

A Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum Szemészeti Klinikájának (igazgató: Berta András egyetemi tanár) közleménye

## Új képalkotó módszer az elülső szegmentum vizsgálatában: Fourier-domain OCT

SZALAI ESZTER, BERTA ANDRÁS, MÓDIS LÁSZLÓ

**Célkitűzés:** A legújabb fejlesztésű hangolható lézer Fourier-domain elülső szegmentum optikai koherenciatomográfia (OCT), más néven optikai frekvencia domain leképezés bemutatása az elülső szegmentum képalkotásában, illetve különböző kórállapotainak diagnosztikájában. További célunk volt egészséges egyének szaruhártya-törőerejének meghatározása OCT-vel, s a Pentacam HR eredményeivel történő összehasonlítása.

**Módszerek:** 54 egészséges személy (átlagéletkor:  $34,37 \pm 13,48$  év) jobb szemét vontuk be tanulmányunk összehasonlító részébe. A vízszintes (K1) és függőleges (K2) tengelyben rögzített axialis keratometriás, valamint a keratometriás astigmatiaértékeket hasonlítottuk össze a szaruhártya centrális 3 mm átmérőjű zónájában az elülső szegmentum OCT (CASIA SS-1000; Tomey, Erlangen, Németország) és a Pentacam HR (Pentacam High Resolution; Oculus, Wetzlar, Németország) között.

**Eredmények:** A sferikus keratometriás értékek szignifikáns különbséget mutattak az OCT és a Scheimpflug-kamera között (K1:  $p=0,0002$ ; K2:  $p=0,002$ ), habár a két berendezés K1- és K2-eredményei között a különbség mindössze  $0,08 \pm 0,59$  D és  $0,06 \pm 0,69$  D volt. Nem találtunk azonban szignifikáns különbséget a keratometriás astigmatia értékei között a két tomográfiaval meghatározva ( $p=0,90$ ), köztük az eltérést  $0,02 \pm 0,19$  D-nak mértük.

**Következtetések:** A legújabb fejlesztésű Fourier-domain elülső szegmentum OCT mikrométer felbontású felvételeket készít non-kontakt módon, majd ezek alapján változatos kvantitatív elemzéseket szolgáltat az elülső szegmentum struktúráiról mind normális, mind patológiás viszonyok között. A készülék további előnye, hogy a szintén újdonságnak tekinthető Scheimpflug-tomográfiaval összehasonlítva a keratometriás értékek között klinikailag szignifikáns különbség nem volt.

**Kulcsszavak:** elülső szegmentum, Fourier-domain OCT, optikai koherenciatomográfia, Pentacam HR

**Szalai E, Berta A, Módis L: Evaluation of a novel technique for imaging of the anterior segment: Fourier domain OCT**

**Aims:** The recently developed swept light source Fourier domain anterior segment optical coherence tomography (OCT), also known as optical frequency domain imaging, was evaluated in the visualization and diagnosis of different anterior segment disorders. Furthermore, the keratometric results measured on healthy subjects with OCT and Pentacam HR instruments were compared.

**Methods:** The right eyes of 54 healthy subjects (mean age:  $34.37 \pm 13.48$  years) were enrolled in the comparative part of the study. Axial keratometry in the horizontal (K1) and vertical (K2) meridians, and keratometric astigmatism measurements were recorded in the central 3 mm zone with the anterior segment OCT (CASIA SS-1000; Tomey, Erlangen, Germany) and the Pentacam HR (Pentacam High Resolution; Oculus, Wetzlar, Germany).

**Results:** The spherical keratometric data revealed significant differences between the OCT and Scheimpflug camera (K1:  $p=0.0002$ ; K2:  $p=0.002$ ), although the difference between the results with the two devices was only  $0.08 \pm 0.59$  D and  $0.06 \pm 0.69$  D, respectively. No significant difference was disclosed between the two tomographs in keratometric astigmatism values ( $p=0.90$ ); the difference between them was  $0.02 \pm 0.19$  D.

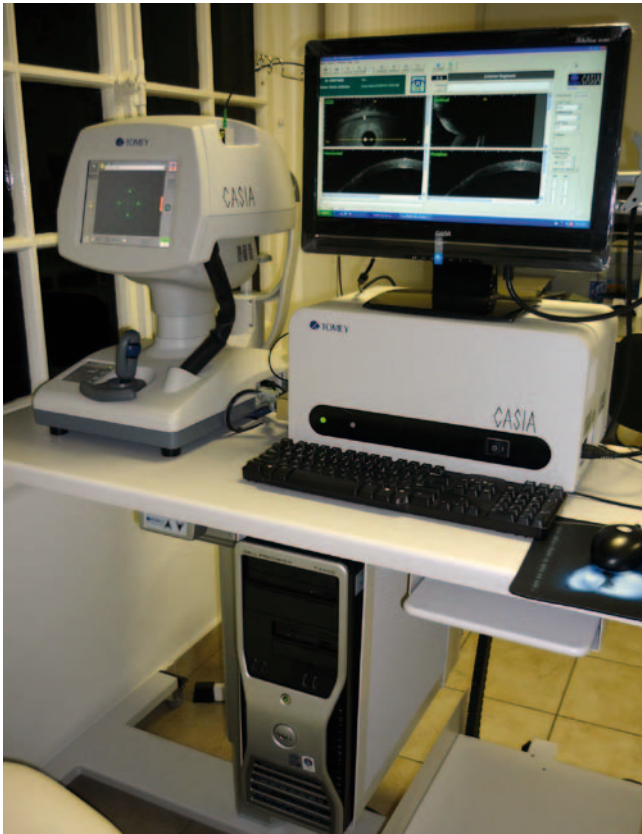
**Conclusions:** The newly developed Fourier domain anterior segment OCT captures micrometer resolution scans in a non-contact fashion, and provides various quantitative analyses of the anterior segment structures under both normal and pathological conditions. As a further advantage of the instrument, no clinically significant difference was found in keratometric values as compared with the recent Scheimpflug tomography.

