

energia)! Zérus tömegű fotonok Boltzmann-eloszlására  $\Delta E^2/\langle E \rangle = kT$  egzaktul adódik. A pontosabb Bose-eloszlásra az eredmény nem sokkal nagyobb, körülbelül  $1,13 kT$ . A  $T_{\text{Unruh}}$  Unruh-hőmérséklet, a fenti (37) képletben egy másik, jóval bonyolultabb számolás eredménye [1]. Itt meglepő, hogy a határozatlanság alsó határát jellemző hőmérséklet-szerű paraméter ennél nagyobb, ennek a  $\pi$ -szerese. Lehet, hogy ez rossz hír az ilyen hőmérséklet mérését tervező kísérletek számára...

## Összefoglalás

A modern fizika két fontos fogalmával, az entrópiával (információval) és a kvantumos elmosódással kapcsolatos egyenlőtlenségeket a számtani és mértani közép közötti, régóta ismert egyenlőtlenség általánosítása-ként tárgyaltuk. E célt az alábbi lépésekben értük el:

1. Ismertettük a számtani-mértani közép közötti egyenlőtlenség geometriai levezetését, amely a négyzet területének felosztásából származik.

2. Ez az összefüggés súlyozott átlagokra és azon túl határozott konvexitású függvények statisztikus várható értékére általánosítható.

3. Az entrópia és irreverzibilitás titka a fogalom határozott konvexitása, ez az a követelmény, amit még a

boltzmanni képleten túllépő, nem logaritmikus képleteknek is be kell tartaniuk.

4. A kvantumos „határozatlansági” relációnak – amely nemcsak a kanonikus hely- és impulzusmérésekre igaz, hanem általánosabban – is ez az egyenlőtlenség az alapja. Különleges példa a fotonok esete állandó gyorsulás mellett, ami az energia határozatlanságát egy hőmérséklet-jellegű matematikai fogalommal hozza kapcsolatba.

## Köszönetnyilvánítás

A szerző köszöni a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem UBB Star programja támogatását ezen munka elkészülte (s az azt megelőző előadás) során. Az NIH (OTKA) K123815 sz. projektje szintén támogatta ezt a munkát.

## Irodalom

1. W. G. Unruh: Notes on Black Hole Evaporation. *Physical Review D* 14 (1976) 870–892.
2. J. L. W. V. Jensen: Sur les fonctions et les inégalités entre les valeurs moyennes. *Acta Math.* 30 (1906) 175–193.
3. C. Tsallis: *Introduction into Nonextensive Statistical Mechanics (Approaching a Complex World)*. Springer 2009.
4. T. S. Biró, Z. Schram, L. Jenkovszky: Entropy production during the hadronization of a quark-gluon plasma. *European Physical Journal A* 54 (2018) 17.
5. T. S. Biró, Z. Neda: Unidirectional random growth with resetting. *Physica A* 499 (2018) 335–361.
6. Biró Tamás: Túl az exponenciális faktoron. *Fizikai Szemle* 67/12 (2017) 407–411.

# ÚJ LEHETŐSÉGEK A LÁTÓÉLESSÉG-VIZSGÁLATI TESZTEK PONTOSSÁGÁNAK NÖVELÉSÉRE

Timár-Fülep Csilla, Erdei Gábor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Atomfizika Tanszék

Kovács Illés, Kránitz Kinga

Semmelweis Egyetem, Szemészeti Klinika

*A humán látóélesség vizsgálatára általánosan használt tesztek számos formában léteznek, ami alaposan megnehezíti a mérések összehasonlíthatóságát, a véletlen hiba pedig jelentős, és erősen függ a felvett adatok kiértékelésére választott módszertől. Mindennek tudatos figyelembevételre és a hibák redukálása elengedhetetlen, hiszen a modern klinikai vizsgálatok pontosságigénye messze túlmutat a házi orvosi rendelőknél, szemüvegszalokonban elvégezhető gyors tesztekénél. Cikkünkben sorra vesszük a látásvizsgálati módszerek szisztematikus és véletlen hibáit befolyásoló tényezőket, ismertetjük a jelenlegi módszerekkel*

*elérhető legnagyobb pontosságot, rámutatunk a szabályozás hiányosságára a környezeti fényviszonyok tekintetében, felhívjuk a figyelmet a pupillaméret látóélességet befolyásoló szerepére, valamint bemutattunk egy saját fejlesztésű, korrelációalapú eljárást, amellyel a mérések véletlen hibája számottevően tovább csökkenthető.*

## Bevezetés

A pontos és jól reprodukálható látásteszték a kezelés szükségességének elbírálása, illetve várható hatékonyságának előrejelzése szempontjából különösen nagy jelentőséggel bírnak a retina különböző betegségei (időskori makuladegeneráció, diabéteszes makuladéma stb.), valamint szürkehélyog esetén. A látóélesség-vizsgálatok eredményének legfontosabb mérőszáma a páciens vízúsértéke. A szemészek a klini-

