 76-81 (a Kline, Nestor, 1977 cikk megjelenése előtt elfogadva).
- Knoblauch K, Vital-Durand F, Barbur JL: Variation of chromatic sensitivity across the life span, Vis. Res., 2001, (41): 23-36
- Kumar JA (2010): Textbook of Biochemistry for Nurses, 2010, IK International Publishing House Pvt. Ltd., Delhi, pp. 156
- Linksz A (1964): An essay on color vision and clinical color-vision tests, Grune and Stratton, New York, 1964, pp. 254
- Lukács B (1988): An Analytic Model For The Riemannian Space of Colors, Acta Physica Polonica, 1988, Vol. B19, p. 259
- Magyari Zsófia (2018): Közlekedési csomópontok láthatósági nehézségei és a balesetek összefüggései, Műszaki Katonai Közlöny, 2018, XXVIII. évfolyam, 1. szám, pp. 49-59
- Manzotti R (2017): A Perception-Based Model of Complementary Afterimages, 2017, SAGE Open, pp. 1-10
- Mikamo M, Slomp M, Raytchev B, Tamaki T, Kaneda K (2013): Perceptually inspired afterimage synthesis, Computers & Graphics, 2013, vol. 37 pp. 247-255
- MSZ 9620-1:1990 Fénytechnikai terminológia. A sugárzás alapfogalmai, mennyiségei és egységei

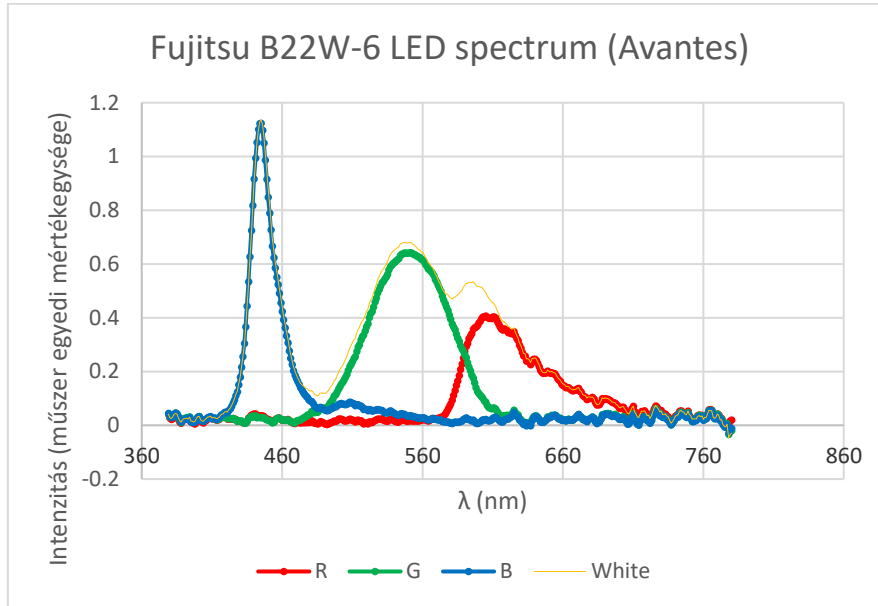
- NHS, Vitamin A, <https://www.nhs.uk/conditions/vitamins-and-minerals/vitamin-a/> (Letöltve: 2022.05.18.)
- NTSC, Federal Communications Commission (FCC), 1953
- Padgham CA (1953): Quantitative study of visual after-images, 1953, vol. 37, pp. 165-170
- Padgham CA (1968): Measurements of the colour sequences in positive visual after-images, *Vision Res.*, 1968 VOLUME (8)7, pp. 939-949
- Padgham CA, Saunders JE (1975): *The perception of light and colour*, Academic Press, New York, 1975
- Perusek L, Maeda T (2013): Vitamin A Derivatives as Treatment Options for Retinal Degenerative Diseases, *Nutrients*. 2013, 5(7), pp. 2646–2666
- Petrov YA, Popple AV (2002): Effects of negative afterimages in visual illusions, *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, (19):6, pp. 1107-1111
- Phuangsuwan C, Ikeda M, Mepeam J (2018): Color appearance of afterimages compared to the chromatic adaptation of illumination, *Color Research and Application*, 2018, Volume 43, pp. 349-357
- Powell G, Sumner P, Bompas A (2015): The effect of eye movements and blinks on afterimage appearance and duration, *Journal of Vision*, 2015, (15):20, pp. 1-15
- Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, Hall W, Lamantia AS, White L (2011): *Neuroscience* Sunderland, Mass.: Sinauer, 2011, 5. ed., ISBN 978-0878936953.
- Reidenbach HD (2008): Determination of the time dependence of colored afterimages, *Proceedings Ophthalmic Technologies XVIII*, 2008, Volume 6844
- Rinner O, Gegenfurtner KR (2000): Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination. *Vision Research*, 2000, 40, 1813-1826.
- Ritschel T, Eisemann E (2012): A computational model of afterimages, *Eurographics*, 2012, VOLUME (31)2, pp. 529-534
- Rushton WA (1958): Kinetics of cone pigments measured objectively on the living human fovea, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1958, (74):2, pp. 291-304
- Rushton WA (1963a): A cone pigment in the protanope. *J. Physiol.*, 1963a, 168, pp. 345-359.
- Rushton WA (1963b): The density of chlorolabe in the foveal cones of the protanope., *J. Physiol.*, 1963b, 168, pp. 360-373.
- Rushton WA (1963c): Cone pigment kinetics in the protanope, *J. Physiol.*, 1963c, 168, pp. 374-388
- Rushton WA (1964): Flash photolysis in human cones, *Photochem. Photobiol.*, 1964, 3, pp. 561-577
- Rushton WA, Henry GH (1968): Bleaching and regeneration of cone pigments in man, *Vision Research*, 1968, 8(6), pp. 617-631
- Salgó A (2001): *Élelmiszerkémia és táplálkozás-tan*, Műegyetemi Kiadó, 2001, p. 132
- Schanda J (2007): *Colorimetry: understanding the CIE system*, John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2007, 467 pp.
- Schanda J (2011): *Szín és észlelet - színtervezés számítógépes felhasználás számára*, Typotex Kiadó, Budapest, 2011, 2.3. fejezet