**Key words:** anterior segment, Fourier-domain OCT, optical coherence tomography, Pentacam HR

A szem elülső szegmentumának kvantitatív vizsgálata, különös tekintettel a cornea és az elülső csarnok pontos jellemzésére, a refraktív és szürkehályog-sebészet fejlődésével egyre nagyobb részletgazdagságot követel meg, amely számos bonyolult optikai elven működő képalko-

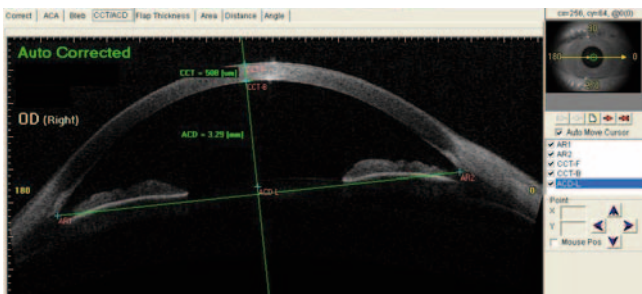
tó rendszer klinikai gyakorlatba való bevezetését vonta maga után.

Az optikai koherenciatomográfia (OCT) mikrométer felbontású felvételeket biztosít a felszín alatt elhelyezkedő szöveti struktúrákról, ezért optikai biopszia néven

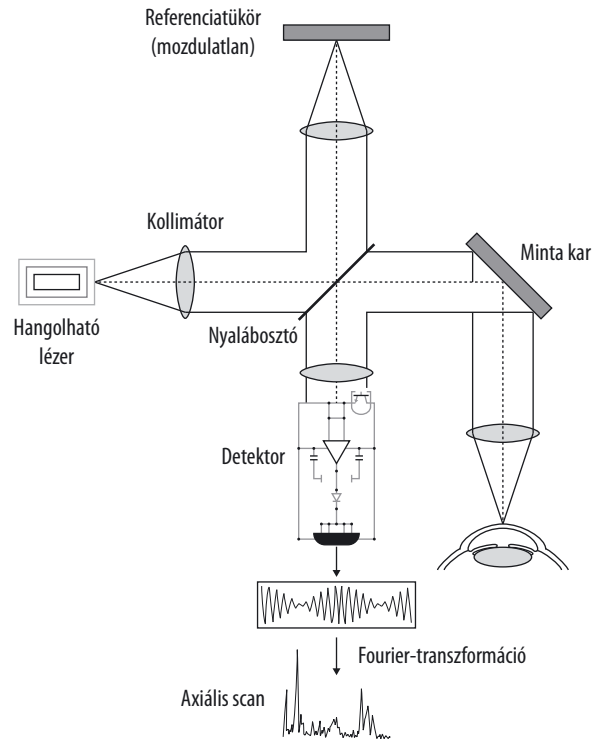


1. ábra. A CASIA SS-1000 hangolható lézer Fourier-domain elülső szegmentum OCT

is emlegetik.<sup>2,12</sup> Tanulmányunkban a legújabb fejlesztésű hangolható lézer Fourier-domain elülső szegmentum OCT (CASIA SS-1000; Tomey, Erlangen, Németország) technológiát, más néven optikai frekvencia domain leképezést teszteltük az elülső szegmentum képalkotásában, illetve különböző kórképeinek diagnosztikájában. További célunk volt egészséges szaruhártyák törőerejének meghatározása OCT-vel, és a kapott adatok Penta-



3. ábra. Egészséges szemről „anterior segment” módban készült keresztmetszeti felvétel Fourier-domain elülső szegmentum OCT-vel. A magas felbontású B-képen lehetőség van automatikus és manuális méréseket végezni a cornealis (CCT) és azon belül az esetleges lebenyvastagságról, az elülső csarnok mélységéről (ACD), valamint a csarnokzugi képletekről a tetszőlegesen kiválasztott síkokban



2. ábra. A Fourier-domain OCT működésének egyszerűsített, sémás rajza

cam HR (Pentacam High Resolution; Oculus, Wetzlar, Németország) eredményeivel történő összehasonlítása.