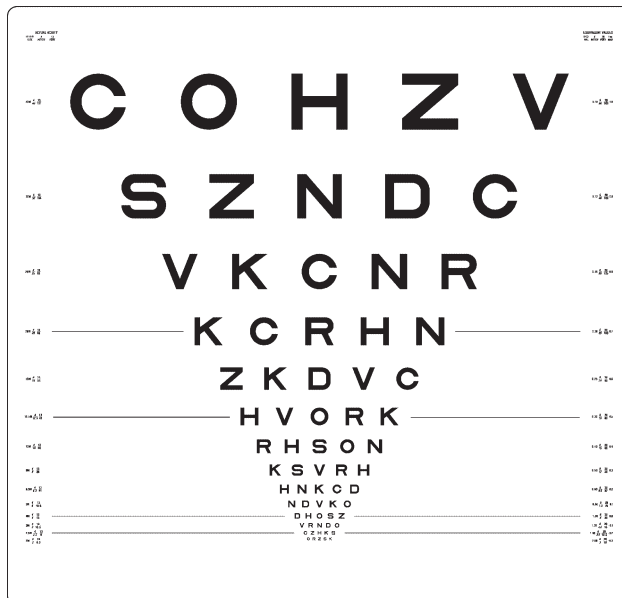
A szerzők köszönetüket fejezik ki a Nemzeti Fejlesztési Minisztériumnak (NFM) a Versenyképességi és Kiválósági Szerződések keretében nyújtott VKSZ-12-1-2013-80 sorszámú *A szürkebályog hatékony gyógyítását elősegítő orvostechnikai kutatás-fejlesztések* című projekt anyagi támogatásáért.

A kutatás az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-3 kód-számú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

kailag releváns terápiás eredményt, a látásminőség javulására vonatkozó különböző kritériumoknak megfelelően (például minimum öt vagy tíz betű javulás) ezen szám mérhető megváltozása alapján osztályozzák. A különböző intézetekben viszont nem pontosan egyformán szokták elvégezni a teszteket, a mérési körülmények szabályozása nem teljes körű, ráadásul a kiértékelés sem mindig azonos módon történik, ami negatívan befolyásolja a mérések szisztematikus és véletlen hibáit. Mind a fent említett speciális klinikai esetekben, mind a tudományos kutatás szempontjából hasznos lenne tehát egy olyan mérési módszer kidolgozása, amely a jelenlegi eljárásoknál nagyobb pontossággal és jobb megismételhetőséggel rendelkezik [1, 3].

Standard látásvizsgálatok során a páciens feladata a vízustáblán szereplő, fokozatosan csökkenő méretű betűk helyes azonosítása. Az egyik legrégebbi, ám még ma is széles körben ismert megvalósítási mód az úgynevezett Snellen-tábla, amelyen az optimális helykitöltés érdekében a kisebb betűméretekben egyre több karakter szerepel [3, 12]. Magyarországon ennek egyszerűsített, háromszlopos változata, a Kettes-féle tábla az elfogadott klinikai konstrukció [4]. Később, a látástesztok egységesítése során terjedt el a Bailey–Lovie-elrendezés, amelyben – a mérés önkonzisztenciájának növelése végett – minden sor azonosan öt karaktert tartalmaz. A szabványosítás jegyében a betűk közötti távolságot a betűmérettel megegyezőnek, a sorok közötti távolságot pedig a felső sor méretével azonosnak választották. Az emberi szem gyengülő stimulációra való érzékenységének megfelelően a betűméretet mértani sorozat szerint csökkentik, melynek kvóciense praktikus okokból  $10^{0,1}$  [12].

Az egységesítés irányába tett következő lépést a kifejezetten látóélesség-vizsgálatokra kifejlesztett Sloan-karakterekkel (C, D, H, K, N, O, R, S, V és Z) implementált ETDRS (Early Treatment Diabetic Retinopathy



1. ábra. A Bailey–Lovie-elrendezésben Sloan-karakterekkel implementált ETDRS-tábla egy mintapéldánya.

Study) tábla bevezetése jelentette. A betűk speciális négyzetes kialakításának köszönhetően (a teljes függőleges és vízszintes méret megegyezik a vonalszélesség ötszörösével) minimális azok olvashatóságának különbsége, amelyet ráadásul az ETDRS 2000 szabvány az egy sorban előforduló betűkombinációk korlátozásával is kompenzál. A szabványosítás érdekében a táblák megvilágítását is standardizálták, így a klinikai vizsgálatokban csak kalibrált, beégetett fénycsövek használhatók, meghatározott élettartamig [5, 12]. A napjainkra széles körben elfogadott szabvánnyá vált ETDRS-tábla egy mintapéldányát szemlélteti az 1. ábra.