- Smith VC, Pokorny J, Van Norren D (1983): Densitometric measurement of human cone photopigment kinetics, *Vision Res.*, 1983 VOLUME (23)5: 517-524
- Smith T, Guild J (1932): The C.I.E. colorimetric standards and their use, *Transactions of the Optical Society*, 1932 VOLUME (33)3
- Smith M (1987): Descartes's Theory of Light and Refraction: A Discourse on Method, *Transactions of the American Philosophical Society*, Volume 77, Part 3, 1987, p. 77
- Sony Bravia reklámvideó, <https://www.youtube.com/watch?v=7DrFY3H-u8w>
- Stabell U, Stabell B (1994): Mechanism of Chromatic Rod Vision in Scotopic Illumination, *Vision Research*, 1994, 34(8) pp. 1019-1027
- Stanikunas R., Kulbokaite V., Svegza A., Vaitkevicius H., Daugirdiene A., Kulikowski J. J., Murray I. J (2020): Chromatic fading following complete adaptation to unique hues. *Journal of Vision*, 2020, 20(6): 20.
- Sturr JF, Church KL, Taub HA (1985): Early light adaptation in young, middle-aged, and older observers, *Perception & Psychophysics*, 1985, (37)5, pp. 455-458.
- Sudhakar HH, Venkatesh D (2018): *Basics of Medical Physiology (Fourth Edition)*, 2018, Wolters Kluwer (New Delhi), pp. 352-356
- Süveges Ildikó (2010): *Szemészet*, Medicina Kiadó, 2010
- Suzuki T, Okajima K, Funai T (2012): Development of senile miosis simulator adapting to variable illumination in colour environments, *Optical Review*, 2012, 19: 174–181
- Szabó K (2017): *Fotoreceptorok és ektópikus fotoreceptorok vizsgálata in vivo, in vitro és patológiás körülmények között*, doktori értekezés, Semmelweis Egyetem, 2017
- Szentágothai M (1977): *Functionalis anatomia*, Medicina Kiadó, Budapest, 1977, VOLUME 3, pp.
- Tan, Steinbach M, Vipin K (2006): *Bevezetés az adatbányászatba*, Panem Kft, Budapest., 2006
TFT megjelenítő leírása: https://www.tftcentral.co.uk/reviews/hp_zr2440w.htm#calibration
- Virsu V, Laurinen P (1977): Long-lasting afterimages caused by neural adaptation. *Vision Research*, 1977, 17(7): 853-860.
- Wenzel Klára, *A színes látás modellezése mérés technikai alkalmazásokkal*, kandidátusi értekezés: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, 1991
- Werner A, Bayer A, Schwarz G, Zrenner E, Paulus W (2010): Effects of ageing on postreceptor short-wavelength gain control: Transient tritanopia increases with age. *Vision Research*, 2010, 50: 1641-1648.
- Wright WD (1929): A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Trans. Opt. Soc.*, 1929, Volume 30, pp. 141-161.
- Wuerger S (2013): Colour constancy across the life span: Evidence for Compensatory Mechanisms, *Plos One*, 2013, Volume 8, issue 5
- Zaidi Q, Ennis R, Cao D, Lee BB (2012): Neural locus of color afterimages. *Current Biology*, 2012, 22(3): 220-4.
- Zhang J, Liu L, (Member, IEEE), Fan Y, Zhuang L, Zhou T, Piao Zh (2019): *Wireless Channel Propagation Scenarios Identification: a perspective of Machine Learning*, In press, IEEE Access, 2019

