

Hüseynli S.F.

OPTİK KOHERENS TOMOQRAFIYA BİOMARKERLƏRİNİN SÜNİ İNTELLEKT ƏSASLI ÇOXPARAMETRLİ TƏHLİLİ: OPTİK NEYROPATİYADA ERKƏN STRUKTUR DƏYİŞİKLİKLƏRİN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ

Akademik Zərifə Əliyeva adına Milli Oftalmologiya Mərkəzi, Bakı, Azərbaycan

E-mail:samirahuseynli@yahoo.com

<https://www.doi.org/>

Giriş

Optik sinirin struktur zədələnmələrinin erkən mərhələdə aşkarlanması klinik oftalmologiyanın ən aktual problemlərindən biridir [1 – 3]. Optik koherens tomoqrafiya (OKT) tor qişanın və görmə sinirinin yüksək təsviri vizuallaşdırılmasını təmin edərək bu sahədə əsas diaqnostik metodlardan biri hesab olunur [4 – 5]. OKT biomarkerlərinin təhlili yalnız oftalmoloji patologiyaların deyil, eyni zamanda dağınıq skleroz, optik nevrit, Alzheimer xəstəliyi, Parkinson xəstəliyi və digər neyrodegenerativ xəstəliklərdə erkən neyroaksonal zədələnmələrin aşkarlanmasında perspektivli diaqnostik vasitə kimi qiymətləndirilir. Son dövrün bir sıra tədqiqatlarında xüsusilə peripapilyar sinir lifləri qatı (PSLQ) və qanqlion hüceyrə qatı ilə daxili pleksiform qat arasındakı qalınlıq göstəricisi (QHQ-DPQ) qatlarının incəlməsi mərkəzi sinir sistemi səviyyəsində baş verən struktur dəyişikliklərinin qeyri-invaziv biomarkeri kimi klinik əhəmiyyət daşıyır [6 – 8]. Lakin klinik praktikada bəzi hallarda klassik göstəricilər, PSLQ-nin orta qalınlığı normaya yaxın qalmasına baxmayaraq erkən struktur dəyişikliklər mövcud ola bilər [9, 10]. Son illərdə süni intellekt (Sİ) əsaslı çoxparametrlə analiz yanaşmaları OKT biomarkerlərinin kombinə olunmuş interpretasiyasına imkan yaradaraq erkən struktur dəyişikliklərin aşkarlanmasında yeni perspektivlər açır.

Məqsəd – OKT-dən əldə olunan əsas struktur biomarkerlərin Sİ əsaslı çoxparametrlə təhlili vasitəsilə normal gözlər, şübhəli/erkən struktur dəyişiklikləri olan hallar və optik neyropatiya halları arasında fərqləndirici tomoqrafik xüsusiyyətləri qiymətləndirmək.

Material və metodlar

Retrospektiv və müşahidə xarakterli tədqiqat Akademik Zərifə Əliyeva adına Milli Oftalmologiya Mərkəzində ekspertiza müayinəsindən keçən, yaşları 17-34 ($24,3 \pm 4,8$) arası dəyişən gənc oğlanlar arasında aparılmışdır. Tədqiqat materialı OKT müayinəsindən keçən 63 gözün nəticələri əsasında həyata keçirilmişdir. Hər bir xəstənin gözləri ayrıca analiz vahidi kimi qiymətləndirilmişdir.

Xəstələr klinik diaqnoza və geniş oftalmoloji müayinə nəticələrinə əsasən üç qrupa bölünmüşdür. Qrupların təsnifatı üçün əsas struktur meyarları kimi PSLQ və QHQ-DPQ göstəriciləri nəzərə alınmışdır.