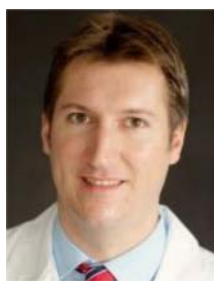
A Bailey–Lovie-elrendezésnek köszönhetően a betűméret az egyetlen olyan paraméter, ami jelentős mértékben változik az ETDRS-tábla sorai közt. Értékét



**Timár-Fülep Csilla** doktorjelölt a BME Atomfizika Tanszékén. 2013-ban szerezte fizika BSc, majd 2015-ben orvosi fizikus MSc diplomáját. Kutatási területe a humán látóélesség elméleti és kísérleti vizsgálata, valamint modellezése numerikus szimulációkkal. Kutatómunkáját, amelynek fő célja a szürkehályogos betegek részére a jelenlegi megoldásoknál komfortosabb látásérzetet biztosító intraokuláris lencsék kifejlesztése, a Semmelweis Egyetem szemészorvosaival és ipari partnerekkel együttműködésben végzi.



**Erdei Gábor** egyetemi docens 2003-tól kezdődően a BME Atomfizika Tanszék munkatársa. Fő kutatási területei a képalakító rendszerek tervezése, valamint optikai mérés-technikai módszerek alkalmazása és fejlesztése. 2014 óta ipari együttműködés keretén belül az emberi szem optikai szimulációjával, refraktív / diffraktív intraokuláris műlencsék tervezésével és mérés-technikájával foglalkozik, szoros kooperációban a Semmelweis Egyetem kutató szemészorvosaival.



**Kovács Illés** a Semmelweis Egyetem Szemészeti Klinikai Ismeretek Tanszékének docense, megbízott tanszékvezetője. Sokrétű műszeres diagnosztikai tapasztalata mellett szakmai gyakorlata kiterjed a vitreoretinális és a szürkehályog-sebészetre, a szemészeti lézerkezelésekre és intravitreális injekciók adására is. Fő kutatási területei közé tartozik a strukturális és funkcionális eltérések vizsgálata a szemfelszín betegségeiben, femtoszekundumos lézer alkalmazása szemsebészetben és a biostatistika.



**Kránitz Kinga** 2010 óta dolgozik szemorvosként a Semmelweis Egyetem Szemészeti Klinikáján. A betegellátás mellett aktívan részt vesz a Klinikán zajló tudományos kutatásokban és az orvostanhallgatók oktatásában is. PhD értekezését 2016-ban védte meg. Érdeklődési területei közé tartoznak a szaruhártyát érintő betegségek és a zöldhályog, valamint foglalkozik a szürkehályogműtétek lehetséges technikai újításaival.

leggyakrabban a látásminőséget közvetlenül meghatározó, a karakterek vonalszélességéhez tartozó szögperc egységben megadott  $\alpha$  látószögből származtatják. A mértani méretcsökkenéshez igazodó logMAR – Logarithm of Minimum Angle of Resolution – jelölésnek megfelelően, az  $s$  betűméret a látószög tízes alapú logaritmusával fejezhető ki:

$$s \equiv \lg \alpha. \quad (1)$$

A logMAR egységben megadott  $V$  vízúsérték definíció szerint ahhoz a fiktív betűmérethez ( $s_0$ ) tartozik, amely esetén a karakterek  $P$  felismerési valószínűsége 50% [5, 8, 12]:

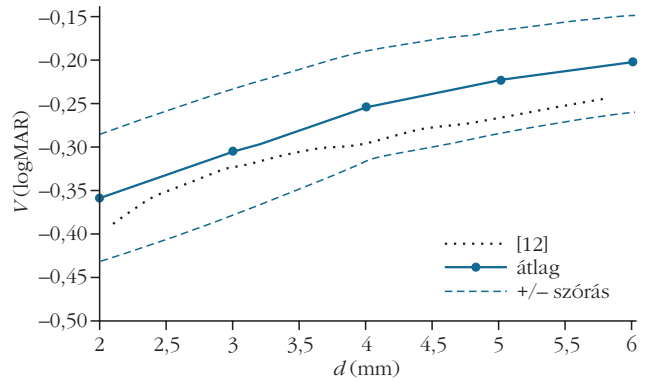
$$V \equiv s_0. \quad (2)$$

A látóélesség-vizsgálatok eredményeként adódó vízúsértéket szisztematikus és statisztikus hibák torzítják, ami korlátozza a betegségek előrehaladásával járó változások mérhetőségét. A vízustáblák egységeítése jelentős mértékben csökkentette a mérési hibát, de a vizsgálat környezeti paraméterei, valamint a mérés menete és a kiértékelés módja továbbra is befolyásolják az eredményt [2, 6, 11]. Ennek megfelelően külön hangsúlyt kell fektetni a mérés körülményeinek megválasztására és szabványosítására, valamint az eredmények kiértékelésére az összehasonlíthatóság és az ismételhetőség növelése céljából, amelyet a következő fejezetekben részletesen tárgyalunk. Cikkünkben bemutatunk továbbá két olyan módszert, amelyekkel a klinikai mérések szisztematikus és véletlen hibája is csökkenthető.

## A szisztematikus hibák jellemzői

A különböző helyeken, eltérő időben vagy más orvosok által végzett látóélesség-tesztek eredményeinek összehasonlíthatóságát korlátozó szisztematikus hibák elsősorban a mérési paraméterek pontatlan beállításának, hitelesített értéktől való eltérésének következményei (a kiértékelési módszerekből fakadó hibát a következő fejezetben mutatjuk be). A látásminőséget, és így a mérések kimenetelét befolyásoló legjelentősebb tényezők a vizsgálóhelyiség megvilágítása [9, 10], a vízustábla háttérvilágítása [11], valamint a mérési távolság beállítása. Ezen hibaforrások számszerűsített hatásait listázza az 1. táblázat.

