



**SZÉCHENYI
EGYETEM**
UNIVERSITY OF GYŐR

Garai Lőrinc

Kísérőjelenség az emberi látásban: utóképek szimulációs és kísérletes vizsgálata

Doktori tézisek

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

Tartalomjegyzék

1.	Motiváció és célkitűzések.....	3
2.	A kutatásban alkalmazott módszerek	6
3.	Tézisek.....	8
3.1.	1. téziscsoport: [S1], [S2], disszertáció 4.1. fejezet	8
3.2.	2. tézis: [S1], [S2], [S3], disszertáció 4.2. fejezet	19
3.3.	3. tézis: [S5], [S6], [S7], disszertáció 4.3. fejezet	24
3.4.	4. tézis: [S5], [S6], [S7], disszertáció 4.4. fejezet	27
4.	Összefoglalás	31
5.	Publikációs jegyzék	34
5.1.	Disszertációhoz kapcsolódó saját publikációk.....	34
5.2.	Disszertációhoz kapcsolódó korábbi saját publikációk.....	35

1. Motiváció és célkitűzések

Doktori kutatómunkám előtt az emberi látás biokémiai-élettani folyamatához szükséges A vitamin ételmszeranalitikai vizsgálatával, konkrétan módszerfejlesztéssel foglalkoztam. Jelen munkámhoz ez azért kapcsolódik, mert az A vitamin létfontosságú az emberi látásban. A fotoreceptorokban a fényinger ingerületté alakításában kulcsszerepet játszik az A vitamin aldehidből és opszin fehérjéből álló fotopigment fény hatására történő hasadása, majd azt követő újraszintézise. A hasadás-újraszintézis reverzibilis természete ellenére a fotoreceptorokban jelen lévő A vitamin aldehid kiegészítéséhez, pótlásához nélkülözhetetlen napi szinten a megfelelő A vitamin bevitel. Az ételmszer minták A és E vitamin tartalmának meghatározására továbbfejlesztett optimalizáló módszerem részletei a disszertációban olvashatók.

Az utókép (virtuális színérzet) azon vizuális jelenség (hagyományos megfogalmazásban illúzió), 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. A negatív utókép viszont retina és agykérgi jelenség, amelynek hátterét többnyire részletesen leírták. Munkámban a negatív utókép kap szerepet.

Látószervünk, a szem 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, beleértve a szemképrázás elkerülését.

A Széchenyi István Egyetem Fizika és Kémia Tanszékén doktori kutatómunkám előtt folyamatban volt egy olyan szoftver fejlesztése, amely speciális hardverek nélkül képes a vizuális észlelést szimulálni valós környezetben. Ez a RetModel elnevezésű szoftver alkalmas különböző látási fényviszonyok, valamint különböző szövegek, feliratok olvashatóságának vizsgálatára, valós szituációkban. Bemenetként bármilyen elterjedt, szabványos videó- és állóképfomátumot képes fogadni, majd ezt módosítja a retina működésének megfelelően, megmutatva, hogy a retinán, mint szűrőn keresztül milyen kép jut el agyunkig a kérgi feldolgozáshoz. A RetModel szoftverben a retina olyan jellegzetességei szerepelnek, mint az irány szerinti felbontóképesség, a fotoreceptorokban zajló biokémiai folyamatok szimulálása, a változó szín- és fényintenzitás érzékenység.

Mivel a RetModel szoftver kép- és videófeldolgozásra specializált, e szoftverrel jelenleg nem meghatározható az adott megvilágítási paraméterekhez tartozó utóképek erőssége és teljes ideje. Szükségessé vált tehát olyan szimulációs környezet létrehozása, amely alkalmas az utókép (virtuális színérzet) erősségének és az utókép (virtuális színérzet) időtartamának meghatározására különböző bemeneti megvilágítások függvényében.

Ezért kutatásomban két célt követtem.

Doktori kutatómunkám előtt a szakirodalomban már ismert volt a magányos fotoreceptor kinetikai modell, 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

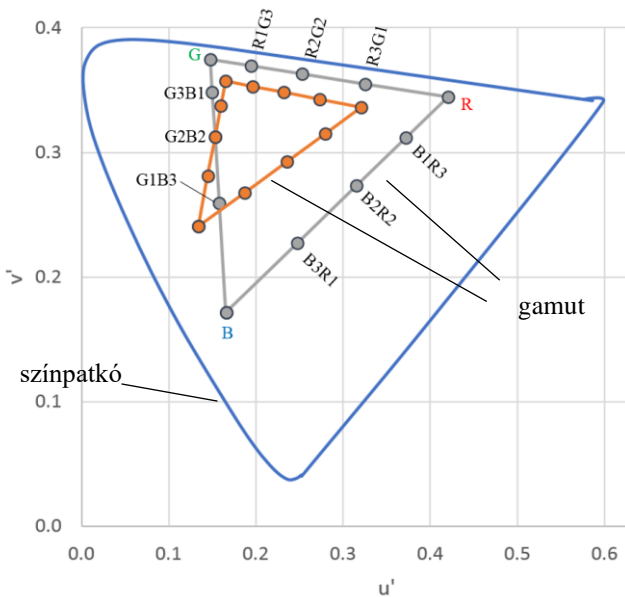
és az utókép (virtuális színérzet) időtartama. Szimulációs számításaimat összehasonlítottam a saját magamon, saját magam által végzett önméréses vizsgálataimmal. Mindez numerikus kinetikai modellem alkalmazhatóságának ellenőrzésére is szolgált.

Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modell szimulációs számításainak ellenőrzésére kutatásom második céljaként Témavezetőmmel együtt, vizsgálati alanyok bevonásával méréssorozatokot végeztünk annak megállapítására, hogy a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép (virtuális színérzet) erőssége és időtartama milyen összefüggést mutat az életkorral és a nemmel. A méréssorozatok eredményhalmazait statisztikai és klaszteranalízissel vizsgáltam.

Munkám eredménye a numerikus kinetikai modell önálló alkalmazhatóságán kívül várhatóan felhasználható például az említett RetModel szoftver kiegészítő fejlesztésére is.

2. A kutatásomban alkalmazott módszerek

Kutatásomban megjelenítő gamutokkal dolgoztam. Egy eszköz gamutja mindazon színek halmaza, amelyeket meg tud jeleníteni. RGB (vörös, zöld, kék alapszínnel működő) eszközök esetében, így a munkámban szerepelő megjelenítők esetében, kétdimenziós színességi koordináta-rendszerben ábrázolva ez háromszög alakú területet jelent. Két általam mért megjelenítő gamutot (disszertáció 3.1. fejezet) szemléltet az 1. ábra a CIE 1976 u^*v^* színességi koordináta-rendszerben. A zöld G, a vörös R, a kék B alapszínek és a számozott gamut pontokkal jelölt kevert színek azok a színek, amelyeket a szimulációs számításokban és a méréssorozatokban beeső fényingerként alkalmaztam és alkalmaztunk. A kevert színek gamut pontjait interpolációval számítottam.



1. ábra

IPS (diagramon szürke) és LCD-TN (diagramon narancssárga) megjelenítő gamutok, valamint színpatkó (diagramon kék) CIE 1976 u^*v^* színességi koordináta-rendszerben

A kutatásomban alkalmazott módszerek a módszer leírások nagy terjedelme miatt részletesen a disszertációban olvashatók.

a/ Numerikus kinetikai modell kialakítása

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 disszertáció 2.4.1 fejezetében részletezett magányos csap érzékenységi kinetikai modellre építettem.

A disszertáció 3.2.1. fejezetében a hirtelen színátmenettel kiváltott virtuális színérzet erősségének és időtartamának numerikus kinetikai modellemmel történő számítását írom le. A 3.2.2. fejezetben bemutatom egy adott színátmenet által kiváltott virtuális színérzet szimulációs számításának példáját. A 3.2.3. fejezetben ismertetem a szimulációhoz készített Java alkalmazásomat.

b/ 41 tesztalanyos színes-színes és 16 tesztalanyos színes-szürke utókép mérőssorozat a szimulációs számítások ellenőrzésére. Szimulációs számítások ellenőrzése önméréssel.

A színes-színes és színes-szürke mérési elrendezés a disszertáció 3.3.1. fejezetében olvasható. A mérések menete és a tesztalanyok utókép értékelése a 3.3.2. fejezetben került kifejtésre.

Az utóképet kiváltó hirtelen színátmenetek kiválasztásáról a disszertáció 3.3.3. fejezete, a vizsgálati sorozatokról a 3.3.4. fejezet tájékoztat.

A tesztalanyok csoportosítása a 3.3.5. fejezetben olvasható.

A színes-színes mérőssorozat klaszteranalízisének módszertani részletei a 2.9. fejezetben található.

Az önmérés módszere a disszertáció 3.4. fejezetében olvasható.

3. Tézisek

3.1. 1. téziscsoport: [S1], [S2], disszertáció 4.1. fejezet

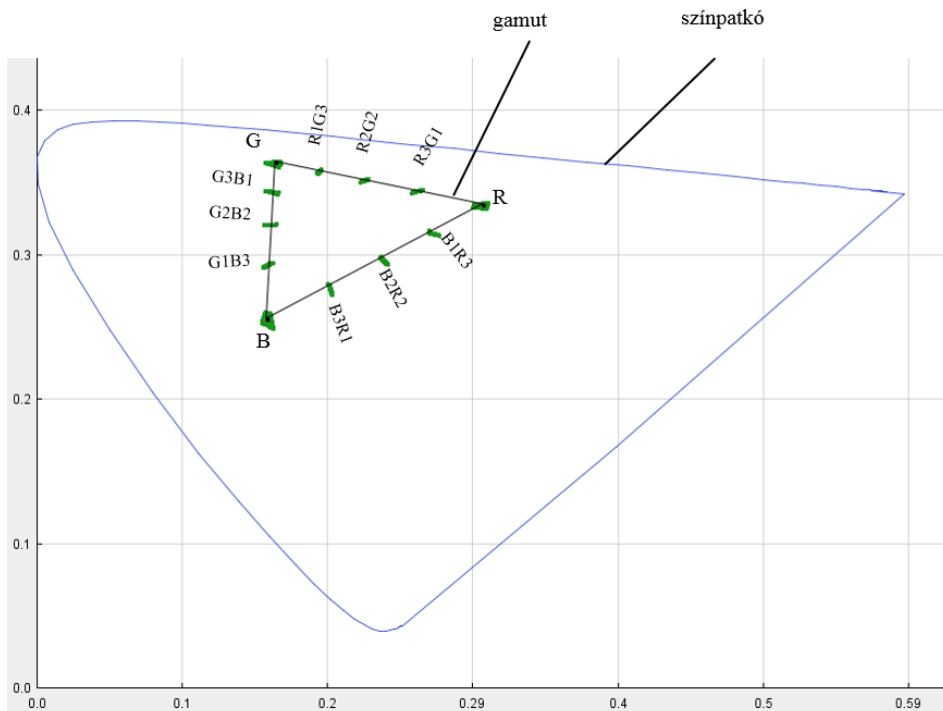
1.1. tézis: [S1], disszertáció 4.1. fejezet