- Normal qrup – klinik və OKT baxımından patoloji dəyişiklik aşkar edilməyən gözlər ($n = 23$). Bu qrupda PSLQ və QHQ-DPQ göstəriciləri cihazın normativ bazasına uyğun olaraq normal diapazonda olmuşdur (PSLQ $\geq 85 \mu\text{m}$ və QHQ-DPQ $\geq 80 \mu\text{m}$).
- Şübhəli və ya erkən struktur dəyişiklikləri olan qrup – optik sinir və tor qişa səviyyəsində ilkin struktur dəyişikliklər müşahidə edilən, lakin aşkar optik atrofiya meyarlarına cavab verməyən gözlər ($n = 7$). Bu hallarda PSLQ və ya QHQ-DPQ qatlarında normativ diapazonla müqayisədə yüngül incəlmə qeydə alınmışdır (PSLQ 75-85 μm və ya QHQ-DPQ 70-80 μm).
- Optik neyropatiya qrupu – klinik və OKT göstəricilərinə əsasən optik sinirin struktur zədələnməsi təsdiqlənmiş gözlər ($n = 33$). Bu qrupda PSLQ və/ və ya QHQ-DPQ qatlarında nəzərəçarpancaq incəlmə müşahidə edilmişdir (PSLQ $< 75 \mu\text{m}$ və/ və ya QHQ-DPQ $< 70 \mu\text{m}$).

Bütün hallarda OKT müayinələri eyni cihaz Cirrus HD-OCT 5000 (Carl Zeiss Meditec, Inc., Dublin, Kaliforniya, ABS, 7.0.1.290 proqram təminatlı) ilə həyata keçirilmişdir və standart protokollardan istifadə edilməklə aparılmışdır. Aşağı keyfiyyətli skan görüntüləri, müxtəlif artefaktlar, eləcə də ölçmələrin etibarlılığına təsir göstərə biləcək texniki problemlər olan hallar tədqiqata daxil edilməmişdir.

Görmə siniri başı və makulyar zona ayrı-ayrılıqda skan edilərək müvafiq olaraq Disc Cube 200 × 200 və Macular Cube 512 × 128 protokolları tətbiq olunmuşdur.

Optik koherens tomoqrafiya müayinəsi və təhlil edilən biomarkerlər

Disc Cube 200 × 200 protokoluna əsasən aşağıdakı göstəricilər qiymətləndirilmişdir: Orta PSLQ, PSLQ simmetriyası ölçüsü, rim sahəsi, disk sahəsi, çuxurcuq-disk nisbətini orta göstəricisi (Ç/D ratio), vertikal Ç/D nisbəti, çuxurcuq həcmi (ÇH), PSLQ-Y (yuxarı), PSLQ-A (aşağı), PSLQ-N (nazal) və PSLQ-T (temporal).

Macular Cube 512 × 128 protokoluna əsasən minimum QHQ-DPQ qalınlığı, mərkəzi subsahə qalınlığı, cube həcmi və orta kub qalınlıq parametrləri təhlil edilmişdir.

Statistik təhlil

Qruplar arasında müqayisə üçün aşağıdakı testlərdən istifadə edilmişdir ki, bu metodlar kiçik nümunə ölçüsündə etibarlı hesab olunur. Davamlı dəyişənlərin paylanması Shapiro–Wilk testi ilə qiymətləndirilmişdir. Əksər parametrlərin normal paylanma göstərməməsi səbəbindən qruplar arasında müqayisə üçün Kruskal–Wallis testi tətbiq olunmuşdur. Statistik əhəmiyyət səviyyəsi $p < 0,05$ olaraq qəbul edilmişdir. Statistik əhəmiyyət aşkar edilən parametrlər üçün “post-hoc” cüt-cüt müqayisələr Mann–Whitney U testi ilə aparılmış və Bonferroni düzəlişi tətbiq edilmişdir. Struktur və funksional göstəricilər arasındakı əlaqə Spearman korelyasiya analizi ilə qiymətləndirilmişdir.

Bu tədqiqatda OKT biomarkerlərinin kombinə olunmuş diaqnostik dəyərini qiymətləndirmək məqsədilə Sİ əsaslı çoxparametrlili analiz yanaşmasından

istifadə edilmişdir. Bu yanaşma PSLQ və QHQ-DPQ göstəricilərinin eyni vaxtda qiymətləndirilməsinə imkan vermişdir. Nümunə sayının məhdud olması nəzərə alınaraq dərin öyrənmə modeli tətbiq edilməmiş, analiz biomarkerlərin kombinə olunmuş interpretasiyasına əsaslanmışdır.

