

# Az egészséges cornea biomechanikájának vizsgálata Scheimpflug-elven működő képalkotással\*

NÉMETH GÁBOR, HASSAN ZIAD, SZALAI ESZTER, BERTA ANDRÁS, MÓDIS LÁSZLÓ

Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum,  
Szemklinika (Igazgató: Prof. Dr. Berta András egyetemi tanár)

**Célkitűzés:** Célunk az volt, hogy egy új cornealis biomechanikát vizsgáló műszer, a CorVis ST által mért paramétereket és azok ismételtetését vizsgáljuk, valamint elemezzük ezek egymás közti és egyéb biometriai paraméterekkel, valamint az életkorral való összefüggésüket.

**Betegek és módszer:** A beválogatáshoz egészséges szemeket használtunk, kizáró ok volt a 2,0 D-nál nagyobb refrakciós hiba, bármilyen korábbi szemészeti műtét vagy kontaktlencse viselése. A Scheimpflug-képalkotás elvét használó CorVis ST-készülékkel minden szemről 3 felvételt készítettünk, majd IOLMasterrel rögzítettük a szemek tengelyhosszát és keratometriai értékeit.

**Eredmények:** 60 páciens 60 egészséges, jobb szemén végeztük vizsgálatainkat (életkor:  $63,55 \pm 14,20$  év). A pachymetriai és szemnyomás-értékek kiváló ismételtetését mutattak (Cronbach alfa  $>0,95$ ). A legnagyobb homorulat értéke és az első applanációs idő igen jó mérési ismételtetéssel rendelkezett (Cronbach alfa  $>0,88$ ), azonban a többi biomechanikai paramétermérés ismételtetése nem volt jó. A CorVis ST által mért specifikus biomechanikai paraméterek nem mutattak szignifikáns összefüggést az életkorral és a tengelyhossz értékével sem ( $r^2=0,24$ ;  $p=0,27$ ;  $r^2=0,23$ ;  $p=0,33$ , sorban). A lapos és meredek keratometriai értékek szignifikáns összefüggést mutattak a CorVis ST által mért biomechanikai paraméterekkel ( $r^2=0,41$ ;  $p<0,01$  és  $r^2=0,42$ ;  $p<0,01$ , sorban). A biomechanikai adatok és szemnyomás, valamint a corneavastagság közt jelentős összefüggést igazoltunk ( $r^2=0,97$ ;  $p<0,001$  és  $r^2=0,36$ ;  $p=0,002$ ).

**Következtetés:** A cornealis biomechanikát mérő új műszer ismételtetése a szemnyomást és a corneavastagságot tekintve igen magas, a többi paraméter esetén viszont változó. A biomechanikai paraméterek az életkorral és tengelyhosszal nem mutattak összefüggést, azonban a keratometriai értékekkel, a szemnyomással és a corneavastagsággal jelentős összefüggés igazolható.

## Examination of biomechanics of normal corneas with Scheimpflug-based imaging

**Purpose:** Our aim was to analyze parameters and measurement repeatability with a new device assessing corneal biomechanics, and to examine correlations between biomechanical data and age and biometric parameters.

**Patients and methods:** Inclusion criteria were healthy eyes without  $>2.0$  D refractive error. Exclusion criteria were any previous ophthalmological surgery or contact lens wearing. Three images were captured from each eyes with CorVis ST device based on Scheimpflug imaging, which after we determined axial length and keratometric data with IOLMaster.

**Results:** 60 eyes of 60 healthy patients were included in our study (age:  $63.55 \pm 14.20$  years). Pachymetric and intraocular pressure data showed excellent repeatability (Cronbach alpha  $>0.95$ ). Highest concavity and first applanation time showed good repeatability (Cronbach alpha  $>0.88$ ), but repeatability of the other specific parameters were poor. There were no significant correlation between age, axial length and specific CorVis ST parameters ( $r^2=0.24$ ;  $p=0.27$ ;  $r^2=0.23$ ;  $p=0.33$ , respectively). Significant correlations were observed between flattest, steepest keratometric data and CorVis ST parameters ( $r^2=0.41$ ;  $p<0.01$  and  $r^2=0.42$ ;  $p<0.01$ , respectively). Strong correlation was observed between intraocular pressure, corneal thickness and the measured biomechanical parameters ( $r^2=0.97$ ;  $p<0.001$  and  $r^2=0.36$ ;  $p=0.002$ ).