1. táblázat		
A látóélesség-vizsgálatok legjelentősebb szisztematikus hibaforrásai.		
kiváltó ok	paraméterváltozás	$\Delta V(\log\text{MAR})$
környezeti megvilágítás	100±15 cd/m <sup>2</sup>	±0,05
tábla háttérvilágítása	100 ... 200 cd/m <sup>2</sup>	±0,02
mérési távolság	4±0,5 m	±0,05



2. ábra. A látóélesség pupillaátmérőtől való függése a 2... 6 mm mérettartományban. A folytonos vonal a saját szimulációs eredményeket [15] (szaggatottan jelölt szórással), míg a pontozott vonal a szakirodalomban közölt értékeket jelöl [12].

Ezek közül a tábla háttérvilágítása és a mérési távolság az ICO (International Council of Ophthalmology) standard által rögzített paraméterek [5], és bár specifikációjuk országról országra eltérhet, konkrét értékük egy adott vizsgálóhelyiségben állandó és teljes mértékben független a páciensről. Ezzel szemben a szoba megvilágítására nincs ilyen szigorú előírás, bár régóta ismert tény, hogy megváltozása mind a pupilla méretét, mind a látóélességet jelentős mértékben módosítja [9, 10, 12].

A környezeti megvilágítás szabványosítása már önmagában is növelné a mérések összehasonlíthatóságát, azonban az egyes páciensek pupillaátmérője még azonos fényviszonyok esetén is jelentős szórást mutat (±1,5 mm [12]), ami továbbra is torzíthatja az eredményeket. Mivel a szakirodalomban nem találtunk olyan publikációt, amely a belépő pupilla átmérőjének a látóélességre gyakorolt közvetlen hatását vizsgálná, a jelenséget neuro-fiziológiai látásmodellel végzett szimulációkon keresztül részletesen tanulmányoztuk [14, 15]. Eredményeink alapján a belépő pupilla  $d$  átmérőjének 1 mm-es növelése átlagosan 0,05 logMAR romlást okoz a vízúsértékben. Megfigyeléseink jó összhangban vannak az irodalomban bemutatott [12], indirekt mérésekből származtatott összefüggésekkel [9, 10], amelyet a klinikailag releváns mérettartományban a 2. ábra szemléltet.

A fentiek alapján tehát a vizsgálóhelyiség megvilágításának standardizálása mellett, ami a mérési körülmények egységeítését szolgálja, meglehetősen fontos lenne a pupillaátmérő vízúsértékkel együtt történő feljegyzése is a személyre szabott pupillaadaptáció figyelembevételére. Tapasztalataink szerint egy ±0,5 mm mérési pontosságú kamerarendszer használata már nagymértékben hozzájárulna a mérések összehasonlíthatóságához.

## A véletlen hiba okai és mértéke

A bemutatott előírások pontos követése esetén a vizsgálatok megismételhetőségét végső soron a páciens vizuális rendszerének bizonytalanságaiból származó véletlen hibának kellene meghatároznia. Ezzel szemben jelentős hiba származik a tesztek lehetséges kiértékelési

módjaiból is, amelyeket a vizsgálat gyorsítása miatt a végletekig egyszerűsítettek. Ebből adódóan, a legérzékenyebb látóélesség-mérés megvalósításához fontos feladat a megfelelő kiértékelési algoritmus megválasztása és annak konzekvens alkalmazása [1, 2, 6].

### Kiértékelési módszerek

A standard vízustáblák használatával végzett vizsgálatok minősítésére három különböző módszer található a szakirodalomban [1, 3, 12]. A legegyszerűbb lehetőség a soralapú (line assignment) kiértékelés, amely szerint a vízusérték megegyezik azon legkisebb sor méretével, ahol a betűknek legalább a felét helyesen felismerte a páciens. Ugyan a megfogalmazás megfelel a vízus definíciójának, de a soronként öt betűvel megvalósított ETDRS táblák esetén a küszöbnél elért felismerési valószínűség – a helyesen azonosított betűk eloszlásától függően – praktikusán 60%, 80% vagy esetleg 100% lehet. Tehát a soralapú kiértékelés minden esetben jelentős eltolási hibával rendelkezik az elméleti értékhez képest, ráadásul a bizonytalansága 0,6 és 1,5 sor között mozog ( $\Delta V = \pm 0,06 \dots 0,15 \log\text{MAR}$ ) normál látóélességű páciensekre [1, 3].