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 paramétereiként tekintett RGB LED megjelenítő gamut irodalmi adat, a CCFL és IPS megjelenítők gamutja munkámban mért adatok.

Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modell szimulációs alkalmazásával grafikusán vizsgáltam, hogy megjelenítő típustól függetlenül elérhető-e gamuton kívüli, relatív virtuális színérzet.



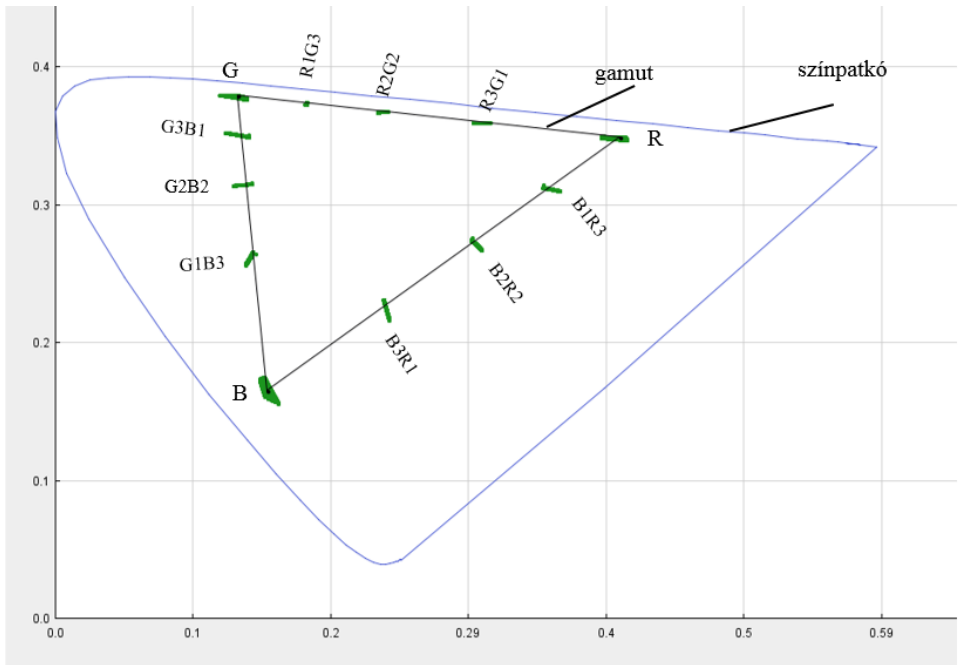
2. ábra

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

Az 2. ábra a CCFL megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció grafikus eredményét mutatja.

A gamut háromszög valamennyi gamut pontjánál a virtuális színérzetek halmaza részben a megjelenítő gamuton kívül (2. ábrán a gamut éleken túlnyúló zöld szakaszok) és teljesen a színpatkón belül helyezkedik el.

Következésképpen, CCFL megjelenítőn relatív virtuális színérzet érzékelhető.

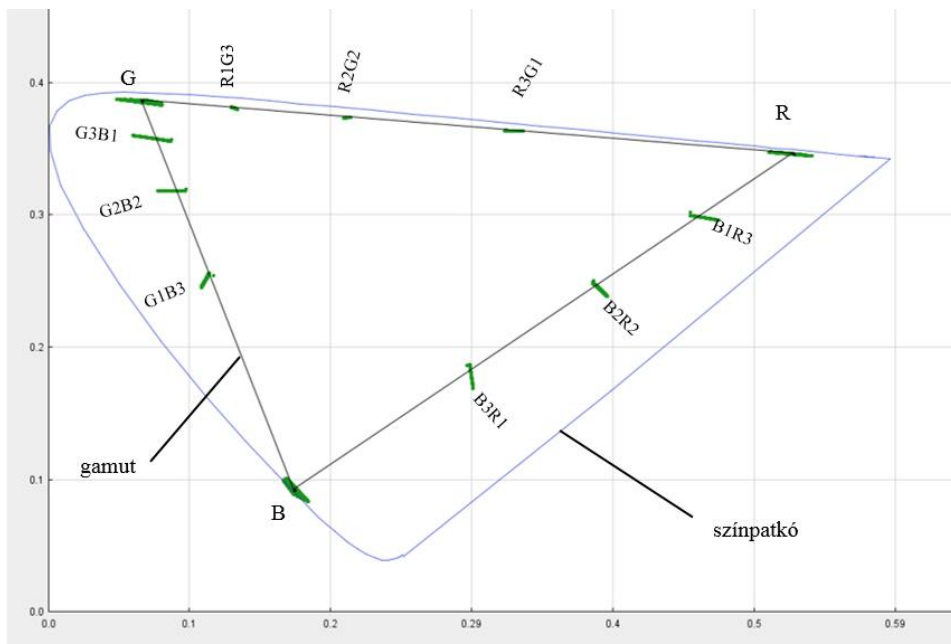


3. ábra

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

A 3. 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.