**Conclusion:** Measurement repeatability for intraocular pressure and corneal thickness are high with this new device assessing corneal biomechanics. There were no significant correlations between biomechanical parameters and age and axial length. Significant correlations can be observed between specific parameters and intraocular pressure and corneal thickness.

**KULCSSZAVAK** cornea biomechanika, CorVis ST, Ocular Response Analyzer

**KEYWORDS** corneal biomechanics, CorVis ST, Ocular Response Analyzer

\*Az MSZT Cornea Társaság közleménye

A szem elülső szegmentum paramétereinek pontos és megbízható mérése a szemészeti műtétek tervezéséhez és az utánkövetéshez fontos követelmény. A jelenleg alkalmazott diagnosztikus módszerek az elülső szegmentum statikus paramétereit mérik. A cornea azonban egy viscoelasztikus tulajdonságú anyagnak tekinthető (21), amelyre jellemző biomechanikai tulajdonságokat eddig csak a 2005-ben bemutatott Ocular Response Analyzer (ORA, Reichert Ophthalmic Instruments, Depew, New York, USA) méri in vivo (14,17).

E műszer megjelenésével került előtérbe a cornea biomechanikájának vizsgálata glaukóma esetén, valamint különböző keratorefraktív műtétek és cornealis kollagén cross-linking (CXL) terápia hatásának ilyen irányú vizsgálatához (1, 2, 9, 11, 19, 22). Már az első közlemény szerint is az ORA által mért jellemző paraméter különbözik egészséges, keratoconusos és refraktív műtét utáni szemeken (16). Magyar szerzők is beszámoltak az ORA gyakorlati felhasználási lehetőségeiről (3).

Nemrégben egy új műszer jelent meg a piacon, a CorVis ST (Corneal Visualization Scheimpflug Technology, CorVis ST, Oculus Inc., Wetzlar, Németország), amely szintén nagy intenzitású levegőimpulzust használ a biomechanikai méréshez, amelyhez ultragyors Scheimpflug-kamerát használ. Célunk az volt, hogy a CorVis ST által mért paramétereket és azok ismételtetését vizsgáljuk, valamint elemezzük ezek egymás közti és egyéb biometriai paraméterekkel, valamint az életkorral való összefüggésüket.

## BETEGEK ÉS MÓDSZER

Vizsgálatainkat egészséges szemeken végeztük. A beválogatásnál kizáró ok volt bármilyen elülső szegmentum elváltozás, 2,0 D-t meghaladó sphericus vagy cylinderes refrakciós hiba, bármilyen korábbi sze-

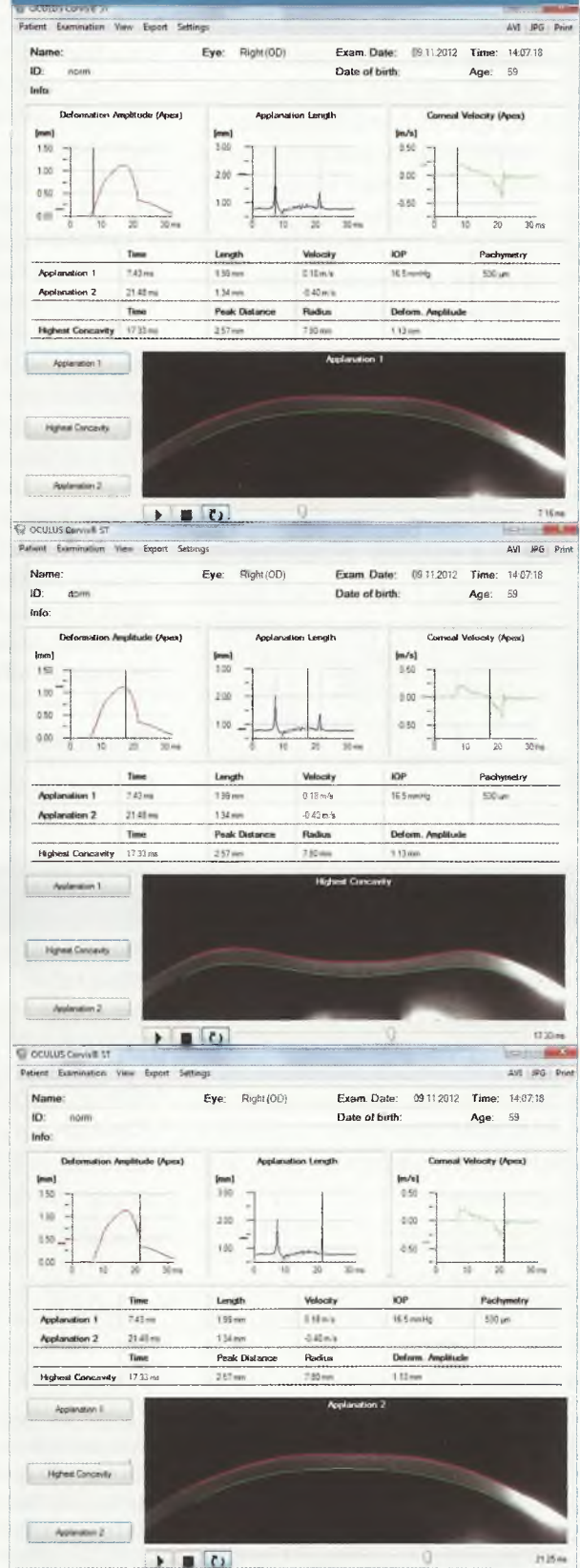
mészeti műtét vagy kontaktlencse viselése.