Nəticələr

Tədqiqata ümumilikdə 63 göz daxil edilmişdir: normal qrupda 23 göz, şübhəli/erkən struktur dəyişiklikləri olan qrupda 7 göz, optik neyropatiya qrupunda isə 33 göz (**cədvəl 1**). Qruplar arasında yaş göstəricisi baxımından statistik əhəmiyyətli fərq aşkar edilməmişdir ($p = 0,481$).

Görmə itiliyi normal qrupdan şübhəli qrupa və optik neyropatiya qrupuna doğru ardıcıl şəkildə azalmışdır və bu fərq statistik əhəmiyyətli olmuşdur ($p < 0,001$). Sferik ekvivalent göstəricisi üzrə qruplar arasında zəif, lakin statistik əhəmiyyətli fərq müşahidə edilmişdir ($p = 0,018$).

Peripapilyar tor qısa sinir lifləri qatının orta qalınlığı (orta PSLQ) qruplar arasında əhəmiyyətli fərqlənmişdir ($p < 0,001$). Normal qrupda PSLQ qalınlığı ən yüksək, optik neyropatiya qrupunda isə ən aşağı olmuşdur. PSLQ-nin temporal, nasal yuxarı və aşağı kvadrantları üzrə göstəricilər də qruplar arasında statistik əhəmiyyətli fərqlər göstərmişdir (müvafiq olaraq $p = 0,004$, $p < 0,001$, $p = 0,008$ və $p < 0,001$). “Post-hoc” analizlərdə normal və şübhəli qruplar arasında artıq PSLQ göstəricilərinin əhəmiyyətli dərəcədə azaldığı təsdiqlənmişdir ($p = 0,003$).

Makulyar zonada qanqlion hüceyrə qatı və daxili pleksiform qatın kombinə olunmuş qalınlıq göstəriciləri (orta və minimum QHQ+DPQ) qruplar arasında ən yüksək diskriminativ gücə malik olmuşdur (hər iki parametr üçün $p < 0,001$). Şübhəli/erkən struktur dəyişiklikləri olan qrupda QHQ+DPQ qalınlığının normal qrupa nisbətən əhəmiyyətli dərəcədə azaldığı, optik atrofiya qrupunda isə daha kəskin incəlmə müşahidə edildiyi müəyyən edilmişdir (“post-hoc” analizlərdə $p \leq 0,002$).

Optik sinir başına aid struktur parametrlər – rim sahəsi, disk sahəsi, çuxurcuğun diskə nisbətinin orta və vertikal göstəriciləri, eləcə də çuxurcuğun həcmi – qruplar arasında statistik baxımdan əhəmiyyətli fərq göstərməmişdir ($p > 0,05$).

Makulyar zonada mərkəzi tor qısa qalınlığı qruplar arasında fərqlənməmişdir ($p = 0,429$). Bununla hesablanmış makulyar həcm göstəriciləri və qalınlığın ümumi göstəricisi optik atrofiya qrupunda əhəmiyyətli dərəcədə aşağı olmuşdur ($p = 0,003$ və $p = 0,004$).

Spearman korelyasiya analizi orta PSLQ ilə orta QHQ+DPQ arasında güclü müsbət əlaqə olduğunu göstərmişdir ($\rho = 0,80$; $p < 0,001$). Eyni zamanda QHQ+DPQ göstəriciləri ilə görmə itiliyi arasında da əhəmiyyətli müsbət korelyasiya aşkar edilmişdir ($\rho \approx 0,67 - 0,68$; $p < 0,001$). Bu nəticələr struktur dəyişikliklərin funksional itkidən əvvəl meydana çıxdığını göstərir.