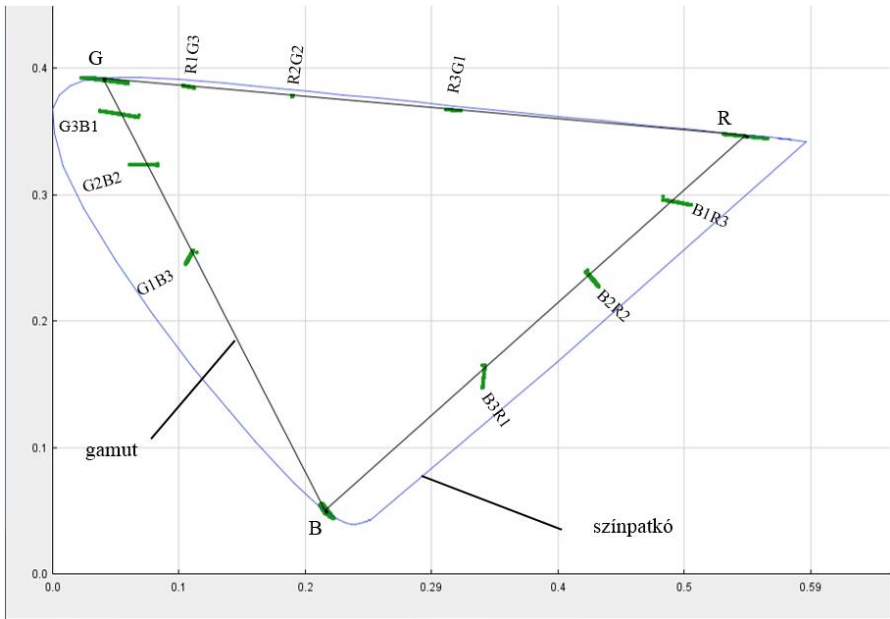
Következésképpen, IPS megjelenítőn relatív virtuális színérzet érzékelhető.



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

A 4. 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 túnyúló zöld szakaszok) és teljesen a színpatkón belül helyezkedik el.

Következésképpen, RGB LED megjelenítőn relatív virtuális színérzet érzékelhető.



5. ábra
Háromszínű lézeres megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális
színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 u'v' színességi
koordináta-rendszerben.

Háromszínű lézeres megjelenítő gamuttal futtatott szimuláció eredményét az 5. 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.

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.

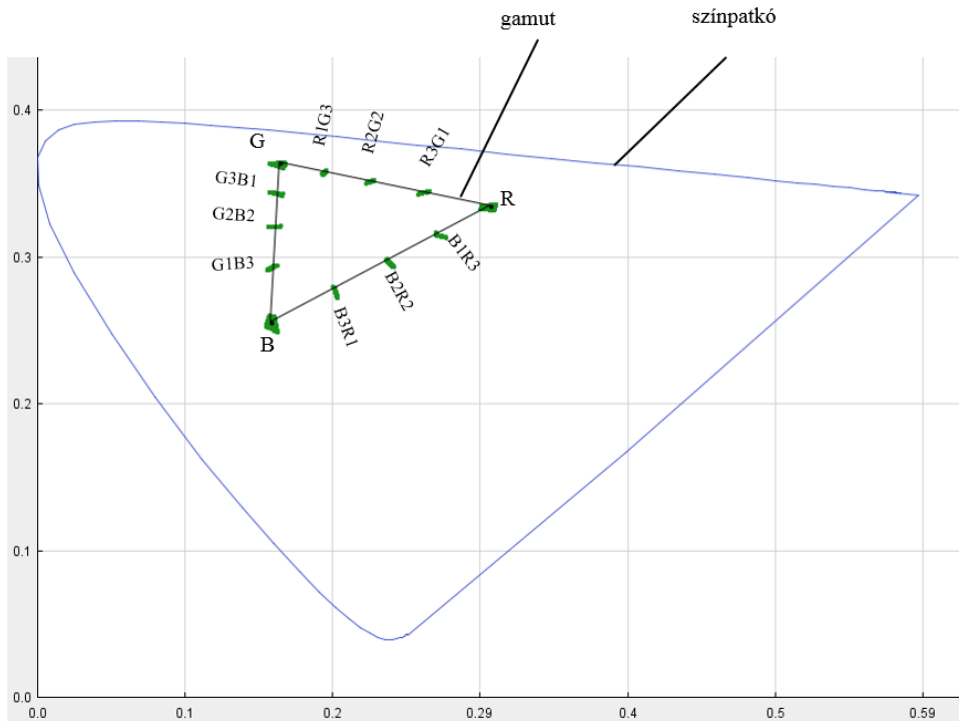
1.2. tézis: [S1], [S2], disszertáció 4.2. fejezet