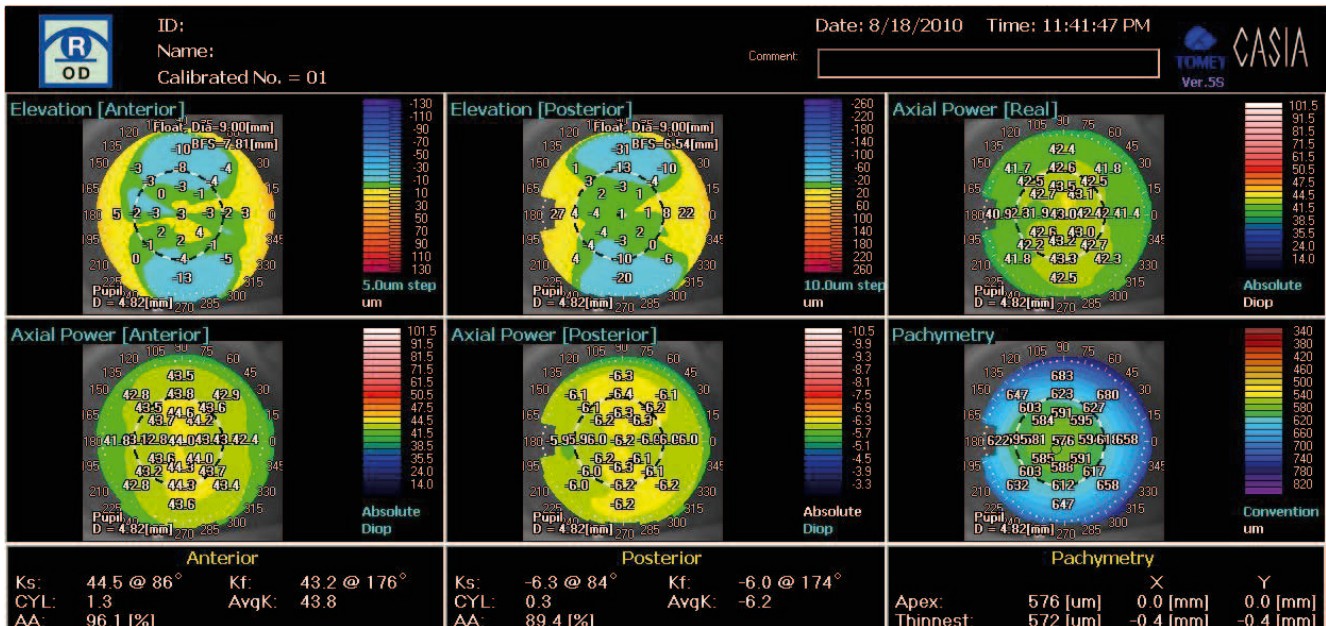
## Betegek és módszerek

### Személyek

54 egészséges személy (22 férfi és 32 nő) jobb szemét vontuk be tanulmányunk összehasonlító részébe, akik átlagéletkora  $34,37 \pm 13,48$  év (14 és 61 év között) volt. A vizsgált egyének anamnézisében nem szerepelt szemészeti kórkép, trauma vagy műtét, valamint nem szenvedtek a szemészeti állapotukat befolyásoló általános betegségben. A kontaktlencse-viselőket szintén kizártuk a vizsgálatból.

### Képalkotási elvek

Tanulmányunkban a legújabb elven működő, úgynevezett hangolható lézer Fourier-domain elülső szegmentum OCT (swept light source OCT, más néven optikai frekvencia domain képalkotó rendszer) készüléket alkalmaztuk (1. ábra). Az OCT tulajdonképpen az alacsony koherenciainterferometria fizikai jelenségen alapul. A beeső fényt (azaz kollimátoron keresztülhaladva már csak a párhuzamos nyalábokat) egy nyalábosztóval kettéosztjuk. A nyalábok egyik fele a referencia-karra, a másik a minta-karra jut. A két karról visszaverődött fény kombinációja interferenciamentázatot ad. Az interferencia két vagy több hullám szuperpozíciója, amelynek eredménye egy új hullámmintázat. A Fourier-domain OCT esetében a két karról visszaverődött hullámokat interferenciaspektrumként detektálja a berendezés, az axialis scan pedig ebből Fourier-transzformációval jön létre (2. ábra). A hangolható lézer-OCT a legújabb típusa a Fourier-domain OCT rendszereknek.<sup>14</sup> Ez a műszer 1310 nm hullámhosszú fényforrást használ, amellyel



4. ábra. A „corneal map” üzemmódban készült és a szoftver által automatikusan elemzett térképek egy egészséges szaruhártyáról elülső szegmentum OCT-vel

10 µm-es axialis és 30 µm-es transversalis felbontást biztosít, s másodpercenként 30000 axialis scant (A-scan) képes létrehozni. Az A-scanteket lateralisan sorba rakva rétegfelvétel (B-scan) keletkezik, a C-scan esetében pedig a rétegfelvétel síkja merőleges lesz a mélység irányára (tehát párhuzamos a szemfelszínnel). A beépített szoftver számos különböző szaruhártyatérképet készít (axialis, tangenciális és refraktív törőerő, pachymetriás, elevációs térképek), valamint kvantitatív és kvalitatív elülsőszegmentum-elemzéseket biztosít.

A tanulmányunkban alkalmazott magas felbontású Scheimpflug-kamera képalkotási elvét már korábbi közleményekben részleteztük.<sup>6,10</sup> Röviden összefoglalva, a Pentacam a Scheimpflug-szabályt alkalmazza, amikor a tárgy síkja, a film síkja és az objektív síkja egy közös egyenesben metszik egymást. Ennek a konfigurációnak az eredményeképpen keletkezik éles rétegfelvétel az elülső szegmentumról, a szaruhártya elülső felszínétől a lencse hátsó felszínéig.

**A vizsgálat menete**

A vizsgálati személy állának és homlokának a berendezések áll- és homloktartójában való megfelelő pozicionálása után az egyént megkértük, hogy pislogjon néhányat, majd tekintsen egyenesen előre. Mivel az általunk tesztelt mindkét műszer non-kontakt technológiával végzi a méréseket, így a szemfelszín cseppéztetésére nem volt szükség. Az összehasonlító vizsgálatokat meghatározott sorrendben végeztük, először az elülső szegmentum OCT-vel, majd a Pentacam HR-rel rögzítettük a szaruhártya elülső felszínének keratometriás adatait. Az OCT esetében a kétdimenziós felvétel megtekintéséhez (a centrális cornealis vastagság és az elülsőcsarnok-mélység méréséhez) az „anterior segment” üzemmódot (3. ábra), a különböző térképek vizsgálatához pedig a „corneal map” scan típust választottuk (4. ábra), amelyek során a gép automatikusan elkészítette és elemezte a felvételeket. Pentacam HR esetében a 25 scan üzemmódot alkalmaztuk, s a forgó Scheimpflug-kamera ugyancsak automatikusan leképezte és analizálta az elülső szegmentumot. Három felvételt készítettünk mindkét tomográfal minden vizsgálati személy esetében, s a mérések átlagát vetettük statisztikai

elemzés alá. A vízszintes (K1) és függőleges (K2) tengelyben rögzített axialis keratometriás értékeket hasonlítottuk össze a szaruhártya centrális 3 mm átmérőjű zónájában.

A statisztikai analízist MedCalc 10.2.0 program segítségével végeztük. A két berendezés eredményei közötti összehasonításhoz Wilcoxon-tesztet, valamint Bland-Altman-elemzést használtunk. Szignifikánsnak tekintettük az eredményt p<0,05 esetében.