A statisztikus hiba csökkentése érdekében került bevezetésre a betűalapú (letter counting) kiértékelési módszer, amely külön-külön pontozza az egyes betűkre adott válaszokat. A Bailey–Lovie-elrendezés lehetővé teszi, hogy minden helyesen felismert karakter 0,02 logMAR egységnek feleljen meg [3, 12], így a vízusérték a helyes azonosítások  $T_c$  összegéből a következőképpen származtatható:

$$V = 1,1 - 0,02 \cdot T_c. \quad (3)$$

Ugyan a betűalapú módszer egyértelműen finomítja a kiértékelést, ezzel csökkentve a mérés bizonytalanságát, de a szakirodalomban közölt mérési eredmények alapján [1, 6] az elméleti 50%-os küszöbhez képest fél sornyit (+0,05 logMAR) szisztematikus hibával rendelkezik.

Végül, a nemlineáris regresszió egy alternatív lehetőség, amely a betűalapú módszerrel megegyező, alacsony mértékű ( $\Delta V = \pm 0,04 \log\text{MAR}$ ) véletlen hibát eredményez [1, 6]. Ez esetben a vizsgált betűméretekkel elért pontokra egy folytonos, monoton, szigmoid alakú görbét, úgynevezett pszichometria függvényt ( $L(s)$ ) illesztnek, amely minden  $s$  értékre megmutatja a felismerés valószínűségét. A vízusértéket a görbe  $P_0 = 0,5$  küszöbvel vett metszeteként határozzák meg [8]:

$$L(s) \Big|_{s=s_0} = P_0 \Rightarrow V \equiv s_0. \quad (4)$$

A görbeillesztéses módszer (curve fitting) egzaktul megfelel a definíciónak [5], így szisztematikus hiba nélkül és minimális véletlen hibával számszerűsíti a vízusértéket. A fen-

tek alapján a látóélesség minősítésére ez az eljárás tekinthető a legjobbnak, ezért a továbbiakban elsősorban ezzel foglalkozunk.

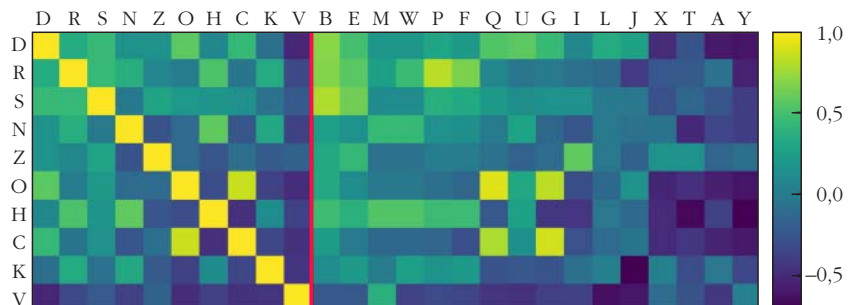
### Pontozási sémák

A mérések ismétlési hibáját az alkalmazott kiértékelési eljárásnál az egyes betűk olvashatósága is befolyásolja. A Sloan-karakterek speciális kialakításának ellenére is megfigyelhető, hogy némelyek könnyebben felismerhetők, míg másokat nehezebb azonosítani [2]. Emiatt egy korrelációalapú pontozási módszert vezettünk be, amely – a betűk hasonlóságát felhasználva – számszerűsíti az egyes válaszok helyességét, és ezáltal jelentős mértékben csökkenti a mérések bizonytalanságát [16, 17].

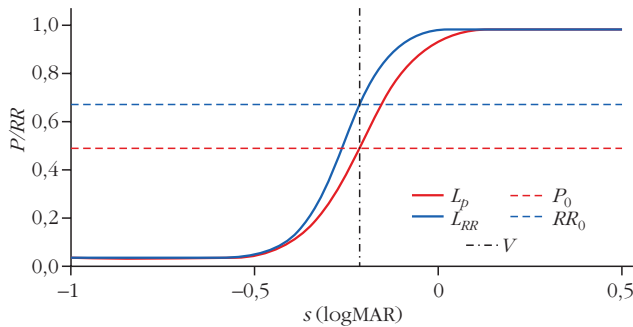
Hagyományos látásvizsgálatok esetén csak az kerül feljegyzésre, hogy a páciens felismerte-e az adott karaktert vagy sem, és így a válaszok bináris reprezentációval írhatók le, ahol az 1 helyes azonosítást, míg a 0 tévesztést jelöl. Azonban a hasonló betűk, mint például C és O, vagy P és R, összetévesztése lényegesen gyakoribb, mint kifejezetten eltérő betűk, például V és S felcserélése [18], amely azt sugallja, hogy a helytelen felismerésből nem következik, hogy a páciens a vizsgált betű semmilyen részletét nem látja. Tehát az emberi látás komplexebb egy egyszerű bináris sémánál, így a válasz helyességét megéri számszerűsíteni. E célra a vizsgált és az azonosított betűk hasonlóságát megadó OC (Optotype Correlation) értéket vezettük be [16, 17], amelyet a Pearson-féle keresztkorreláció felhasználásával definiáltunk úgy, hogy a – hagyományos bináris pontozásnak megfelelően – helyes felismerés esetén értéke 1, míg tévesztés esetén várható értéke 0 legyen. A teljes betűkészletre vonatkozó OC értékkészlet, amelyet a 3. ábra szemléltet, összhangban van a szemészetben is alkalmazott tévesztési mátrix statisztikájával [18], mivel a magasabb OC értékhez tartozó betűpárok könnyebben összekeverhetők, mint az alacsonyabb értékűek megfelelői.