Függelék

F1. Megjelenítő spektrum kiegészítés

- Fujitsu B22W-6 LED (sorozatszám: YV3U028945)



67. ábra













Fujitsu B22W-6 LED (sorozatszám: YV3U028945) IPS megjelenítő spektruma

F2. A munkámban szereplő színátmenet színek

F2.1. Szimuláció és színes-színes méréssorozat

39. táblázat














Szimuláció és színes-színes méréssorozat színjelölései

Színkód	Szín	Szín megnevezés
R		vörös
R3G1		narancs
R2G2		olívazöld
R1G3		zöldessárga
G		zöld
G3B1		kékeszöld
G2B2		türkizkék
G1B3		középkék
B		kék
B3R1		lila
B2R2		bíbor
B1R3		magenta

F2.2. Színes-szürke méréssorozat

40. táblázat

Színes-szürke méréssorozat színjelölései

Színkód	Szín	Szín megnevezés
E*		szürke
R*		sötétvörös
R3G1*		barna
R2G2*		sötét olívazöld
R1G3*		mély olívazöld
G*		sötétzöld
G3B1*		kékeszöld
G2B2*		sötét türkizkék
G1B3*		középkék
B*		kék
B3R1*		lila
B2R2*		bíbor
B1R3*		sötét magenta

F3. Kiegészítő vizsgálatok a házi védés során feltett opponensi kérdések megválaszolásához

F3.1. Kiegészítő vizsgálatok a 2. tézishez kapcsolódóan

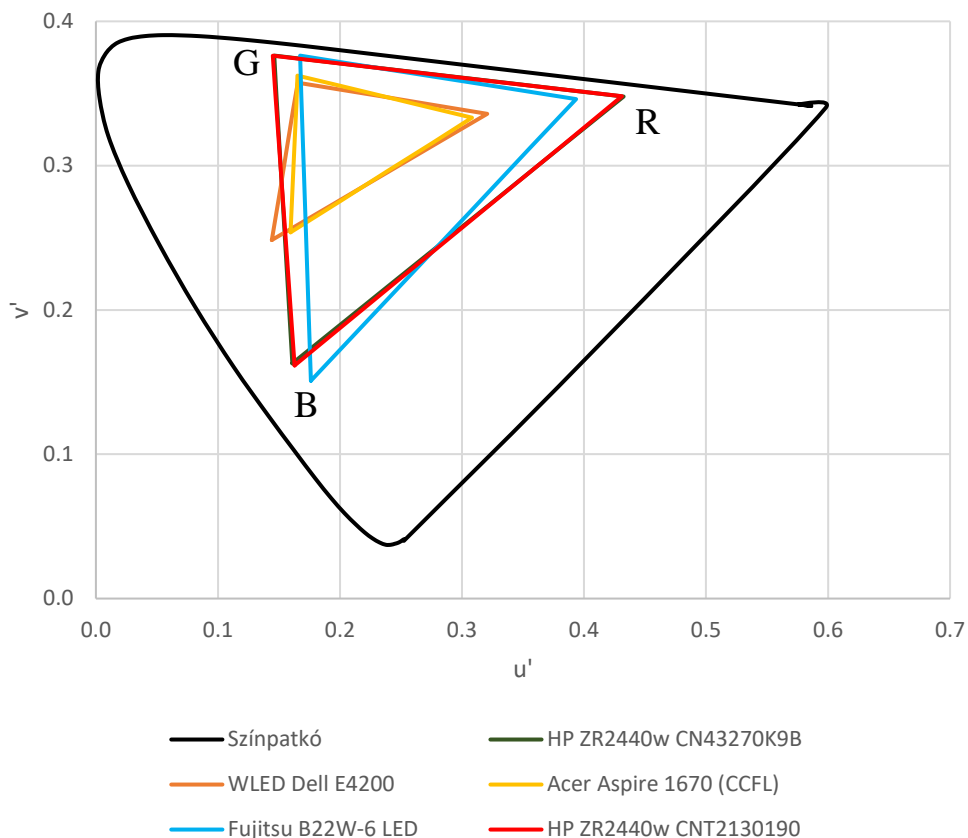
Kiegészítő vizsgálataimmal az alábbi opponensi kérdésre adtam választ:

A kutatás során egy Dell E4200 laptop kijelzőjét használta, valamint egy HP ZR2440w típusú monitort vizsgált. Miből lehet következtetni arra, hogy további megjelenítők bevonása is hasonló eredményeket szolgáltatna?

Disszertációmban 2 db régebbi és 3 db újabb sorozatú megjelenítőre jellemző gamutot határoztam meg (disszertáció 34. - 35. ábra). A gamut háromszögek CIE 1976 u'v' színességi koordinátáit tekintve, régebbi sorozatú megjelenítő gamutok között kis eltérés tapasztalható. Ugyancsak kis eltérés tapasztalható az újabb sorozatú megjelenítő gamutok között. Ugyanakkor a régebbi és újabb sorozatú megjelenítő gamutok között nagy különbség tapasztalható, ami az azonos sorozaton belüli gamut különbség többszöröse.

Válaszomat az alábbiakban részletezem (159-164. oldal).

A disszertációmban meghatározott 2 db régebbi és 3 db újabb megjelenítő gamutot a 68. ábra szemlélteti CIE 1976 u'v' színességi koordináta-rendszerben.



68. ábra

Régebbi és újabb sorozatú megjelenítő gamutok (R - vörös, G - zöld, B - kék megjelenítő alapszínekkel)

A 68. ábra által szemléltetett régebbi sorozatú megjelenítő gamutok az alábbiak:

- A szimulációban alkalmazott Acer laptop kijelző gamut (68. ábra, Acer Aspire 1670 (CCFL)), LCD-TN panel, CCFL háttérvilágítás, gyártási év: 2008;
- Az önmérésben alkalmazott Dell E4200 laptop kijelző gamut (68. ábra, WLED Dell E4200), LCD-TN panel, CCFL háttérvilágítás, gyártási év: 2008.

A 68. ábrán szemléltetett újabb sorozatú megjelenítő gamutok az alábbiak:

- A vizsgálatokban alkalmazott 2 db HP ZR2440w megjelenítő gamut (68. ábra, HP ZR2440w CN43270K9B, HP ZR2440w CNT2130190), gyártási év: 2011;
- Fujitsu Scenicview B22W-6 LED megjelenítő gamut (68. ábra, Fujitsu B22W-6 LED), amelyet a disszertációmban érdekességként tüntettem fel, a kutatásomban nem kapott szerepet; Gyártási év: 2010.

A) A 68. ábra grafikus elemzése alapján:

- a régebbi sorozatú megjelenítőkre hasonló gamut jellemző.
- az újabb sorozatú megjelenítőkre hasonló gamut jellemző
- az újabb sorozatú megjelenítők közül adott gyártó két azonos termékére jellemző gamutok, azaz az 68. ábra feltüntetett két HP ZR 2440w megjelenítő gamut egybevágónak tekinthető.
- az újabb sorozatú megjelenítő gamutokat jóval nagyobb terjedelem jellemzi a régebbi típusú megjelenítőkhöz képest.

B) A kutatásomban szereplő megjelenítők színgazdagságának kvantitatív jellemzése

A kutatásomban szereplő megjelenítők színgazdagságát kvantitatívan az 1. ábrán $u'v'$ színességi koordináta-rendszerben szereplő gamut alapszínének élénkségével ($c_{alapszín}$) jellemeztem az (1) egyenlet szerint.

$$c_{alapszín} = \sqrt{(u'_{alapszín} - u'_w)^2 + (v'_{alapszín} - v'_w)^2}, \quad (1)$$

ahol u'_w és v'_w a megjelenítő gamut fehér pontjának színességi koordinátái. Számításukat a (2) és a (3) egyenletek mutatják.

$$u'_w = \frac{u'_R + u'_G + u'_B}{3} \quad (2)$$

$$v'_w = \frac{v'_R + v'_G + v'_B}{3} \quad (3)$$

u'_R u'_G u'_B és v'_R v'_G v'_B a vörös (R), zöld (G) és kék (B) megjelenítő gamut háromszög csúcsok színességi koordinátái.