Cədvəl 1. Klinik və OKT parametrlərinin qruplar üzrə müqayisəsi

<i>Parametr</i>	<i>Normal (n=23)</i>	<i>Şübhəli/Erkən (n=7)</i>	<i>Optik atrofiya (n=33)</i>	<i>P</i>
Yaş (il)	25,30 ± 4,78	21,86 ± 4,30	24,24 ± 4,84	0,481
Görmə itiliyi (decimal)	0,77 ± 0,64	0,42 ± 0,30	0,21 ± 0,27	<0,001
Sferik ekvivalent (D)	-0,02 ± 1,44	-0,86 ± 1,75	-1,35 ± 1,96	0,018
Orta PSLQ (µm)	92,48 ± 10,85	76,43 ± 6,05	57,94 ± 11,63	<0,001
PSLQ simmetriya (%)	28,30 ± 44,90	80,57 ± 14,48	33,00 ± 38,41	0,002
PSLQ – temporal (µm)	63,91 ± 9,28	60,43 ± 16,60	51,58 ± 12,50	0,004
PSLQ – yuxarı (µm)	111,39 ± 18,67	95,29 ± 8,60	63,64 ± 19,06	<0,001
PSLQ – nasal (µm)	67,70 ± 14,24	59,71 ± 16,03	49,94 ± 13,46	0,008
PSLQ – aşağı (µm)	121,17 ± 18,83	90,14 ± 16,83	67,18 ± 21,69	<0,001
Rim sahəsi(mm ²)	1,48 ± 0,39	1,19 ± 0,32	1,26 ± 0,49	0,091
Disk sahəsi (mm ²)	2,25 ± 0,55	1,93 ± 0,38	2,00 ± 0,49	0,354
Orta Ç/D nisbəti	0,47 ± 0,25	0,61 ± 0,10	0,53 ± 0,26	0,443
Vertical Ç/D nisbəti	0,43 ± 0,24	0,57 ± 0,13	0,53 ± 0,24	0,406
Çuxurcuq həcmi (mm ³)	0,29 ± 0,40	0,29 ± 0,19	0,24 ± 0,32	0,309
Orta QHQ+DPQ (µm)	84,63 ± 4,72	76,57 ± 2,23	53,93 ± 11,05	<0,001
Minimum QHQ+DPQ (µm)	81,52 ± 4,83	71,71 ± 6,73	42,33 ± 15,62	<0,001
Mərkəzi makula qalınlığı (MMQ) (µm)	254,96 ± 19,67	249,57 ± 13,18	245,03 ± 21,94	0,429
Cube həcmi (mm ³)	10,03 ± 0,68	9,65 ± 0,42	8,64 ± 0,78	0,003
Orta qalınlıq kubu (µm))	274,90 ± 18,42	268,25 ± 12,04	240,58 ± 22,38	0,004

Qeyd: Qruplar arasında statistik müqayisə qeyri-parametrik Kruskal–Wallis testi ilə aparılmışdır. Statistik əhəmiyyət səviyyəsi $p < 0,05$ olaraq qəbul edilmişdir.

Yekun

Optik koherens tomoqrafiya biomarkerlərinin Sİ əsaslı çoxparametrlili təhlili optik neyropatiya və şübhəli erkən struktur dəyişikliklərinin ayırd edilməsində yüksək klinik potensiala malikdir. Xüsusilə QHQ+DPQ göstəricilərinin PSLQ dəyişikliklərindən əvvəl azalması erkən diaqnostikada bu biomarkerlərin mühüm rolunu vurğulayır. Sİ əsaslı yanaşmaların klinik praktikaya inteqrasiyası gələcəkdə erkən diaqnostika və klinik qərar dəstək sistemlərinin inkişafına əhəmiyyətli töhfə verə bilər.

Açar sözlər: optik neyropatiya, optik koherens tomoqrafiya, süni intellekt, biomarkerlər

Huseynli S.F.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED MULTIPARAMETRIC ANALYSIS OF OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY BIOMARKERS: EVALUATION OF EARLY STRUCTURAL CHANGES IN OPTIC NEUROPATHY

National Ophthalmology Centre named after Academician Zarifa Aliyeva, Baku, Azerbaijan