Egy teljes, azonos betűméretű sor felismerhetőségének jellemzésére az RR (rate of recognition) mennyiséget vezettük be, amelyet az adott sorban elért OC értékek átlagával definiáltunk [16, 17]. Ilyen módon RR közvetlenül összehasonlítható a hagyományos kiértékelésben alkalmazott P felismerési valószínűséggel, de lényegesen több információt szolgáltat a

3. ábra. Az oszlopok a vizsgált Sloan-karaktereket, míg a sorok a lehetséges válaszokat, így a teljes angol ábécét jelölik, ahol a 10 eredeti Sloan-karakterhez tartozó válaszokat vonallal elkülönítettük. A sorokat/oszlopokat az átlagos OC értékük alapján rendeztük: hasonló betűpárok, amelyeknek nagyobb a korrelációja a bal felső sarok felé vannak csoportosítva.







4. ábra. A valószínűségi és a korrelációalapú pontozási módszerek különbségének szemléltetése a vízusértéket definiáló megfelelő küszöbökkel együtt ( $P_0 = 0,5$ ,  $RR_0 = 0,68$ ).

látás minőségéről.  $RR$  felhasználásával, nemlineáris regresszióval a  $V$  vízusérték a (4) egyenlettel analóg módon – annyi eltéréssel, hogy a definíciónak megfelelő  $P_0 = 0,5$  valószínűségi küszöböt  $RR_0 = 0,68$  korrelációértékre kell módosítani – számolható [16]:

$$L(s) \Big|_{s=s_0} = RR_0 \Rightarrow V \equiv s_0. \quad (5)$$

Az  $L(s)$  pszichometriai függvény alakjának leírására egy lineárisan transzformált logisztikus függvényt alkalmazunk, amelynek határértékei a lehetséges válaszok számának (a teljes angol ábécé mind a 26 betűje) megfelelő elméleti  $RR$  értékekhez lettek beállítva:

$$L(s) = \frac{25}{26} \frac{1}{1 + \exp(-4k(s - s_{mp}))} + \frac{1}{26}. \quad (6)$$

A görbe két paramétere,  $k$  és  $s_{mp}$  a nemlineáris regresszióhoz megfelelően az elért ( $s$ ,  $RR$ ) pontpárookra való illesztéssel kerül meghatározásra minden egyes vizsgált szem esetén. A 4. ábra normál látású páciensek átlagos valószínűségi ( $L_p$ ) és korrelációs ( $L_{RR}$ ) pszichometriai függvényeivel szemlélteti a görbeillesztéssel történő vízusmeghatározást és hangsúlyozza a pontozási sémák különbségét [16].

## Klinikai mérési elrendezés a korrelációs pontozás megvalósítására

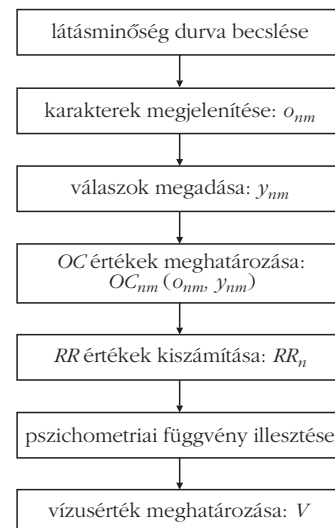
A fent bemutatott korrelációs kiértékelés alkalmazásához olyan mérőrendszerre van szükség, amely lehetővé teszi az egyes karakterekre adott válaszok regisztrálását, valamint az elért  $OC$  és  $RR$  értékek gyors és hatékony kiszámítását. Ezért egy számítógép-vezérelt összeállítást valósítottunk meg, amely a válaszok bevitelét követően automatikusan feldolgozza az eredményeket [13]. A széleskörű szemészeti alkalmazhatóság céljából a rendszert úgy alakítottuk ki, hogy megfeleljen a klinikai standardnak [5, 7].

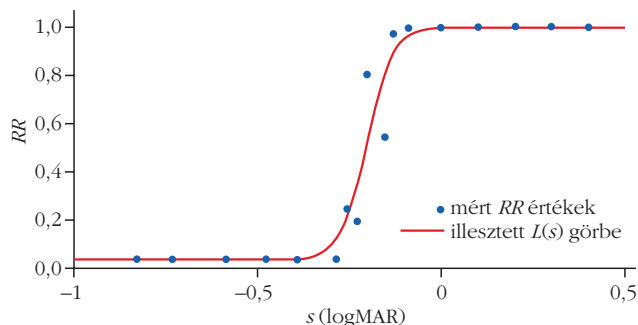
A számítógépes mérési összeállításban a vízustábla szerepét egy nagyfelbontású monitor váltja ki, amely célra egy 4k UHD LED monitort (Samsung U24E590D, pixelméret: 0,1358 mm, képátló: 600 mm) alkalmaztunk. A képernyő háttérvilágítását a nemzetközi standardnak [5] megfelelő  $100 \text{ cd/m}^2$  értékre állítottuk be. A