Először a CorVis ST-készülékkel mértünk. A CorVis ST egy non-contact tonometer, pachymeter és a cornea biomechanikai paramétereit mérő készülék. A műszerben egy ultragyors Scheimpflug-kamera dolgozik (4330 kép/másodperc), amely 455 nm hullámhosszú, kék LED-fényt alkalmaz. A lelassított felvételen mintegy 30 milliszekundum alatt láthatóvá válik a cornea deformálódása egy nagy intenzitású, 25 kPa nyomású levegőoszlop befúvására reagálva. A levegőimpulzus hatására bekövetkező változás 3 szakaszra osztható:

- első applanáció,
- legnagyobb kitérés és
- második applanáció szakasza.

A mérés alatt számos paraméter kerül rögzítésre: a cornea csúcsának maximális kitérése (a cornea legnagyobb homorulata), az ennek eléréséhez szükséges idő, az első és második applanáció szélessége és ideje, a maximális cornealis sebesség befelé és kifelé, a két cornealis csúcs közti távolság a legnagyobb homorulat idejében, valamint a leg-

1. ábra: A CorVis ST-készülékkel észlelt 3 szakasz képe egy nagy intenzitású levegő befúvására reagálva. Fentről lefele: az első applanáció, a legnagyobb kitérés és a 2. applanáció szakasza



nagyobb kitérésnél mért centrális konkáv görbületre illeszthető kör görbületi sugara (1. ábra). A készülék méri a cornea vastagságát és a szemnyomást is. A 30 milliszekundumról készült film és a mért adatok exportálhatók a gépből további statisztikai feldolgozáshoz.

A vizsgált páciens ülőhelyzetben van, az állát és homlokát a műszerhez támasztja. A beállító joystick segítségével a cornea közepére célzunk, ekkor a páciens a gépben egy piros világító LED-fényt lát, amire fixálnia kell. A készülék képernyőjén láthatóvá válik, hogy milyen irányban kell állítanunk a gépet a cornea csúcán történő centrálásához. Pontos beállítás esetén a levegőimpulzus automata módon indul el, majd a mérés után az adatokat a műszer számítógépre exportálja. Minden páciens minden jobb szemén 3-3 mérést végzett ugyanaz a vizsgáló. Ezen mérések között 1-2 perc telt el, a páciens ezalatt a várakozási idő alatt a fejét kivette az álltartóról. Ezután IOLMaster-rel (Carl Zeiss Meditec, Jena, Németország) rögzítettük a tengelyhossz értékét és a keratometriai adatokat.