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

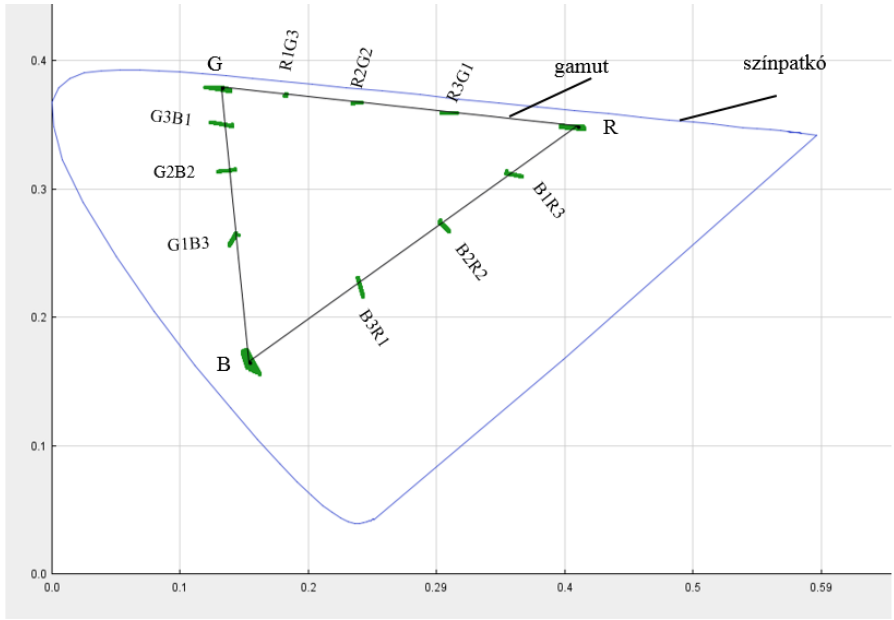
Az általam kidolgozott numerikus kinetikai modellel végzett szimuláció segítségével különböző színátmenetekre számított virtuális színérzetek halmazát CIE 1976 u^*v^* rendszerben ábrázoltam a színpatkóval és a megjelenítőre jellemző gamuttal összevetve. A szimuláció bemeneti paramétereinek tekintett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

Vizsgálataimban arra kerestem választ, hogy milyen megjelenítő típusokon lehetséges hirtelen színátmenettel kiváltott relatív és valódi virtuális színérzetet kelteni. 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.

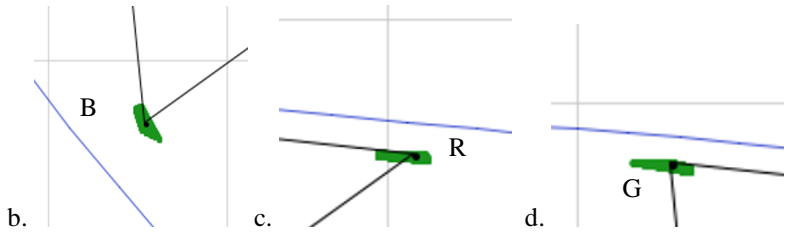


6. ábra
Szimulációs eredmények CCFL megjelenítőn
(CIE 1976 $u'v'$ színességi koordináta-rendszer)

A 6. 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 megjelenítőn csak relatív virtuális színérzet tapasztalható.



a.

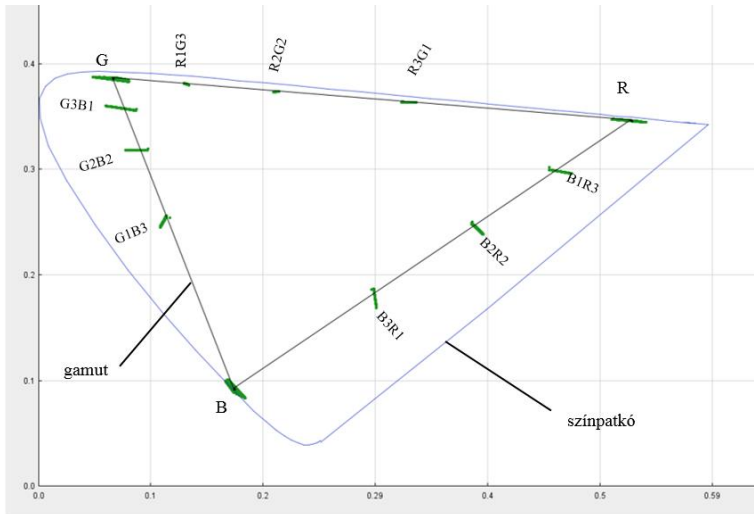


7. ábra

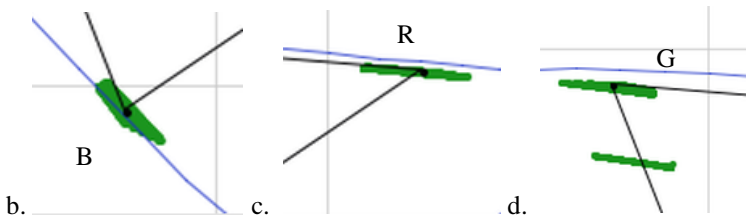
- a. IPS megjelenítő gamuttal végzett szimuláció, virtuális színérzetek halmaza (zöld szakaszok) CIE 1976 $u'v'$ színességi koordináta-rendszerben.
- b. Gamut kinagyítva B gamut pontnál
- c. Gamut kinagyítva R gamut pontnál
- d. Gamut kinagyítva G gamut pontnál

A 7.a. - 7.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 megjelenítőn csak relatív virtuális színérzet tapasztalható.



a.