Régebbi és újabb sorozatú megjelenítőtípus közötti élénkség összehasonlítást a HPZR2440w és a Dell E4200 típusokon végeztem el (41. táblázat). Az egyes megjelenítő alapszín élénkségek különbségét a Δc értéke mutatja.

41. táblázat

Régebbi és újabb sorozatú megjelenítők élénkségének összehasonlítása u'v' színességi koordinátarendszerben a gamut háromszög csúcspontoknál

	HPZR2440w élénkség	Dell E4200 élénkség	Élénkség különbség:
Gamut pont	C _{HP}	C _F	Δc
R	0.1931	0.1128	0.0803
G	0.1287	0.0624	0.0663
B	0.1579	0.0929	0.0650

Két újabb sorozatú megjelenítőtípus összehasonlítását a 42. táblázat szemlélteti a HP ZR2440w és a Fujitsu B22W-6 típusok példájában. Az élénkségek összehasonlítását a Δc érték mutatja.

42. táblázat

Újabb sorozatú megjelenítők élénkségének összehasonlítása u'v' színességi koordinátarendszerben a gamut háromszög csúcspontoknál

	HPZR2440w élénkség	Fujitsu B22W-6 LED élénkség	Élénkség különbség:
Gamut pont	C _{HP}	C _{Fujitsu}	Δc
R	0.1825	0.1578	0.0247
G	0.1241	0.1157	0.0085
B	0.1482	0.1565	-0.0083

A régebbi és újabb sorozat összehasonlításából kapott Δc értékek (41. táblázat) vörös szín esetében háromszorosa, zöld és kék szín esetében nyolcszorosa a két újabb sorozatú megjelenítő összehasonlításából kapott Δc értékeknek (42. táblázat).

Az újabb típusú megjelenítő gamutok közötti eltérés szignifikánsan kisebb a régebbi és újabb megjelenítő típusok között tapasztalhatókhöz képest.

C) Önméréses vizsgálat

Az 68. ábra szerinti HP ZR2440w és a Fujitsu Scenicview B22W-6 LED megjelenítők példáján önméréssel (saját magamon saját magam által végzett méréssel) megvizsgáltam, hogy újabb

sorozatú megjelenítőtípusok összehasonlításában a mért virtuális színérzet (utókép) erősség azonosnak tekinthető-e. Az önmérés során a disszertáció 3.4. fejezetben leírt módszert követtem. Megjelenítőnként 5 párhuzamos mérést végeztem.

A Fujitsu B22W-6 LED és a HP ZR2440w megjelenítőkre kapott önmérési utókép értékelési pontszámok összehasonlítását a 43. táblázat tartalmazza.

43. táblázat

HP ZR2440w és Fujitsu B22W-6 LED megjelenítőkön önméréssel mért virtuális színérzet erősség értékelési pontszámok a kiváltó színátmenetek feltüntetésével

Színátmenet	HP ZR2440w			Fujitsu B22W-6			t-próba p ($\alpha=0.05$)
	Virtuális színérzet értékelési pontszám	szórás	relatív szórás	Virtuális színérzet értékelési pontszám	szórás	relatív szórás	
R2G2→B	2.2	0.4	20%	1.8	0.4	25%	0.195
B→G	8.2	0.4	5%	8.4	0.5	7%	0.545
B2R2→G	8.6	0.5	6%	8.6	0.5	6%	1.000
G→B2R2	2.6	0.5	21%	2.8	0.8	30%	0.667
B→R2G2	8.0	0.7	9%	8.0	1.0	13%	1.000
R→G2B2	4.2	0.8	20%	4.8	1.1	23%	0.359
G1B3→R	3.0	0.7	24%	2.8	0.4	16%	0.608
R→G	6.0	0.7	12%	5.8	0.8	14%	0.694
G2B2→R	2.4	0.5	23%	1.6	0.9	56%	0.126

A 43. táblázatban feltüntetett t-próba a két megjelenítő típuson mért virtuális színérzet (utókép) erősségében egyik színátmenet esetében sem mutat szignifikáns különbséget ($p > 0.05$). A Fujitsu B22W-6 LED és a HP ZR2440w megjelenítő típusok esetében a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erősséget azonosnak tekintem. Tehát, az újabb sorozatú megjelenítők között nem tapasztalható szignifikáns különbség a virtuális színérzet erősségben.