A mérések lényegét elmagyaráztuk minden páciensnek. Vizsgálatainkat a Helsinki Deklaráció etikai normáival összhangban végeztük. Statisztikai analízist a MedCalc 10.0 és Microsoft Excel szoftverekkel készítettünk. A leíró statisztikához átlag, standard szórás (SD) és az átlag 95%-os konfidencia intervallumát (95% CI) alkalmaztuk. Többszörös regressziós analízist végeztünk a CorVis ST-specifikus paraméterei és az életkor, a tengelyhossz, valamint a keratometriai adatok között, és meghatároztuk a determináltsági koefficienseket. Amennyiben a  $p$ -érték 0,05 alatt volt, statisztikai szignifikanciát írtunk le. Minden paraméter esetén kiszámítottuk az átlagos variációs koefficiens (CV), amit a szórás és az átlagérték hányadosaként definiáltunk. Kiszámítottuk az osztályon belüli (intra-class) korrelációs koefficiens (ICC), ami egy mérési sorozat megbízhatóságát jellemzi, valamint ennek 95% CI értékét, valamint meghatároztuk a Cronbach alfa értékeit is.

## EREDMÉNYEK

60 páciens, 60 jobb szemén végeztük vizsgálatainkat ( $63,55 \pm 14,20$

év, 95% CI: 59,88–67,22 év, range: 22,8–87,3 év). A CorVis ST által mért specifikus paraméterek részletes adatait és a mérések megbízhatóságát jellemző értékeket az 1. és 2. táblázat részletezi.

Az IOLMaster-rel végzett vizsgálatok  $23,37 \pm 1,26$  mm-es tengelyhosszat mértek (95% CI: 23,04–23,69 mm, range: 21,22–27,7 mm). A lapos keratometriai érték  $43,57 \pm 1,40$  D (95% CI: 43,21–43,94 D, range: 40,52–47,2 D), a meredek keratometriás érték pedig  $44,38 \pm 1,37$  D (95% CI: 44,03–44,74 D, range: 41,77–47,6 D) volt.

A CorVis ST által mért specifikus biomechanikai paraméterek nem mutattak szignifikáns összefüggést az életkorral és a tengelyhossz értékével (kiegyenlített determináltsági koefficiens,  $r^2=0,24$ ;  $p=0,27$ ;  $r^2=0,23$ ;  $p=0,33$ , sorban). A lapos és meredek keratometriai értékek viszont szignifikáns összefüggést mutattak a CorVis ST-paraméterei-vel (kiegyenlített determináltsági koefficiens,  $r^2=0,41$ ;  $p<0,01$  és  $r^2=0,42$ ;  $p<0,01$ , sorban). A CorVis ST által számított szemnyomás-érték és a specifikus biomechanikai adatok közt erős összefüggés iga-

1. táblázat: Egészséges szemeken mért paraméterek CorVis ST-készülékkel (n=60)

	Átlag±SD	95% CI	Range
Szemnyomás (Hgmm)	14,98±2,81	14,26–15,71	10,33–26,17
Pachymetria (µm)	557,65±34,26	548,79–566,49	480,67–648,67
Def. amp. max (mm)	1,07±0,08	1,05–1,09	0,89–1,25
A1 time (ms)	7,25±0,31	7,17–7,33	6,53–8,34
A1 length (mm)	1,75±0,15	1,71–1,79	1,32–2,04
A1 velocity (m/s)	0,15±0,02	0,14–0,15	0,06–0,19
A2 time (ms)	21,60±0,50	21,47–21,73	20,15–24,04
A2 length (mm)	1,91±0,33	1,82–1,99	0,77–2,66
A2 velocity (m/s)	–0,34±0,05	–0,35– –0,32	–0,49– –0,18
HC Time (ms)	16,90±0,33	16,82–16,99	16,17–17,86
Peak dist. (mm)	3,04±0,73	2,85–3,23	1,19–5,22
Radius (mm)	7,84±0,74	7,65–8,03	6,02–9,41

Def. amp. max: a corneacsúcs maximális kitérése (legnagyobb homorulat); A1 time: az első applanációig eltelt idő; A1 length: az első applanációnál lelapított corneaterület szélessége; A1 velocity: az első applanáció sebessége; A2 time: a második applanációig eltelt idő, A2 length: a második applanációnál lelapított corneaterület szélessége; A2 velocity: a második applanáció sebessége, HC Time: a legnagyobb homorulat elérésig eltelt idő, peak dist: a két corneacsúcs távolsága a legnagyobb homorulat idején, radius: a corneára illeszthető kör görbületi sugara a legnagyobb kitéréskor; SD: standard szórás, 95% CI: az átlag 95%-os konfidencia-intervalluma