8. 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

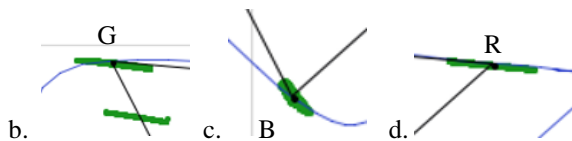
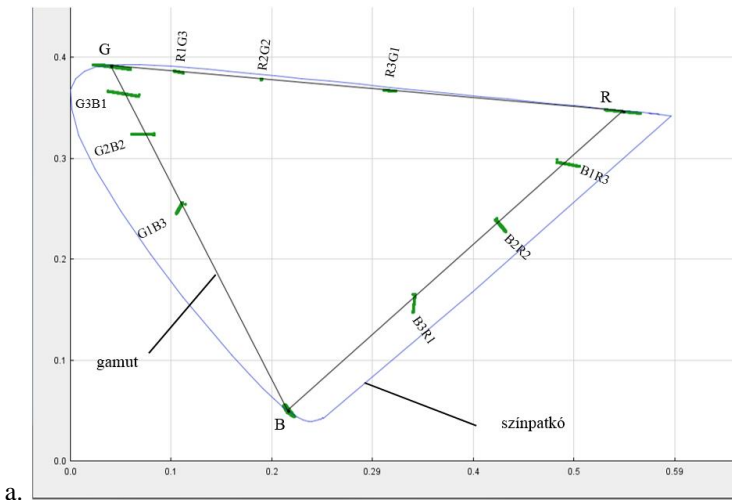
c. Gamut kinagyítva R gamut pontnál

d. Gamut kinagyítva G gamut pontnál

A 8.a. – 8.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 (8.b. ábra), azaz RGB LED megjelenítőn a B (kék) gamut pontnál közel valódi virtuális színérzet tapasztalható.



9. 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

A 9.a. – 9.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 (9. 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.

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 megjelenítőn 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.

3.2. 2. tézis: [S1], [S2], [S3], disszertáció 4.2. fejezet

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.

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 virtuális színérzet erősség szimulációval számított $(\Delta c)_{\max}$ eredményeit az 1. táblázat tartalmazza. A táblázatban jelölt 1. szín a hirtelen színátmenetet megelőző szint, a 2. szín a színátmenetet követő szint 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).

1. táblázat

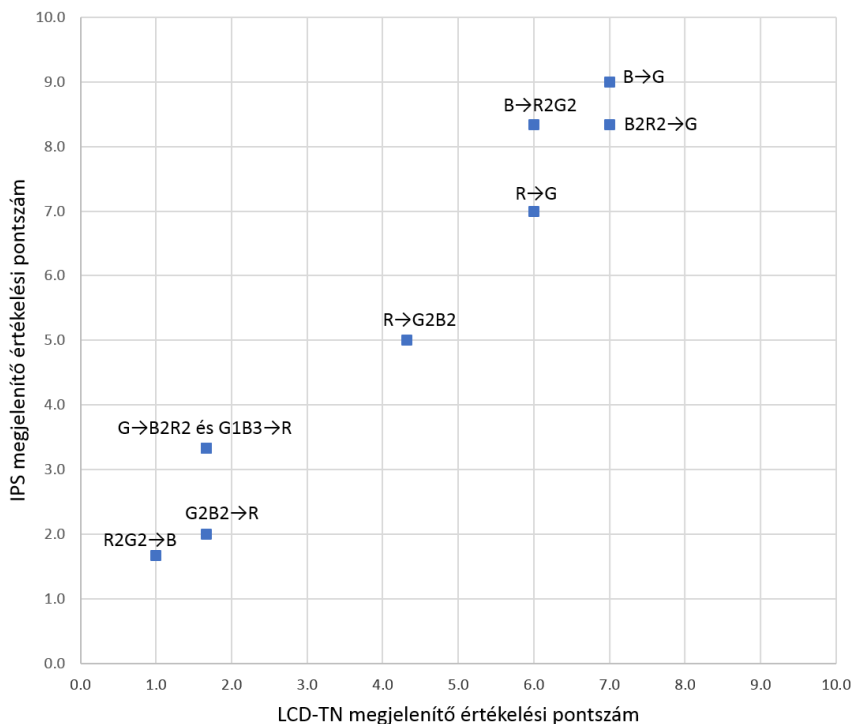
Szimulációval kapott virtuális színérzet erősségek

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

Az 1. 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 erősebb.



10. ábra

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

Önméréses vizsgálatokban 9 választott színátmenettel kiváltott utóképek erősségét értékeltem 0-9 értéktartományban, a következők szerint. 0: nincs utókép; 1-3: enyhe erősségű utókép; 4-6: közepes erősségű utókép; 7-9: erős utókép.