A 68. ábra szerinti HP ZR2440w és a Fujitsu Scenicview B22W-6 LED megjelenítők példáján önméréssel (saját magamon saját magam által végzett méréssel) megvizsgáltam, hogy újabb sorozatú megjelenítőtípusok összehasonlításában a mért virtuális színérzet (utókép) időtartam ugyancsak azonosnak tekinthető-e. A Fujitsu B22W-6 LED és a HP ZR2440w megjelenítőkre kapott önméréses utókép időtartamok összehasonlítását a 44. táblázat tartalmazza.

44. táblázat

HP ZR2440w és Fujitsu B22W-6 LED megjelenítőkön önméréssel mért virtuális színérzet időtartamok a kiváltó színátmenetek feltűntetésével

Színátmenet	HP ZR2440w			Fujitsu B22W-6			t-próba p ($\alpha=0.05$)
	Virtuális színérzet időtartam (s)	szórás	relatív szórás	Virtuális színérzet időtartam (s)	szórás	relatív szórás	
R2G2→B	98.4	11.7	12%	98.0	25.6	26%	0.972
B→G	115.4	20.7	18%	104.8	11.5	11%	0.348
B2R2→G	90.4	12.0	13%	82.1	14.1	17%	0.348
G→B2R2	90.9	10.6	12%	99.0	16.1	16%	0.371
B→R2G2	109.8	9.8	9%	100.2	11.3	11%	0.187
R→G2B2	139.0	21.0	15%	135.1	11.6	9%	0.727
G1B3→R	91.1	9.6	11%	96.0	13.9	14%	0.531
R→G	122.4	20.5	17%	107.5	19.3	18%	0.270
G2B2→R	89.5	15.3	17%	93.2	22.8	24%	0.768

Az 44. táblázatban feltűntetett t-próba a két megjelenítő típuson mért virtuális színérzet (utókép) időtartamban egyik színátmenet esetében sem mutat szignifikáns különbséget ($p > 0.05$).

A Fujitsu B22W-6 LED és a HP ZR2440w megjelenítők esetében a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartamot azonosnak tekintem.

Összegezve: a vizsgált újabb sorozatú megjelenítők között nem tapasztalható szignifikáns különbség a virtuális színérzet erősségében és időtartamában.

F3.2. Kiegészítő vizsgálatok a 3. és a 4. tézishez kapcsolódóan

Kiegészítő vizsgálataimmal az alábbi opponensi kérdésre adtam választ:

A CIE színínger-megfeleltető függvényei 10 fokos és 2 fokos látómező esetén is adottak. Hogyan befolyásolná a kapott eredményeket, ha a 43. ábrán bemutatott 10 fokos látómező helyett 2 fokos látómezővel vizsgálná a jelenséget?

A látómezőnek nincs szignifikáns hatása az utókép erősségére és időtartamára. Továbbá, nem állapítható meg a látómező hatása az utókép időtartam nem- és életkor-függésében.

Válaszomat az alábbiakban részletezem (165-168. oldal).

A kérdés precíz megválaszolásához a kutatásomban elvégzett színes-színes vagy színes-szürke mérésorozat utólagos megismétlése lenne szükséges 2 fokos látómezővel. Idő hiányában erre nem volt lehetőségem. Azért, hogy a kérdésre megfelelő választ tudjak adni, utólagosan elvégeztem a numerikus kinetikai modellel alapuló utókép erősség és időtartam szimulációt az utókép mérésorozatokban alkalmazott HP ZR2440w megjelenítő segítségével, 10° és 2° látómezővel egyaránt (alábbiakban A. fejezet). A szimulációs eredmények megerősítésére ugyanezzel a megjelenítőtípussal a disszertáció 3.4. fejezete szerinti önmérési utókép vizsgálatokat 10° és 2° látómezővel egyaránt elvégeztem (alábbiakban B. fejezet).

A) Az utókép erősség és időtartam szimulációs vizsgálata 2° és 10° látómező esetében

Utólagosan elvégeztem a numerikus kinetikai modellel alapuló szimulációt az utókép mérésorozatokban alkalmazott HP ZR2440w megjelenítő esetében, 10° és 2° látómezővel egyaránt. A megjelenítő spektrumból a 10° és a 2° látótérre vonatkozó gamutot a 10° ill. a 2° színínger-megfeleltető függvények (CMF) segítségével számítottam. A szimulációt a 10° és a 2° látómezőre számított gamutokkal egyaránt elvégeztem, és összehasonlítottam a kapott utókép erősségeket (Δc_{\max}) illetve időtartamokat (t_{virtcol}). A szimuláció eredményeit az 45. táblázat szemlélteti.