**Eredmények**

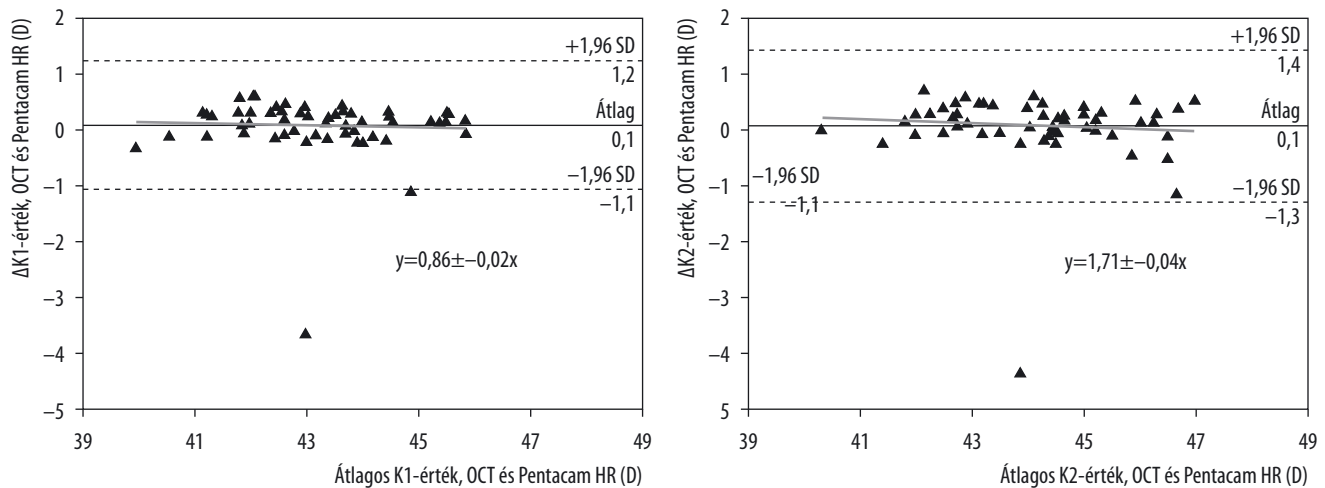
Az egészséges egyének sferikus keratometriás eredményei szignifikáns különbséget mutattak az elülső szegmentum OCT és a Scheimpflug-kamera között (K1: p=0,0002; K2: p=0,002) (1. táblázat), habár a két berendezés vízszintes és függőleges K-értékei között a különb-

1. táblázat. Az elülső szaruhártyafelszín keratometriás értékei a Fourier-domain elülső szegmentum OCT-vel és a Pentacam HR-rel meghatározva

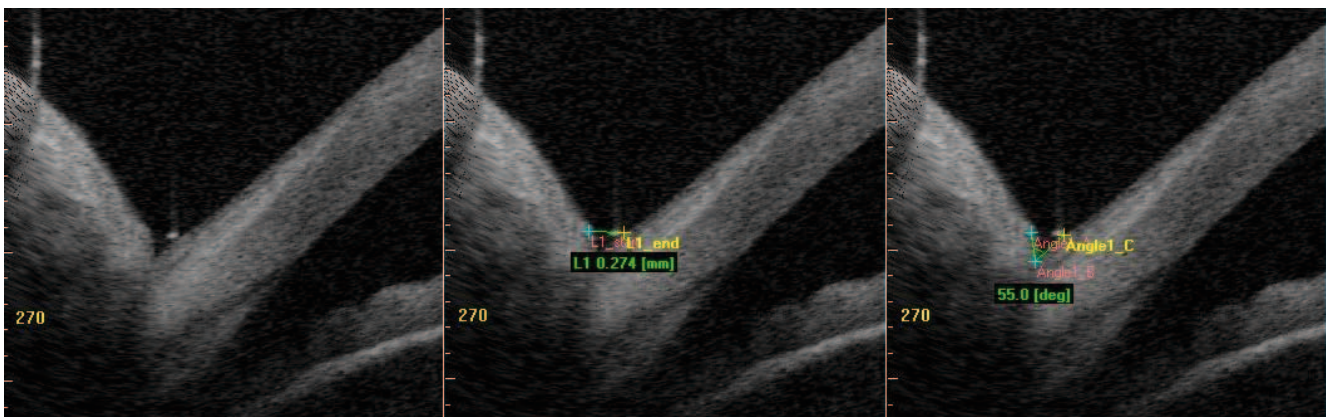
	K1†	K2†	Astigmatia†
OCT	43,24±1,41 (42,85–43,62)	44,16±1,55 (43,74–44,59)	0,93 (0,81–1,04)
Pentacam HR	43,16±1,43 (42,77–43,55)	44,10±1,61 (43,66–44,54)	0,94 (0,82–1,07)
p*	0,0002	0,002	0,90
Különbség†	0,08±0,59 (–0,08–0,24)	0,06±0,69 (–0,13–0,25)	–0,02±0,19 (–0,07–0,03)
95% LoA	–1,08–+1,23	–1,30–+1,42	–0,38–+0,35

\* Wilcoxon-teszt

† Átlag±szórás (95% megbízhatósági tartomány) (D) 95% LoA = 95% egyezési határ (limits of agreement)



5. ábra. A két tomográfal megfigyelt keratometriás értékek Bland–Altman-modell segítségével ábrázolva



6. ábra. Az OCT-vel készült képen a könnymeniscus magassága (0,274 mm), mélysége (0,21 mm) és szöge ( $\alpha=55^\circ$ ) látható