Az önméréses eredmények *grafikus* ábrája az újabb sorozatú IPS megjelenítőhöz társítja a 9 választott színátmenettel kiváltott erősebb virtuális színérzetet (10. ábra grafikon y tengely). A 10. ábra grafikus eredményei a szimulációs számítások eredményeit megerősítik, miszerint az újabb sorozatú IPS típusú megjelenítőn a virtuális színérzet erősebb.

Az önméréses eredmények *statisztikai* értékelése az előbbinél árnyaltabb képhez vezet.

A 2. táblázat a két vizsgált megjelenítő típussal kapott önméréses értékelési pontszámok statisztikai összehasonlítását (t-próba, $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszint) tartalmazza.

A virtuális színérzet erősség *önméréses* módszerrel kapott, statisztikailag árnyaltabb eredményei három színátmenetnél, a B2R2→G (bíbor→zöld), G→B2R2 (zöld→bíbor), B→R2G2 (kék→olívazöld) színátmeneteknél szignifikáns módon megerősítik a numerikus kinetikai modell alkalmazásával végzett *szimulációs számításokat*. Mindkét módszerrel az újabb sorozatú IPS folyadékkristályos megjelenítőn tapasztalható erősebb virtuális színérzet.

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.

2. táblázat

A hirtelen színátmenetekkel kiváltott virtuális színérzet erősségei önméréses statisztikai összehasonlítása LCD-TN és IPS megjelenítőkön

	LCD-TN			IPS			
Színátmenet	Értékelési pontszám	Szórás	Relatív szórás	Értékelési pontszám	Szórás	Relatív szórás	t-próba P ($\alpha = 0.05$)
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

nincs adat = 0 szórásérték miatt a t-próba nem elvégezhető

3.3. 3. tézis: [S5], [S6], [S7], disszertáció 4.3. fejezet

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 *színes-színes* méréssorozatban az utókép erősség, az életkor és a nem közötti összefüggések statisztikai vizsgálatához minden tesztalanyánál a választott 9 színátmenet értékelési pontszám átlagaival dolgoztam.

A *színes-szürke* méréssorozatban az utókép erősség, az életkor és a nem közötti összefüggések statisztikai vizsgálatához minden tesztalanyánál a választott 12 színátmenet értékelési pontszám átlagaival dolgoztam.

A *színes-színes* méréssorozatban a tesztalanyokat két életkor csoportra bontottam. Az utókép erősség értékelési pontszám átlagokat legfeljebb 40 éves és 40 év feletti életkor-halmazokra bontottam, majd $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney próba segítségével összehasonlítottam. Az utókép értékelési pontszám átlagokat $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney próba segítségével a nemek szerinti bontásban is összehasonlítottam.

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

A *színes-színes* méréssorozat statisztikai eredményei alapján megállapítottam, hogy az azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége független az életkortól és a nemtől.

A *színes-szürke* méréssorozat statisztikai eredményei és a 10 éves korcsoportokra bontott elemzések megerősítik a *színes-színes* méréssorozatban levont következtetéseket, miszerint azonos mérési körülmények között hirtelen színátmenettel kiváltott utókép erőssége független az életkortól és a nemtől.

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. A hierarchia szerint felosztó, az adatpontok és klaszter összerendezés szerint kizáró, a méréssorozat adathalmazának klaszterezésbe bevont pontjai szerint teljes klaszterezési algoritmust, k-közép klaszterezést alkalmaztam. Ennek megfelelően, az utókép erősség és az utóképet kiváltó színátmenetek összefüggésének keresésében a tesztalányok három klaszter csoportba sorolhatók (3. táblázat).

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

Utókép értékelési pontszám viszonyszám									
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 3. táblázatban látható, hogy:

- az 1. klaszterben a $G \rightarrow B2R2$ (zöld \rightarrow bíbor) színátmenetnél kiemelkedően gyenge az utókép (vastagon kiemelt).
- a 2. klaszterben a $B2R2 \rightarrow G$ (bíbor \rightarrow zöld) színátmenetnél kiemelkedően erős az utókép (vastagon kiemelt).
- a 3. klaszter nem tartalmaz kiemelkedő értéket, köztes viszonyszámok tartománya.

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

3.4. 4. tézis: [S5], [S6], [S7], disszertáció 4.4. fejezet

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 *színes-színes* méréssorozatban az utókép időtartam, az életkor és a nem közötti összefüggések statisztikai vizsgálatához minden tesztalanyról a választott 9 színátmenet értékelési pontszám átlagaival dolgoztam.

A *színes-szürke* méréssorozatban az utókép időtartam, az életkor és a nem közötti összefüggések statisztikai vizsgálatához minden tesztalanyról a választott 12 színátmenet értékelési pontszám átlagaival dolgoztam.

A *színes-színes* méréssorozatban a tesztalanyokat két életkor csoportba osztottam. Az utókép időtartam átlagokat a legfeljebb 40 éves és a 40 év feletti részhalmazokra bontottam, majd $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney próba segítségével összehasonlítottam. Az utókép időtartam átlagokat $\alpha = 0.05$ szignifikanciaszinten t-próba és Mann-Whitney próba segítségével a nemek szerinti bontásban is összehasonlítottam.