vizsgálatot végző programot C++ környezetben implementáltuk az OpenCV és Dlib könyvtárak felhasználásával [13]. Kétlépéses mérési protokollt vezetünk be, így gyors vizsgálatokkal pontos adatokat biztosítunk a látóélesség meghatározásához. Az első rész a látásminőség durva becslésére, a második szakasz pedig a vízusérték precíz meghatározására szolgál. A durva becslés minél gyorsabb elvégzése érdekében az algoritmus minden második betűméreten egyetlen Sloan-karaktert vizsgál, amelyeket konstans fehér háttéren, egymás után jelenít meg a monitoron. A tesztelt betűk kiválasztása – a sorrend memorizálásának elkerülése érdekében – véletlen módon történik. Ez a fázis az első nagyobb tévesztésig tart, amikor a megjelenített és a választott betűpárhoz tartozó  $OC$  pontszám  $0,85$  alá csökken (ez az érték két hasonló betű, például O és C összetévesztéséhez tartozik). A második rész az előbb meghatározott durva küszöb fölött három betűmérettel kezdődik és egy mérettel alatta ér véget, összesen legalább öt mérési pontot eredményezve. E szakaszban betűméretenként már öt karakter tesztelése zajlik le úgy, hogy az ETDRS 2000 szabvány szerint megválasztott betűötösöket egyszerre, a Bailey–Lovie-elrendezésnek megfelelő teljes sorokban jeleníti meg a program. Amennyiben az elért  $RR$  érték a legkisebb betűméreten is nagyobb, mint  $0,4$ , további két kisebb sor vizsgálatát végzi el a program, ezzel megfelelő adatokat biztosítva a mérés kiértékeléséhez. Ezt követően az algoritmus a szabad paraméterek optimalizálásával meghatározza a (6) egyenletben leírt pszichometriai függvényt, majd az (5) egyenlet alapján kiszámítja a vízusértéket. A mérési protokoll blokkvázlatát az 5. ábra szemlélteti.

A mérő és kiértékelő algoritmusok mellett egy felhasználóbarát kezelőfelületet is készítettünk, amelynek segítségével a vizsgálóorvos – a félreütésekből származó hibák kiküszöbölése érdekében – együtt ellenőrizheti a kivetített karaktereket és a begépelte válaszokat. Továbbá egy speciális kódot is bevezettünk a kis betűméreteken gyakori „Nem látom” válaszok – amely ese-

5. ábra. A korrelációs kiértékelést alkalmazó klinikai látásteszt blokkvázlata. Az  $n$  index a vizsgált betűméretekre, míg  $m$  az adott méreten tesztelt egyes karakterekre utal.





6. ábra. Egy reprezentatív korrelációalapú látóélesség-vizsgálat eredménye: az egyes betűméretekben elért RR értékek és a mérési pontokra illesztett  $L(s)$  pszichometriai függvény.

tekhez nem rendelhető OC érték – regisztrálására. Ekkor az algoritmus az OC mátrix átlagértékét ( $1/26$ ) használja a páciens véletlen választásának reprezentálására. A mérés végeztével a program elmenti a feldolgozott numerikus és grafikus eredményeket, valamint későbbi elemzés céljából a vizsgált-azonosított betűpárokat tartalmazó nyers adatokat is. Egy reprezentatív vizsgálat kimenetét illusztrálja a 6. ábra.

A kapott véletlen hiba összehasonlításához a nyers adatokból számolt felismerési valószínűségből is meghatároztuk a  $V_p$  vizusértéket, a (4) egyenletnek megfelelően. Eredményeink alapján – csupán a korrelációalapú pontozásnak köszönhetően – 20%-kal csökkenthető a mérések statisztikus hibája ( $\Delta V_p = 0,045$  logMAR és  $\Delta V_{RR} = 0,036$  logMAR) [13]. Tapasztalataink szerint az új módszer mérési ideje mindössze 10%-kal magasabb a standard táblával végzett vizsgálatokénál ( $t_{ETDRS} = 60$  s és  $t_{RR} = 65$  s) [13], amely alátámasztja az eljárás széleskörű alkalmazhatóságát.

A módszer hatékonyságát azon észrevételünk is jól demonstrálja, hogy a hagyományos bináris sémával betűméretenként öt helyett tíz betű alkalmazása eredményezne a fentiekkel egyező bizonytalanságot, és az egyúttal a vizsgálat hosszát is megduplázná [13, 16].

Az új mérési protokoll szisztematikus hibájának feltérképezésére eredményeinket hagyományos ETDRS-táblával végzett látásteszt kimenetével is összevetettük. A mért vizusértékek között szisztematikus eltérés nem figyelhető meg, így megállapíthatjuk, hogy a javasolt módszer praktikus megoldást jelent azon esetekben, amikor nagy pontosságú látóélesség-vizsgálatok elvégzésére van szükség [13].