2. táblázat: Ismételhetőségi adatok CorVis ST-készülékkel egészséges szemeken (n=60)

	ICC	Az ICC 95% CI értéke	Cronbach alfa	a Cronbach alfa 95% CI-jének alsó értéke	CV
Szemnyomás (Hgmm)	0,857	0,791-0,906	0,949	0,927	0,007
Pachymetria ( $\mu\text{m}$ )	0,973	0,959-0,983	0,992	0,988	0,008
Def. amp. max (mm)	0,703	0,587-0,798	0,883	0,832	0,046
A1 time (ms)	0,784	0,664-0,841	0,908	0,869	0,018
A1 length (mm)	0,009	0,138-0,154	0,278	0,035	0,131
A1 velocity (m/s)	0,392	0,232-0,549	0,658	0,510	0,147
A2 time (ms)	0,251	0,089-0,424	0,618	0,450	0,013
A2 length (mm)	0,294	0,134-0,461	0,556	0,363	0,195
A2 velocity (m/s)	0,492	0,337-0,636	0,760	0,654	-0,117
HC Time (ms)	0,252	0,093-0,422	0,506	0,292	0,019
Peak dist. (mm)	0,219	0,061-0,390	0,458	0,224	0,241
Radius (mm)	0,456	0,300-0,604	0,716	0,593	0,072

Részletes magyarázat az 1. táblázat alatt. ICC: Osztályon belüli (intraclass) korrelációs koefficiens; CV: variációs koefficiens

zolható (kiegyenlített determináltsági koefficiens,  $r^2=0,97$ ;  $p<0,001$ ). Szintén jelentős összefüggést igazoltunk a cornea vastagsága és ezen műszerspecifikus paraméterek között (kiegyenlített determináltsági koefficiens,  $r^2=0,36$ ;  $p=0,002$ ).

## MEGBESZÉLÉS

A cornea biomechanikai értelmezése a corneát viscoelasztikus anyagként kezeli. A cornea biomechanikáját vizsgáló eddig ismert egyetlen in vivo alkalmazható műszer, az ORA egy precíz, szabályozott levegőimpulzust lök ki a cornea felszínére. Ennek hatására némi késéssel a cornea elkezd benyomódni, konkává válik, majd rugalmasságánál fogva visszanyeri eredeti alakját. Ezen deformálódás paramétereiből lehet következtetni a cornea biomechanikájára, amit két fő adattal ír le az ORA. A 20 milliszekundumos deformációs idő alatt két applanációs nyomásértéket mér és a két érték közötti különbséget cornealis hysteresisnek (CH) nevezi el. A műszer ezenkívül meghatároz egy számított értéket, a cornealis rezisztenciafaktort is (CRF), a legújabb szoftver pedig még további adatokat is szolgáltat. Ezen biomechanikai vizsgálatok felhasználá-

lási területei a keratoconus diagnosztika (8,25) mellett a kerato-refraktív műtétek (2, 19), a CXL hatásának vizsgálata (9, 22) valamint a glaukóma diagnosztika (1, 11).

Egy nemrég megjelent összefoglaló tanulmányban számolnak be az ORA-val kapcsolatos eddigi ismereteinkről (23). A LASIK utáni CRF- és CH-változás jól ismert (2, 19), de leírtak epi-LASIK utáni jelentős eltérést is (20). A CXL nem változtatja meg az ORA által mért 2 legfőbb paramétert (22), de egy új ORA szoftver új paramétereivel a CXL utáni corneákon is kimutatható biomechanikai különbségek adódtak (22). Számos, az ORA-készülék adatait feldolgozó közlemény ír a cornea biomechanikájának megváltozásáról keratoconus kapcsán (4, 5, 8, 25). A CH- és a CRF-értékek statisztikailag szignifikánsan alacsonyabbak keratoconusos szemeken az egészségeshez képest, de mindkét paraméter alacsony szenzitivitású és specificitású a két csoport közti különbség tételére, így nem feltétlenül tartják alkalmasnak őket ilyen irányú diagnosztizálásra csak e két paraméter alapján (4, 5). A közelmúltban egy másik, szintén a cornealis biomechanikát in vivo vizsgáló készülék jelent meg a piacon. A CorVis ST a pachymetriai