45. táblázat

10° és 2° látómezőn alapuló szimulációval vizsgált utókép erősségek és időtartamok összehasonlítása

Színátmenet	$(\Delta c)_{\max}$			t_{virtcol}		
	10°IPS	2°IPS	Relatív eltérés: 10° látótér a 2°-hoz képest	10°IPS	2°IPS	Relatív eltérés: 10° látótér a 2°-hoz képest
B→R3G1	0.01244	0.01160	+7.3%	25.0	24.2	+3.3%
B→R2G2	0.00734	0.00597	+22.9%	26.5	25.3	+4.7%
B→R1G3	0.00258	0.00200	+28.6%	37.5	18.0	+108.3%
R3G1→B	0.01559	0.01570	-0.7%	29.8	29.4	+1.4%
R2G2→B	0.01759	0.01764	-0.3%	29.8	29.4	+1.4%
R1G3→B	0.01975	0.01970	+0.3%	32.5	32	+1.6%
G3B1→R	0.01824	0.01962	-7.0%	25.8	26.9	-4.1%
G2B2→R	0.01788	0.01870	-4.4%	25.3	25.8	-1.9%
G1B3→R	0.01751	0.01777	-1.4%	24.9	24.8	+0.4%
R→G3B1	0.01725	0.01832	-5.8%	47.5	44.4	+7.0%
R→G2B2	0.01376	0.01404	-2.0%	49.1	46.9	+4.7%
R→G1B3	0.01110	0.01120	-1.0%	43.1	40.1	+7.5%
G→B3R1	0.01515	0.01574	-3.8%	39.4	40.9	-3.7%
G→B2R2	0.01112	0.01203	-7.5%	41.4	42.3	-2.1%
G→B1R3	0.01290	0.01443	-10.6%	29.7	31.4	-5.4%
B3R1→G	0.00744	0.00985	-24.5%	22.1	23.4	-5.6%
B2R2→G	0.01149	0.01371	-16.2%	30.9	29.9	+3.3%
B1R3→G	0.01553	0.01756	-11.5%	38.5	35.9	+7.2%
B→R	0.01714	0.01682	+1.9%	24.6	24	+2.5%
R→B	0.01384	0.01395	-0.8%	27.3	26.9	+1.5%
R→G	0.01954	0.02137	-8.5%	45.7	41.9	+9.1%
G→R	0.01860	0.02052	-9.3%	26.7	28.1	-5.0%
G→B	0.02200	0.02183	+0.8%	37.4	36.6	+2.2%
B→G	0.00356	0.00606	-41.3%	12.9	17.2	-25.0%

A 10° és 2° látómezőkkel számított utókép erősségek közötti relatív eltérés a 24 választott színátmenetnél -30% és 30% közötti, kivéve a B→G színátmenetet. A színes-színes és színes-szürke mérésorozatokban 30% relatív szórás volt egy mérésre jellemző, ezért a 2° és a 10° látómezőre kapott szimulációs utókép erősség eredményeket azonosnak tekintettem.

A 10° és a 2° látómezőkkel számított utókép időtartamok közötti relatív eltérés 10% körüli, a színes-színes és a színes-szürke mérésorozatokban tapasztalt 30%-os relatív szóráson belülre esik. Egyetlen kivétel a B→R1G3 (kék→zöldessárga) színátmenetnél tapasztalható kiugró

eltérés. Ezért a 10° és a 2° látómezőre kapott szimulációs utókép időtartam eredményeket azonosnak tekintettem.

A szimulációs eredmények szerint (45. táblázat) az utókép erősségek és időtartamok vizsgálatában a kapott eredményeket nem befolyásolja jelentősen, hogy 10° vagy 2° a vizsgálati látótér.

B) Az utókép erősség és időtartam önméréses vizsgálata 10° és 2° látómező esetében

A szimulációs eredmények ellenőrzésének ideális kísérletes módszere a kutatásomban elvégzett színes-színes vagy színes-szürke méréssorozat megismétlése lenne 2° látómezővel. Ez számottevő további időt igényelne, amire most sajnos nem nyílik lehetőségem. Helyettesítő megoldásként saját magam által saját magamon végeztem önméréseket, a disszertáció 3.4. fejezetében leírt módszer szerint. A két méréssorozat:

- 10° látószög: a disszertáció 3.4. fejezetében leírt módszer szerint, 5 párhuzamos mérést végeztem.
- 2° látószög: a disszertáció 3.4. fejezetében leírt módszertől a képernyőn megjelenő kör átmérőjében tértem el. A kör átmérőjét 2° látómezőnek megfelelően állítottam be a Python alkalmazás forráskódjának módosításával. 5 párhuzamos mérést végeztem.