E-mail:samirahuseynli@yahoo.com

<https://www.doi.org/>

Introduction

Early detection of structural damage to the optic nerve remains one of the most critical challenges in clinical ophthalmology [1 – 3]. Optical coherence tomography (OCT) provides high-resolution imaging of the retina and optic nerve and is considered one of the key diagnostic tools in this field [4, 5]. Analysis of OCT biomarkers is not limited to ophthalmic diseases but is also regarded as a promising diagnostic approach for the detection of early neuroaxonal damage in multiple sclerosis, optic neuritis, Alzheimer’s disease, Parkinson’s disease, and other neurodegenerative disorders. Recent studies have emphasized that thinning of the peripapillary retinal nerve fibre layer (RNFL) and the ganglion cell layer–inner plexiform layer (GCL+IPL) represents a clinically relevant non-invasive biomarker of structural changes occurring at the level of the central nervous system [6 – 8]. However, in clinical practice, early structural alterations may be present even when conventional parameters such as average RNFL thickness remain within normal limits [9, 10]. In recent years, artificial intelligence (AI)–based multiparametric analytical approaches have enabled integrated interpretation of OCT biomarkers, opening new perspectives for the detection of early structural changes.

Purpose – to evaluate discriminative tomographic features among normal eyes, eyes with suspect or early structural changes, and eyes with optic neuropathy using an artificial intelligence–based multiparametric analysis of OCT-derived structural biomarkers.

Material and Methods

This retrospective observational study was conducted among young male subjects aged 17–34 years (mean age 24.3 ± 4.8 years) who underwent expert ophthalmologic examination at the National Ophthalmology Centre named after Academician Zarifa Aliyeva. The study material was based on OCT examination results obtained from 63 eyes. Each eye was analysed as an independent unit.

Based on clinical diagnosis and comprehensive ophthalmologic examination, the eyes were divided into three groups. Structural classification was supported

by quantitative OCT biomarkers, particularly RNFL thickness and GCL+IPL) parameters.

- Normal group – eyes with no pathological findings on clinical examination or OCT (n = 23). In this group, RNFL and GCL+IPL thickness values were within the normative range of the device (RNFL $\geq 85 \mu\text{m}$ and GCL+IPL $\geq 80 \mu\text{m}$).
- Suspect or early structural change group – eyes demonstrating mild structural alterations at the level of the optic nerve or retina that did not meet the criteria for definite optic neuropathy (n = 7). In these cases, slight thinning of RNFL or GCL+IPL layers was observed (RNFL 75–85 μm or GCL+IPL 70–80 μm).
- Optic neuropathy group – eyes with confirmed structural damage of the optic nerve based on clinical and OCT findings (n = 33). These eyes demonstrated marked thinning of RNFL and/or GCL+IPL layers (RNFL $< 75 \mu\text{m}$ and/or GCL+IPL $< 70 \mu\text{m}$).

All OCT examinations were performed using the same device, Cirrus HD-OCT 5000 (Carl Zeiss Meditec, Inc., Dublin, CA, USA; software version 7.0.1.290), following standardized acquisition protocols. Images with poor scan quality, significant artifacts, or technical issues affecting measurement reliability were excluded from the analysis.

Optical Coherence Tomography Examination and Analyzed Biomarkers

The optic nerve head and macular region were scanned separately using the Disc Cube 200 \times 200 and Macular Cube 512 \times 128 protocols, respectively.

Analyzed OCT Parameters

Based on the Disc Cube 200 \times 200 protocol, the following parameters were evaluated:

Average RNFL thickness, RNFL symmetry, rim area, disc area, average cup-to-disc (C/D) ratio, vertical C/D ratio, cup volume, and quadrant RNFL thickness values (RNFL–Superior, RNFL–Inferior, RNFL–Nasal, RNFL–Temporal).

Based on the Macular Cube 512 \times 128 protocol, the following parameters were analyzed:

Average GCL+IPL thickness, minimum GCL+IPL thickness, central subfield thickness, cube volume, and total average cube (TAC) thickness.

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using methods considered reliable for small sample sizes. Distribution of continuous variables was assessed using the Shapiro–Wilk test. As most parameters did not show normal distribution, Kruskal–Wallis test was applied for comparisons among groups. Statistical significance was set at $p < 0.05$.

For parameters showing statistical significance, post hoc pairwise comparisons were conducted using the Mann–Whitney U test with Bonferroni correction. Associations between structural and functional parameters were evaluated using Spearman correlation analysis.