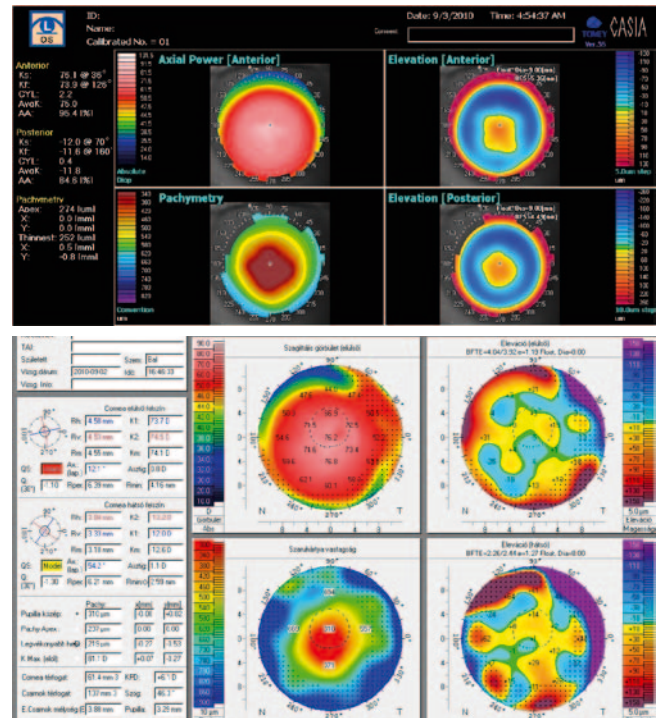
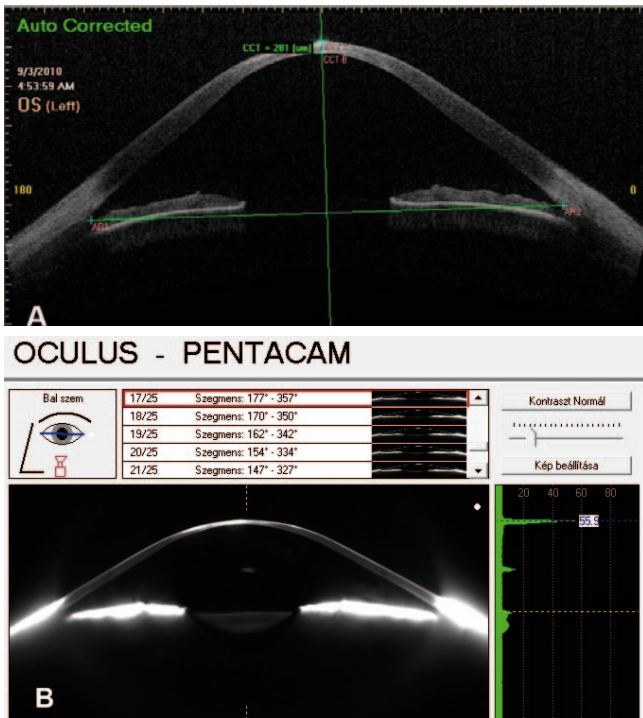
ség mindössze  $0,08 \pm 0,59$  D és  $0,06 \pm 0,69$  D volt (5. ábra). A statisztikai elemzés alapján nem találtunk különbséget a keratometriás astigmia értékei között a két tomográfal ( $p=0,90$ ), köztük az eltérést  $-0,02 \pm 0,19$  D-nak mértük.

### Megbeszélés

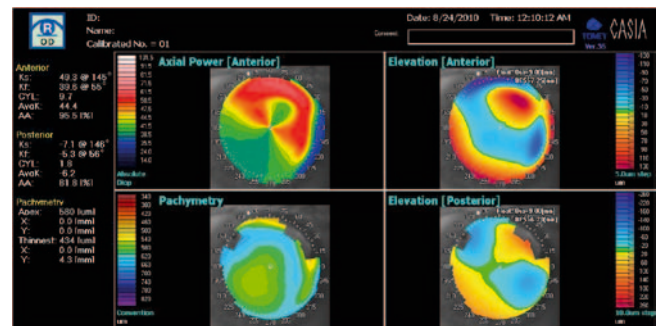
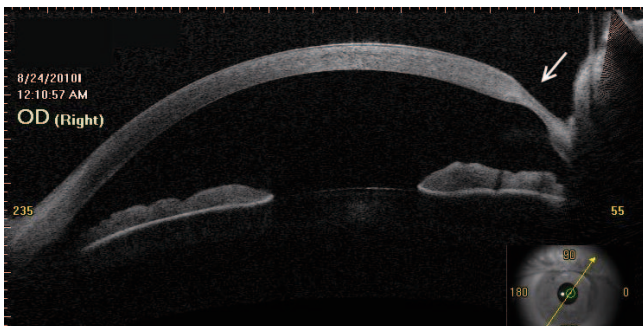
Az OCT tulajdonképpen az interferometria elvén működik, közel infravörös fényt használ a képalkotáshoz. A fény késéssel verődik vissza a különböző biológiai struktúrákról, s mint ahogyan az ultrahang, az OCT is ezt a jelenséget használja fel. A relatíve magas hullámhosszú fény biztosítja a mélyebb szöveti penetrációt. Azonban a fénynek olyan nagy a sebessége, hogy detektálásához szükség van a koherens interferometria alkalmazására. Ezen fizikai elvek felhasználásával az OCT technológia a komputertomográfiánál és a mágneses rezonancia képalkotásnál is magasabb képfelbontást biztosít.<sup>13</sup> Vizsgálatunkban a legújabb fejlesztésű hangolható lézer Fourier-domain elülső szegmentum OCT-t tanulmányoztuk. Szignifikáns különbséget figyeltünk meg az elülső szaruhártyafelszín K1- és K2-értékeiben

az OCT és a Pentacam HR között. Ez a különbség azonban a két keratometriás értéket tekintve ugyan statisztikailag szignifikáns, de csupán 0,06 és 0,08 D volt, ami azt jelenti, hogy a két készülék közt a klinikai gyakorlatban lévő különbség elhanyagolható. Az eltérés oka a két berendezés képalkotásához felhasznált fizikai törvényszerűségek különbözősége lehet. A Pentacam HR 1,45 megapixel felbontású kamerája a szem optikai tengelye körül  $180^\circ$ -os szögben körbefordulva 25, 50 vagy 100 Scheimpflug-fényképet rögzít, így több mint 138000 valódi elevációs mérőpont alkalmazásával képezi le a szaruhártya rétegeit, az elülső csarnokot és a szemlencsét.