érték és szemnyomás mérése mellett számos új, specifikus paramétert mér, amelyek nem hasonlíthatók össze az ORA által mért adatokkal. Egy ilyen új eszköz bevezetésénél és későbbi használatánál fontos a műszer mérési ismételhetőségének kérdése, és egy normál-szemeken mért adatbázis is, mint későbbi viszonyítási alap. Célunk volt, hogy a CorVis ST-vel mért paramétereket tekintve egészséges szemeken meghatározzunk egy „normál” adattartományt és kíváncsiak voltunk a műszer által mért specifikus paraméterek mérési ismételhetőségére is.

Az ORA esetén igen jó ismételhetőséget igazoltak a CH-t és a szemnyomást tekintve (14, 17). Saját adataink a CorVis ST-készülékkel csak pachymetriai és szemnyomásértékre mutatnak kiváló ismételhetőséget (Cronbach alfa  $>0,95$ ). A legnagyobb homorulat értéke és az első applanációs idő is igen jó ismételhetőséggel rendelkezik (Cronbach alfa  $>0,88$ ). Azonban a többi paraméter mérési ismételhetősége nem jó, bár a második applanáció idejének, a legnagyobb homorulat idejének és a legnagyobb homorulatra illeszthető kör görbületi sugarának variációs koefficiense elég alacsony. Ezért javasoljuk ezen ada-

tok használata esetén, hogy legalább 3 ismételt mérés átlagával számoljunk következtetések levonásához.

A CH, CRF és a cornealis vastagság, valamint a szemnyomás között szignifikáns összefüggést igazoltak (10), emellett az ORA által mért két fő érték és a keratometriás értékek közt negatív korrelációt igazoltak (15), bár más szerzők nem igazolták ezt a megfigyelést (7). Saját adataink a CorVis ST specifikus paraméterei és a szemnyomás, a corneavastagság, valamint a keratometriás adatok közt is egyértelmű összefüggést igazoltak.

Ismert egyes biomechanikai paraméterek életkorfüggése is (6, 13, 18), amelyek szerint jellemzően a cornea elasztikus tulajdonságai függenek az életkortól (18). Ezzel ellentétben, mások az ORA által mért CH- és CRF-adatok életkori függését nem igazolták (12, 24), bár *Touboul és munkatársai* (24) mégis azt feltételezik, hogy a cornea viscoelasztikus tulajdonsága csökken az életkorral. Saját vizsgálataink szerint a CorVis ST által mért paraméterek nem mutatnak statisztikailag szignifikáns összefüggést az életkorral és a szem tengelyhosszával sem. Azonban a keratometriai érté-

kek és a specifikus CorVis ST-adatok között jelentős összefüggést mutattunk ki.

## KÖVETKEZTETÉSEK

Összefoglalva, adataink arra engednek következtetni, hogy az Oculus CorVis ST-készülék ismételt használata csak a szemnyomást és a pachymetriai adatot tekintve kiváló, ezért javasoljuk, hogy minden esetben legalább 3 mérés átlagával számoljunk biomechanikai következtetések levonásához. Emellett jelentős összefüggést igazoltunk a biomechanikai adatok és szemnyomás, valamint a corneavastagság közt.