Artificial intelligence–assisted multiparametric analysis was applied to evaluate the combined diagnostic contribution of multiple OCT biomarkers. This approach allowed simultaneous interpretation of RNFL and GCL+IPL parameters in order to identify structural patterns associated with optic neuropathy and early structural changes.

Results

A total of 63 eyes were included in the analysis: 23 eyes in the normal group, 7 eyes in the suspect/early structural change group, and 33 eyes in the optic neuropathy group (Table 1). No statistically significant difference in age was observed among the groups ($p = 0.481$).

Visual acuity showed a progressive decrease from the normal group to the suspect group and further to the optic neuropathy group, with statistically significant differences among groups ($p < 0.001$). A weak but statistically significant difference in spherical equivalent was also observed ($p = 0.018$).

Average RNFL thickness differed significantly among groups ($p < 0.001$), being highest in the normal group and lowest in the optic neuropathy group. RNFL thickness in the temporal, superior, nasal, and inferior quadrants also demonstrated statistically significant intergroup differences ($p = 0.004$, $p < 0.001$, $p = 0.008$, and $p < 0.001$, respectively). Post hoc analysis confirmed a significant reduction in RNFL thickness already between the normal and suspect groups ($p = 0.003$).

Macular Average and Minimum GCL+IPL thickness showed the highest discriminative power among all analyzed biomarkers (both $p < 0.001$). GCL+IPL thickness was significantly reduced in the suspect group compared to the normal group, with more pronounced thinning observed in the optic atrophy group (post hoc $p \leq 0.002$).

Optic nerve head structural parameters, including rim area, disc area, average and vertical C/D ratios and cup volume, did not demonstrate statistically significant differences among groups ($p > 0.05$).

Central macular thickness did not differ significantly among groups ($p = 0.429$). In contrast, cube volume and TAC were significantly reduced in the optic atrophy group ($p = 0.003$ and $p = 0.004$, respectively).

Spearman correlation analysis revealed a strong positive correlation between Average RNFL and Average GCL+IPL ($\rho = 0.80$; $p < 0.001$). In addition, GCL+IPL thickness showed a significant positive correlation with visual acuity ($\rho \approx 0.67$ – 0.68 ; $p < 0.001$), indicating that structural alterations precede functional impairment.

Table 1. Comparison of Clinical and OCT Parameters Among Groups

Parametr	Normal (n=23)	Şübhəli/Erkən (n=7)	Optik atrofiya (n=33)	p
Age	25.30 ± 4.78	21.86 ± 4.30	24.24 ± 4.84	0.481
Visual Acuity (decimal)	0.77 ± 0.64	0.42 ± 0.30	0.21 ± 0.27	<0.001
Spherical Equivalent (D)	-0.02 ± 1.44	-0.86 ± 1.75	-1.35 ± 1.96	0.018
Average RNFL (µm)	92.48 ± 10.85	76.43 ± 6.05	57.94 ± 11.63	<0.001
RNFL simmetriya (%)	28.30 ± 44.90	80.57 ± 14.48	33.00 ± 38.41	0.002
RNFL – Temporal (µm)	63.91 ± 9.28	60.43 ± 16.60	51.58 ± 12.50	0.004
RNFL – Superior (µm)	111.39 ± 18.67	95.29 ± 8.60	63.64 ± 19.06	<0.001
RNFL – Nasal (µm)	67.70 ± 14.24	59.71 ± 16.03	49.94 ± 13.46	0.008
RNFL – Inferior (µm)	121.17 ± 18.83	90.14 ± 16.83	67.18 ± 21.69	<0.001
Rim area (mm ²)	1.48 ± 0.39	1.19 ± 0.32	1.26 ± 0.49	0.091
Disk area (mm ²)	2.25 ± 0.55	1.93 ± 0.38	2.00 ± 0.49	0.354
Average C/D ratio	0.47 ± 0.25	0.61 ± 0.10	0.53 ± 0.26	0.443
Vertical C/D ratio	0.43 ± 0.24	0.57 ± 0.13	0.53 ± 0.24	0.406
Cup volume (mm ³)	0.29 ± 0.40	0.29 ± 0.19	0.24 ± 0.32	0.309
Average GCL+IPL (µm)	84.63 ± 4.72	76.57 ± 2.23	53.93 ± 11.05	<0.001
Minimum GCL+IPL (µm)	81.52 ± 4.83	71.71 ± 6.73	42.33 ± 15.62	<0.001
Central macular thickness (µm)	254.96 ± 19.67	249.57 ± 13.18	245.03 ± 21.94	0.429
Cube volume (mm ³)	10.03 ± 0.68	9.65 ± 0.42	8.64 ± 0.78	0.003
TAC	274.90 ± 18.42	268.25 ± 12.04	240.58 ± 22.38	0.004