A Fourier-domain elülső szegmentum OCT segítségével a könnyfilmtől az elülső csarnokig nagy felbontással megjeleníthetők a szegmensek képletei. A készülék alkalmas a könnymeniscus magasságának megítélésére, amely hasznos információt szolgáltat a könny mennyiségéről, a könnytermelés és könnyfolyás állapotáról, s értéke a száraz szem klasszikus tesztheivel jó korrelációt mutat.<sup>9,11</sup> Az elülső szegmentum OCT-vel továbbá lehetőség van a könnymeniscus magasságán kívül annak mélységét és szögét is meghatározni (6. ábra).



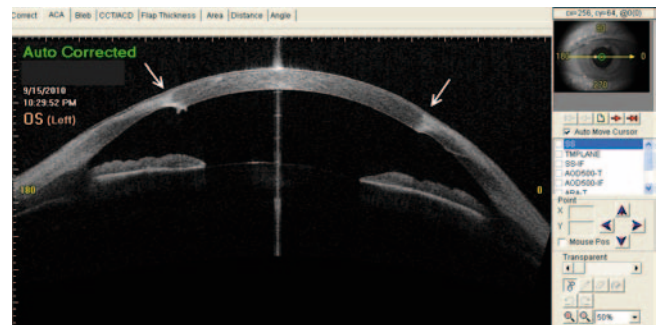
7. ábra. Előrehaladott keratoconus esete OCT-vel (A) és Pentacam HR-rel (B) (centrális cornealis vastagság=281 µm)



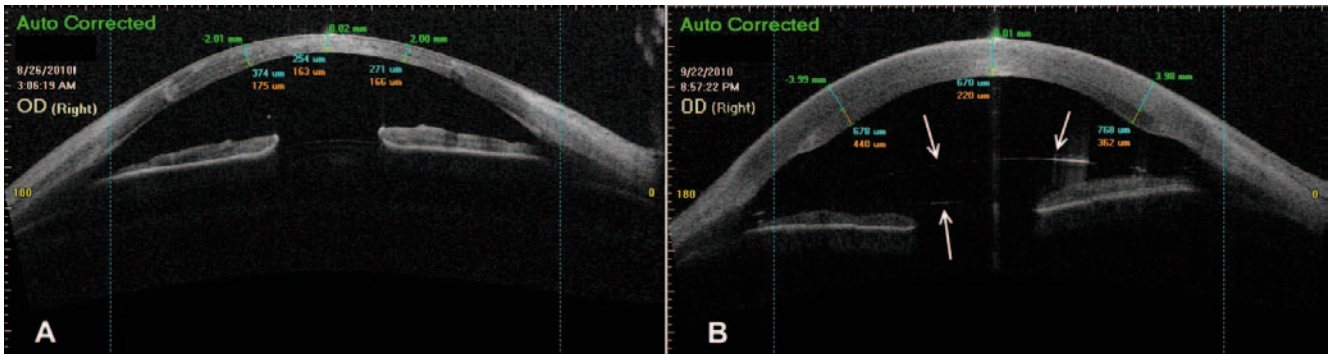
8. ábra. Terrien-betegség OCT-s felvétele

A bemutatott legújabb OCT technológia a szaruhártyának képes a legsokoldalúbb jellemzését elvégezni. A már említett törőerő-, elevációs és pachymetriás térképeken kívül műtétek után lebenyvastagságot, filtrációs párna elemzést és nem utolsósorban mikrométer felbontású, részletgazdag felvételeket készít patológiás elváltozásokról és műtét utáni állapotokról. Cornea-ectasiák esetén egyetlen non-kontakt mérésel megállapítható az elváltozás helyzete, a szaruhártya minden pontján a vastagsága, valamint a cornea törőereje mind az elülső, mind a hátsó felszínen (7. és 8. ábra). Szaruhártya-átültetést követően a kimenetelt előrejelző pachymetriás értékek, valamint a transzplantátum helyzete pontosan monitorozható, akár perforáló, akár lamelláris keratoplasztika után (9. és 10. ábra). A készülék képes cornealis dystrophiák, degenerációk, gyulladások, lezajlott szaruhártya-betegségek kimutatására, illetve segítségével a heggesedés is jól nyomon követhető (11. és 12. ábra). LASIK beavatkozás után a szaruhártya-átültetéshez hasonlóan