## IRODALOM

1. Ayala M. Corneal Hysteresis in Normal Subjects and in Patients with Primary Open-Angle Glaucoma and Pseudoexfoliation Glaucoma. *Ophthalmic Res* 2011; 46: 187–191.
2. Chen S, Chen D, Wang J, et al. Changes in ocular response analyzer parameters after LASIK. *J Refract Surg* 2010; 26: 279–88.
3. Dunai Á, Nagy ZZ. Az Ocular Response Analyzer új fejlesztésű non-kontakt tonométer bemutatása. *Szemészet* 2007; 144: 207–211.
4. Fontes BM, Ambrósio RJr, Jardim D, et al. Corneal biomechanical metrics and anterior segment parameters in mild keratoconus. *Ophthalmology* 2010; 117: 673–679.
5. Fontes BM, Ambrósio RJr, Velarde GC, et al. Ocular response analyzer measurements in keratoconus with normal central corneal thickness compared with matched normal control eyes. *J refract Surg* 2011; 27: 209–215.
6. Foster PJ, Broadway DC, Garway-Heath DF et al. Intraocular pressure and corneal biomechanics in an adult British population: the EPIC-Norfolk eye study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2011; 52: 8179–8185.
7. Franco S, Lira M. Biomechanical properties of the cornea measured by the Ocular Response Analyzer and their association with intraocular pressure and the central corneal curvature. *Clin Exp Optom* 2009; 92: 469–475.
8. Galletti JG, Pfürtner T, Bonthoux FF. Improved keratoconus detection by ocular response analyzer testing after consideration of corneal thickness as a confounding factor. *J Refract Surg* 2012; 28: 202–208.
9. Greenstein SA, Fry KL, Hersh PS. In vivo biomechanical changes after corneal collagen cross-linking for keratoconus and corneal ectasia: 1-year analysis of a randomized, controlled, clinical trial. *Cornea* 2012; 31: 21–25.
10. Kamiya K, Hagishima M, Fujimura F, Shimizu K. Factors affecting corneal hysteresis in normal eyes. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2008; 246: 1491–1494.
11. Kaushik S, Pandav SS, Banger A, et al. Relationship between corneal biomechanical properties, central corneal thickness, and intraocular pressure across the spectrum of glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2012; 153: 840–849.
12. Kirwan C, O'Keefe M, Lanigan B. Corneal hysteresis and intraocular pressure measurement in children using the reichert ocular response analyzer. *Am J Ophthalmol*. 2006; 142: 990–2.
13. Kotecha A, Elsheikh A, Roberts CR, et al. Corneal thickness- and age-related biomechanical properties of the cornea measured with the ocular response analyzer. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2006; 47: 5337–5347.
14. Kynigopoulos M, Schlote T, Kotecha A, et al. Repeatability of intraocular pressure and corneal biomechanical properties measurements by the ocular response analyzer. *Klin Monbl Augenheilkd* 2008; 225: 357–360.
15. Lim L, Gazzard G, Chan YH, et al. Cornea biomechanical characteristics and their correlates with refractive error in Singaporean children. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2008; 49: 3852–3857.
16. Luce DA. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. *J Cataract Refract Surg* 2005; 31: 156–162.
17. Moreno-Montanes J, Maldonado MJ, et al. Reproducibility and clinical relevance of the ocular response analyzer in nonoperated eyes: corneal biomechanical and tonometric implications. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2008; 49: 968–974.
18. Ortiz D, Pinero D, Shabayek MH, et al. Corneal biomechanical properties in normal, post-laser in situ keratomileusis, and keratoconic eyes. *J Cataract Refract Surg* 2007; 33: 1371–1375.
19. epose JS, Feigenbaum SK, Qazi MA, et al. Changes in corneal biomechanics and intraocular pressure following LASIK using static, dynamic, and noncontact tonometry. *Am J Ophthalmol* 2007; 143: 39–47.
20. Ryan DS, Coe CD, Howard RS, et al. Corneal biomechanics following ep LASIK. *J Refract Surg* 2011; 27: 458–464.
21. Soergel F, Jean B, Seiler T, et al. Dynamic mechanical spectroscopy of the cornea for measurement of its viscoelastic properties in vitro. *Ger J Ophthalmol* 1995; 4: 151–156.
22. Spoerl E, Terai N, Scholz F, et al. Detection of biomechanical changes after corneal cross-linking using Ocular Response Analyzer software. *J Refract Surg* 2011; 27: 452–457.
23. Terai N, Raiskup F, Haustein M, et al. Identification of biomechanical properties of the cornea: the ocular response analyzer. *Curr Eye Res* 2012; 37: 553–562.
24. Touboul D, Roberts C, Kérautret J, et al. Correlations between corneal hysteresis, intraocular pressure, and corneal central pachymetry. *J Cataract Refract Surg* 2008; 34: 616–622.
25. Wolffsohn JS, Safeen S, Shah S, et al. Changes of corneal biomechanics with keratoconus. *Cornea* 2012; 31: 849–854.