A 10° és 2° látómező esetében önméréssel kapott utókép erősség értékelési pontszámok összehasonlítását a 46. táblázat mutatja.

46. táblázat

10° és 2° látómező esetében önméréssel vizsgált utókép erősségek összehasonlítása.

Látómező	10°			2°			t-próba p ($\alpha = 0.05$)
	átlag	szórás	relatív szórás	átlag	szórás	Relatív szórás	
R2G2→B	2.2	0.4	20%	3.0	0.7	24%	0.065
B→G	8.2	0.4	5%	7.6	0.9	12%	0.217
B2R2→G	8.6	0.5	6%	7.0	2.8	40%	0.249
G→B2R2	2.6	0.5	21%	3.2	0.8	26%	0.217
B→R2G2	8.0	0.7	9%	7.2	0.8	12%	0.141
R→G2B2	4.2	0.8	20%	3.8	1.6	43%	0.641
G1B3→R	3.0	0.7	24%	2.4	0.5	23%	0.172
R→G	6.0	0.7	12%	4.6	1.1	25%	0.048
G2B2→R	2.4	0.5	23%	2.0	1.2	61%	0.524

A 2° látómezőre kapott utókép erősség átlagok átlagosan 10%-kal alacsonyabbak a 10° látómezőre kapott utókép erősség átlagokhoz képest. Az eltéréseket nem tekintettem jelentősnek, mert nem magasabbak az értékelési pontszám átlagok relatív szórásánál. A 10° és 2° eredmények t-próbával történő összehasonlítása szerint nincs szignifikáns különbség ($p > 0.05$) az utókép erősségben a 10° és 2° látótér esetében, kivéve az R→G (vörös→zöld) színátmenetet (46. táblázat). Önméréses vizsgálataim szerint az utókép erőssége nincs szignifikáns összefüggésben a látómezővel 10° és 2° látómező esetében.

A 47. ábra az utókép időtartam önméréses vizsgálati eredményeinek összehasonlítását mutatja 10° és 2° látótér esetében.

47. táblázat

10° és 2° látómező esetében önméréssel vizsgált utókép időtartamok összehasonlítása.

Látómező	10°			2°			t-próba p ($\alpha = 0.05$)
	átlag	szórás	relatív szórás	átlag	szórás	Relatív szórás	
R2G2→B	98.4	11.7	12%	81.8	11.2	14%	0.051
B→G	115.4	20.7	18%	95.9	9.8	10%	0.094
B2R2→G	90.4	12.0	13%	80.0	13.8	17%	0.239
G→B2R2	90.9	10.6	12%	78.1	4.9	6%	0.040
B→R2G2	109.8	9.8	9%	93.7	19.4	21%	0.135
R→G2B2	139.0	21.0	15%	103.5	24.5	24%	0.039
G1B3→R	91.1	9.6	11%	84.2	4.4	5%	0.179
R→G	122.4	20.5	17%	103.1	20.0	19%	0.169
G2B2→R	89.5	15.3	17%	79.7	5.4	7%	0.216

A 2° látómezőre kapott utókép időtartam átlagok átlagosan 16%-kal alacsonyabbak a 10° látómezőre kapott utókép időtartam átlagokhoz képest. Az eltérések az időtartam átlagok relatív szórásával összemérhetők. A 2° és 10° utókép időtartam eredmények t-próbával történő összehasonlítása szerint nincs szignifikáns különbség az utókép időtartamban, kivéve a G→B2R2 (zöld→bíbor) és az R→G2B2 (vörös→türkizkék) színátmeneteket.

Önméréses vizsgálataim szerint az utókép időtartam nem függ jelentősen a látómezőtől.

Összegzés:

Amennyiben 2° látómezővel vizsgálnám az utókép erősséget és időtartamot tesztalanyok bevonásával végzett kísérletsorozatban, nem várható az eredmények szignifikáns eltérése a 10° látómezővel elvégzett vizsgálatokhoz képest. Válaszom megerősítéséhez mérésorozat elvégzése szükséges 2° látómezővel, tesztalanyok bevonásával.

Nyilatkozat

Alulírott Garai Lőrinc kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést saját magam készítettem, és ebben csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Győr, 2022.06.27.

Garai Lőrinc
doktorjelölt