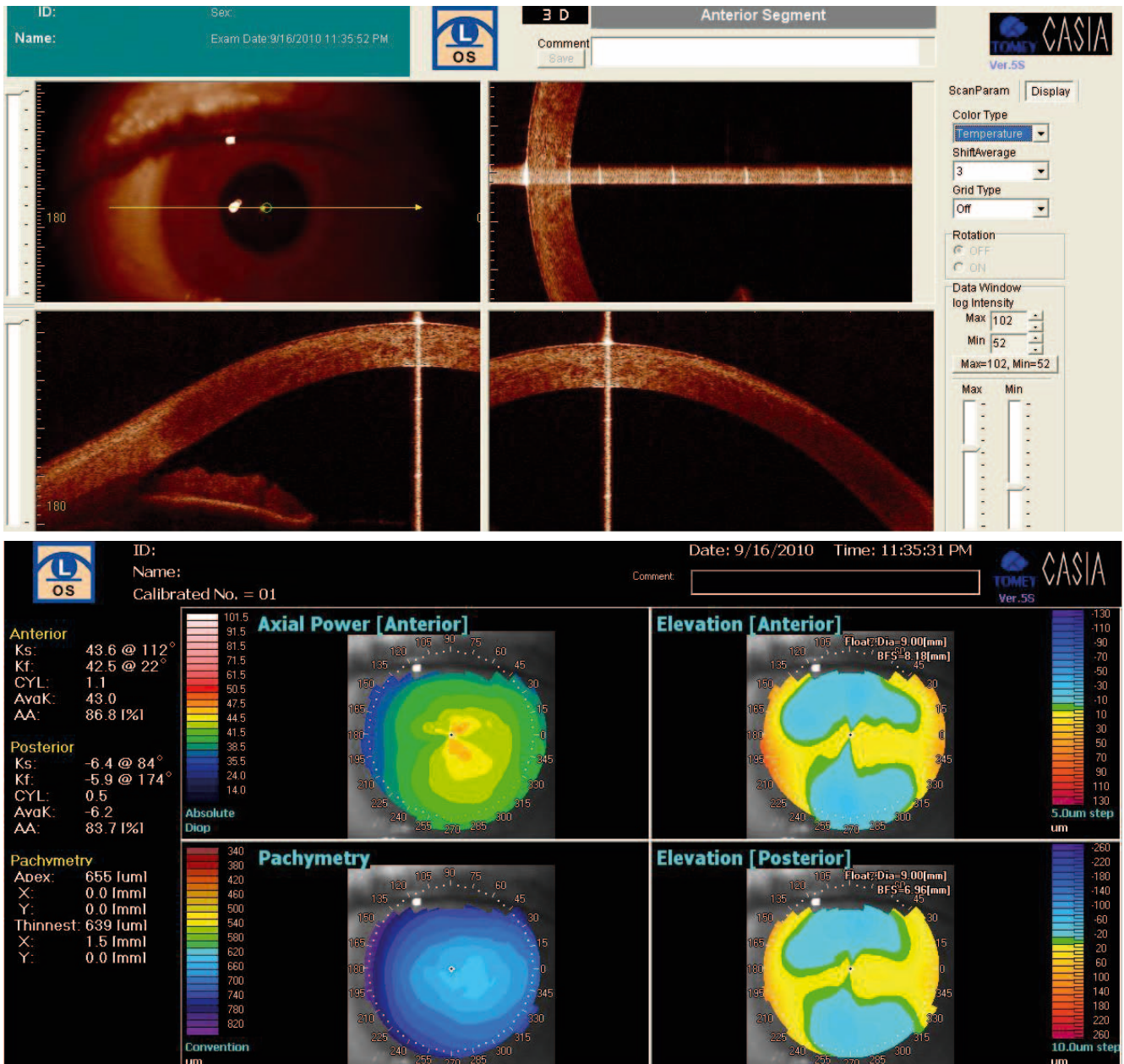
szintén mérhető a lebeny vastagsága. Kontaktlencse-viselés esetén a lencse helyzetét és illeszkedését is lehetőség van a keresztmetszeti felvétel alapján tanulmányozni.



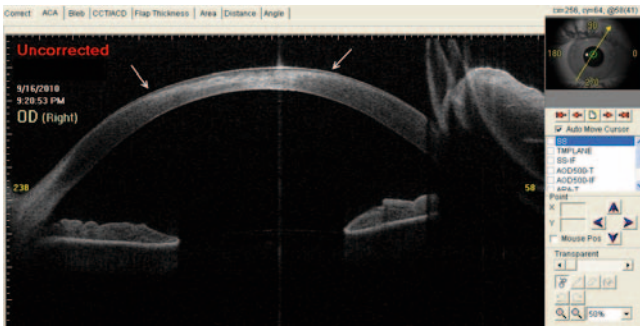
9. ábra. Perforáló keratoplasztika utáni állapot 1 évvel a műtétet követően CASIA OCT-vel. A nyilak a transzplantátum határát jelölik



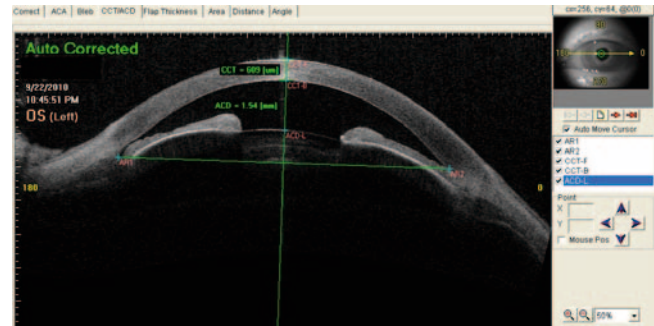
10. ábra. Elülső (A) és hátsó lamelláris keratoplasztika (B) utáni állapot lebenyvastagság-méréssel kiegészítve az OCT-vel készült felvételt. (A nyilak az elülsőcsarnok-lencse kontúrját jelölik)



11. ábra. Szaruhártya-dystrophia (Groenouw) hőmérsékleti adatok szerinti megjelenítése a CASIA készülékkel (felül) és a szoftver által készített színekódolt térképe (alul)



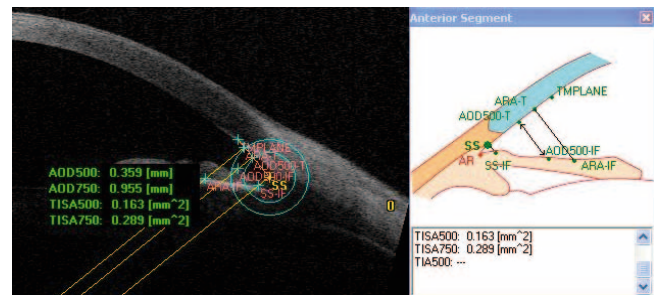
**12. ábra.** Lezajlott *Acanthamoeba*-keratitis utáni állapot OCT-s felvétele (a nyilak az elváltozás határait jelzik). Ez alapján a keratoplasztika során jól tervezhető a recipiens cornea mérete



**13. ábra.** Sekély elülső csarnokról készült 2 dimenziós felvétel elülső szegmentum OCT-vel (elülsőcsarnok-mélység=1,54 mm)