Note: Parameters are presented as mean ± standard deviation. Group comparisons were performed using the nonparametric Kruskal–Wallis test; statistical significance was set at $p < 0.05$.

Conclusion

Artificial intelligence–based multiparametric analysis of OCT biomarkers demonstrate high clinical potential in differentiating optic neuropathy from suspect early structural changes. In particular, the finding that GCL+IPL parameters decrease earlier than RNFL thickness highlights their critical role in early diagnosis. Integration of AI-based analytical approaches into clinical practice may substantially contribute to the development of early diagnostic strategies and clinical decision support systems.

Keywords: optic neuropathy, optical coherence tomography, artificial intelligence, biomarkers

ƏDƏBİYYAT | REFERENCES

1. Petzold, A. *Retinal layer segmentation in multiple sclerosis: a systematic review and meta-analysis* / A.Petzold, L.J.Balcer, P.A.Calabresi [et al.] // *The Lancet Neurology*, – 2020. 19, №3, – p. 262-275. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(19\)30461-7](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(19)30461-7)
2. Saidha, S. *Optical coherence tomography reflects brain atrophy in multiple sclerosis* / S.Saidha, O.Al-Louzi, J.N.Ratchford [et al.] // *Annals of Neurology*, – 2021. 89, №3, – p. 445-458. <https://doi.org/10.1002/ana.25978>
3. Oertel, F.C. *Optical coherence tomography in neurodegenerative diseases* / F.C.Oertel, H.Zimmermann, F.Paul [et al.] // *The Lancet Neurology*, – 2021. 20, №1, – p. 68-87. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(20\)30358-9](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(20)30358-9)
4. Asanad, S. *The retina as a window to the brain: Optical coherence tomography in neurodegenerative disease* / S.Asanad, F.N.Ross-Cisneros, E.Barron [et al.] // *Survey of Ophthalmology*, – 2022. 67, №1, – p. 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2021.03.002>
5. Cheng, Y. *Macular ganglion cell–inner plexiform layer thickness as an early biomarker in optic neuropathies* / Y.Cheng, C.Shi, K.Cao [et al.] // *Ophthalmology*, – 2022. 129, №6, – p. 650-660. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2021.12.015>
6. Hou, H.W. *Diagnostic performance of macular GCIPL thickness for early optic nerve damage* / H.W.Hou, Y.S.Lee, H.C.Chen // *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, – 2023. 64, №4, – p. 18. <https://doi.org/10.1167/iovs.64.4.18>
7. Kim, K.E. *Structure–function relationship between RNFL, GCIPL thickness and visual function* / K.E.Kim, J.W.Jeoung, K.H.Park // *Journal of Glaucoma*, – 2023. 32, №2, – p. 45-53. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000002191>
8. Hood, D.C. *Structure–function relationships in glaucoma and other optic neuropathies* / D.C.Hood, C.G.De Moraes // *Progress in Retinal and Eye Research*, – 2024. 91, – p. 101123. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2023.101123>
9. Qasimov, E.M. *Optik neyropatiyaların diaqnostikasında optik koherent tomoqrafiya müayinəsinin əhəmiyyəti* / E.M.Qasimov, S.F.Hüseynli, X.D.Əliyev // *Azərbaycan Oftalmologiya Jurnalı*, – Bakı: – 2021. №39, – s. 3-13.
10. Bennett, J.L. *Optical coherence tomography in optic neuritis and neurodegeneration* / J.L.Bennett, M.Nickerson, F.Costello // *Current Opinion in Neurology*, – 2025. 38, №1, – p. 45-52. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000001217>