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

Fentiek alapján a *színes-színes* méréssorozat teljes mintahalmazának eredményeiből megállapítottam, 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.

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

A nagyobb mintaszám és hosszú utókép időtartam miatt klaszteranalízist a *színes-színes* méréssorozaton végeztem.

Klaszteranalízissel az utókép időtartam és az utóképet kiváltó színátmenet közötti összefüggést vizsgáltam. A hierarchia szerint felosztó, az adatpontok és klaszter összerendezés szerint kizáró, a méréssorozat adathalmazának klaszterezésbe bevont pontjai szerint teljes klaszterezési algoritmust, k-közép klaszterezést alkalmaztam. Ennek megfelelően, az utókép időtartam és az utóképet kiváltó színátmenetek összefüggésének keresésében a tesztalanyok $k = 3$ és $k = 2$ számú klaszter csoportba egyaránt sorolhatók (4. táblázat).

A 4. táblázatban klaszter centroidok láthatók $k = 3$ klaszterszám esetében.

4. 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 4. táblázatban az 1. klaszter centroidban az $R \rightarrow G2B2$ (vörös \rightarrow türkizkék) színátmenetnél kiemelkedően hosszú a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama, míg az előbbinek inverz $G2B2 \rightarrow R$ (türkizkék \rightarrow vörös) színátmenetnél kiemelkedően rövid az utókép időtartam (vastagon kiemelve).

A 2. klaszter centroid nem tartalmaz kiemelkedő viszonyszámot.

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

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 (4. táblázat). A centroidokban a többi viszonyszám a kiemelkedő értékek közötti köztes tartomány.

Az 5. táblázatban klaszter centroidok láthatók $k = 2$ klaszterszám esetében.

5. táblázat
 $k = 2$ klaszteranalízissel kapott klaszter centroidok

Utókép időtartam viszonyszám									
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	1.430	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

Az 5. táblázat szerinti 1. klaszterben a $B \rightarrow R2G2$ (kék \rightarrow 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 (4. táblázat).

Az 5. táblázat szerinti 2. klaszterben a $B \rightarrow G$ (kék \rightarrow zöld) színátmenetnél az előzőt is meghaladó kiemelkedően magas viszonyszám (vastagon kiemelve) tükrözi a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép kiemelkedően hosszú időtartamát. Ugyancsak a 2. klaszterben kiemelkedően alacsony viszonyszám kíséri az $R2G2 \rightarrow B$ (olívazöld \rightarrow kék) színátmenetet (vastagon kiemelve), amely inverze az 1. klaszter kiemelkedően magas viszonyszámát eredményező $B \rightarrow R2G2$ (kék \rightarrow olívazöld) színátmenetnek.

A hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartamok csoportosításában a $k = 2$ 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 (5. táblázat). A két klaszter centroidjaiban a többi viszonyszám a kiemelkedően magas és kiemelkedően alacsony utókép időtartam értékek közötti köztes tartomány.

4. Összefoglalás

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

A fentiek teljesítéséhez kutatásom első részében numerikus kinetikai modellt dolgoztam ki, amellyel szimulációsan meghatároztam a beeső fény hirtelen színátmenetével kiváltott virtuális színérzet (utókép) erősséget és időtartamát. E munkámhoz a magányos csap érzékenységi dinamikáját leíró korábbi kinetikai modelltől merítettem. A szimulációs számításokat önméréses vizsgálatokkal ellenőriztem (1. téziscsoport, 2. tézis).

Kutatásom második részében Témavezetőmmel együtt a virtuális színérzet (utókép) erősséget és időtartamot a nem és az életkor összefüggéseiben vizsgáltam színes-színes és színes-szürke méréssorozatokban. Az eddigi eredményeket statisztikai elemzéssel és klaszteranalízissel értékeltem (3-4. tézis).

Az 1. téziscsoport 1.1. tézisében részletezettek szerint megállapítottam, hogy numerikus kinetikai modellemre épülő színátmenet szimulációval CCFL, IPS, RGB LED és háromszínű lézeres megjelenítők mindegyikén érzékelhető hirtelen színátmenettel kiváltott gamuton kívüli és színpatkón belüli utókép, azaz relatív virtuális színérzet.

Az 1. téziscsoport 1.2. tézisében részletezettek szerint megállapítottam, hogy numerikus kinetikai modellemre épülő színátmenet szimulációval 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 megjelenítőn 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 *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 szignifikánsan erősebb virtuális színérzet. 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 erőssége 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.

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 hierarchia szerint felosztó, 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 legfeljebb 40 éves

tesztalanyoknál a hirtelen színátmenettel kiváltott utókép időtartama mindkét nemnél meghaladta a 40 év feletti tesztalanyoknál tapasztalt utókép időtartamokat, 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 statisztikai eredményei és a 10 éves korcsoportokra bontott elemzések 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 tartománnyal. 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.

5. Publikációs jegyzék

5.1. 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 22-24, 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), pp. 17-23, DOI: <https://doi.org/10.33927/hjic-2019-04>

[S3] Garai L., Horvath A., Computing virtual color perception, Tavaszí 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), p. 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), p. 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

5.2. 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 diaminek kioldódásának vizsgálata indirekt és direkt polikarbamid vastagbevonatokból, 2009, 46(8): 317-320