## Összefoglalás, konklúzió

A klinikai látóélesség-tesztek összehasonlíthatóságának és megismételhetőségének vizsgálata érdekében részletesen tanulmányoztuk és rendszereztük a mérési eredményeket befolyásoló szisztematikus és véletlen hibákat. A környezeti és páciensspecifikus egyéni paraméterek látóélességre gyakorolt hatásának szimulációkon keresztül történő elemzése alapján megállapítottuk, hogy rendkívül fontos a szabványban meghatározott környezeti paraméterek precíz betartása, amelyeket ki kellene egészíteni egy új, a vizsgáló helyiség megvilágít-

tását szabályozó standard előírásával. Továbbá, a páciensspecifikus pupillaadaptáció figyelembevételére érdemes lenne a vizusértékkel együtt a pupilla átmérőjét is feljegyezni, amely nagymértékben hozzájárulna a mérések konzisztenciájának növeléséhez. A mérési paramétereken túl a vizsgálatok kiértékelését is egységesíteni kellene mind a statisztikus, mind pedig a rendszeres hiba minimalizálására, amelyre a nemlineáris regresszió az optimális módszer. Ezen felül az egyes karakterekre adott válaszok korrelációalapú pontozása is finomítja az elért eredményt, azonban ennek alkalmazása megköveteli a válaszok egyenkénti regisztrálását, amelyre egy új számítógép-vezérelt mérési eljárást javasoltunk. Mivel a módszer ~20%-kal csökkenti a véletlen hibát és cserébe csak ~10%-kal növeli a mérési időt a standard ETDRS-vizsgálatokhoz képest, így megfelelő alternatívát jelent olyan esetekben, amikor nagy pontosságú vizsgálatokra van szükség.

## Irodalom

- Vanden Bosch, M. E., Wall, M.: Visual acuity scored by the letter-by-letter or probit methods has lower retest variability than line assignment method. *Eye* 11 (1997) 411–417.
- Shah, N., Dakin, S. C., Whitaker, H. L., Anderson, R. S.: Effect of scoring and termination rules on test–retest variability of a novel high-pass letter acuity chart. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 55/3 (2014) 1386–1392.
- Kaiser, P. K.: Prospective evaluation of visual acuity assessment: a comparison of Snellen versus ETDRS charts in clinical practice (An AOS Thesis). *Transactions of the American Ophthalmological Society* 107 (2009) 311–324.
- Somlai J., Kovács T.: *Neuro-Ophthalmology*. Springer (2016).
- International Council of Ophthalmology, Visual Functions Committee: Visual acuity measurement standard, ICO 1984. *Italian Journal of Ophthalmology II/1* (1988) 1–15.
- Hazel, C. A., Elliott, D. B.: The dependency of logMAR visual acuity measurements on chart design and scoring rule. *Optometry and Vision Science* 79/12 (2002) 788–792.
- Rosser, D. A., Murdoch, I. E., Fitzke, F. W., Laidlaw, D. A.: Improving on ETDRS acuities: design and results for a computerized thresholding device. *Eye* 17/6 (2003) 701–706.
- Norton, T. T., Corliss, D. A., Bailey, I. L.: *The Psychophysical Measurement of Visual Function*. Ridgeview Publishing (2014).
- Shlaer, S.: The relation between visual acuity and illumination. *Journal of General Physiology* 21/2 (1937) 165–188.
- Campbell, F. W., Gregory, A. H.: Effect of Size of Pupil on Visual Acuity. *Nature* 187 (4743) (1960) 1121–1123.
- Lythgoe, R. J.: *The Measurement of Visual Acuity*. Medical Research Council, Special Reports Series, H. M. Stationary (1932).
- Rabbetts, R. B.: *Bennett and Rabbetts' Clinical Visual Optics*. Butterworth–Heinemann, Elsevier (2007).
- Fülep Cs., Kovács I., Kránitz K., Nagy Z. Zs., Erdei G.: Application of correlation-based scoring scheme for visual acuity measurements in the clinical practice. *Translational Vision Science and Technology* 8(2):19 (201) 1–13.
- Fülep Cs., Kovács I., Kránitz K., Erdei G.: Simulation of visual acuity by personalizable neuro-physiological model of the human eye. *Scientific Reports* 9:7805 (2019) 1–15.
- Timár-Fülep Cs., Erdei G.: Investigation of the effect of pupil diameter on visual acuity using a neuro-physiological model of the human eye. *IS&T Human Vision and Electronic Imaging Conference 2019 proceedings HVEI-207* (2019).
- Fülep Cs., Kovács I., Kránitz K., Erdei G.: Correlation-based evaluation of visual performance to reduce the statistical error of visual acuity. *Journal of the Optical Society of America A* 34/7 (2017) 1255–1264.
- Erdei G., Fülep Cs.: Measuring visual acuity of a client. *World Intellectual Property Organization WO/2018/020281 A1* (2018) PCT/HU2016/000050.
- Liu, L., Klein, S. A., Xue, F., Zhang, J. Y., Yu, C.: Using geometric moments to explain human letter recognition near the acuity limit. *Journal of Vision* 9/1 (2009) 26.