A 2 dimenziós rétegfelvételen megítélhető az elülső csarnok, és a mélységén kívül számos egyéb jellemzője megadható (3. és 13. ábra). A készülék az iridocornealis szög paramétereinek számszerű mérésére is alkalmas, úgymint a szög nyitottság távolsága 250 és 500 mm-nél (azaz a trabecularis hálózat és az iris közötti egyenes távolság a sclerasarkantyú előtt; AOD, angle opening distance), a trabecularis hálózat-irissarkantyú területe 500 és 750 mm-nél (azaz a következő képletek által határolt trapéz alakú terület: elöl az AOD, hátul az a vonal, amely a sclerasarkantyútól, merőlegesen a belső sclerafalra, szemben az irisig tart, felül a belső corneo-scleralis fal, alul pedig az iris felszíne; TISA, trabecular-iris spur area), valamint a csarnokzug területe 500 és 750 mm-nél (az a háromszög alakú terület, amelyet az alapjánál az AOD, a csúcsánál a csarnokzug, a két oldalán pedig az iris felszíne és a corneoscleralis fal határol; ARA, angle recess area) (14. ábra).<sup>8</sup> Továbbá a készülék nemcsak a szürkehályog-műtétek tervezésében nyújt segítséget, de a beavatkozás után a műlencse helyzete is igen jól megítélhető (10. ábra).

A tanulmányban bemutatott OCT készülék számos előnnyel rendelkezik akár a korábbi Fourier-domain, akár a time domain OCT rendszerekhez képest. A hangozható lézer technika ugyanis gyorsabb, mint elődei, ezzel csökkentve a betegek mozgásából adódó műtermékek zavaró hatását.<sup>4,14</sup> Ez a berendezés nemcsak magas axialis és transversalis képfelbontást engedélyez, de a szöveti penetrációja is rendkívül mély (6 mm-es mélységi, valamint 16×16 mm horizontális és verticalis irányú felvételek). Nem elhanyagolandó továbbá, hogy az 1310 nm-es hullámhossznak, ezáltal a beeső fény nagyfokú vízben való abszorpciójának köszönhetően a vizsgálatok biztonságosabbak (a retinát a fény alig 6%-a éri el), valamint mélyebb scleralis penetráció és az irido-cornealis szög struktúráinak pontosabb leképezése valósulhat meg.<sup>3,4,5</sup> További előnye a készüléknek, hogy a szintén újdonságnak számító Pentacam HR keratometriás adataival összevetve a klinikai gyakorlat szempontjából hasonló eredményeket szolgáltat. Az előnyeiből adódik a készülék legjelentősebb hátránya, a 3 dimenziós tomográfokra általánosságban is jellemző rendkívül magas ár,



**14. ábra.** A csarnokzug különböző paramétereinek automatikus meghatározása OCT-vel (rövidítések magyarázata a szövegben)

amely miatt valószínűleg nehezen terjedhetnek el a mindennapi szemészeti gyakorlatban.<sup>1,7</sup>

## Irodalom

1. Filkorn T, Nagy Z.Z.: Elülső szegmentum OCT-vel és ultrahangos pachyméterrel mért centrális corneavastagság eredményeinek összehasonlítása. Szemészet 2010; 147: 77-80.
2. Fujimoto J.G., Brezinski M.E., Tearney G.J., Boppart S.A., Bouma B., Hee M.R., Southern J.F., Swanson E.A.: Optical biopsy and imaging using optical coherence tomography. Nat Med 1995; 1: 970-972.
3. Fukuda S., Kawana K., Yasuno Y., Oshika T.: Repeatability and reproducibility of anterior ocular biometric measurements with 2-dimensional and 3-dimensional optical coherence tomography. J Cataract Refract Surg 2010; 36: 1867-1873.
4. Gora M., Karnowski K., Szkulmowski M., Kaluzny B.J., Huber R., Kowalczyk A., Wojtkowski M.: Ultra high-speed swept source OCT imaging of the anterior segment of human eye at 200 kHz with adjustable imaging range. Opt Express 2009; 17: 14880-14894.
5. Kawana K., Yasuno Y., Yatagai T., Oshika T.: High-speed, sweptsource optical coherence tomography: a 3-dimensional view of anterior chamber angle recession. Acta Ophthalmol Scand 2007; 85: 684-685.
6. Módis L., Vajas A., Tóth E., Kolozsvári B., Berta A.: Pentacam (komplett elülső szegmentum elemző készülék) Szemészet 2004; 141: 343-349.

7. Németh G., Módis L., Kolozsvári B., Vajas A., Berta A.: Elülső szegmentum optikai koherencia tomográf alkalmazása a szemészetben. *Szemészet* 2009; 146: 47-52.
8. Ramos J.L., Li Y., Huang D.: Clinical and research applications of anterior segment optical coherence tomography - a review. *Clin Experiment Ophthalmol* 2009; 37: 81-89.
9. Savini G., Barboni P., Zanini M.: Tear meniscus evaluation by optical coherence tomography. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging* 2006; 37: 112-118.
10. Szalai E., Berta A., Németh G., Kolozsvári B., Vajas A., Módis L.: A szaruhártya törőerejének vizsgálata Scheimpflug-kamerával, automata kerato-refraktométerrel és korneatopográffal. *Szemészet* 2010; 147: 3-8.
11. Wang J., Palakuru J.R., Aquavella J.V.: Correlations among upper and lower tear menisci, noninvasive tear break-up time, and the Schirmer test. *Am J Ophthalmol* 2008; 145: 795-800.
12. Wirbelauer C., Winkler J., Bastian G.O., Häberle H., Pham DT.: Histopathological correlation of corneal diseases with optical coherence tomography. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2002; 240: 727-734.
13. Yasuno Y., Madjarova V.D., Makita S., Akiba M., Morosawa A., Chong C., Sakai T., Chan K.P., Itoh M., Yatagai T.: Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for *in vivo* investigation of human anterior eye segments. *Opt Express* 2005; 13: 10652-10664.
14. Yun S.H., Tearney G., de Boer J., Bouma B.: Motion artifacts in optical coherence tomography with frequency-domain ranging. *Opt Express* 2004; 12: 2977-2998.

Levelezési cím: Dr. Szalai Eszter  
Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum, Szemészeti Klinika  
4012 Debrecen, Nagyerdei körút 98.  
E-mail: eszterszalai@aol.com