



Optik Aberasyonlar ve Wavefront

Optical Aberrations and Wavefront

Nihat Polat*, Esra Yelkenci Aydın**, İbrahim Tuncer***

*İnönü Üniversitesi Tıp Fakültesi, Göz Hastalıkları Anabilim Dalı, Malatya, Türkiye

**Beykoz Devlet Hastanesi, Göz Hastalıkları Kliniği, İstanbul, Türkiye

***Özel Alfa Göz Tıp Merkezi, İzmir, Türkiye

Özet

Bir optik sistemde ışığın ideal görüntü oluşturacak pozisyonundan sapmasına aberasyon (sapınç) denilmektedir. Aberasyonlar düşük sıralı aberasyonlar (defokus: sferik ve silindirik refraktif kusurlar) ve yüksek sıralı aberasyonlar (koma, sferik aberasyon, trefoil, kuadrofoil, tetrafoil, sekonder astigmatizma ve pentafoil) olarak iki alt gruba ayrılmaktadır. Aberasyonlar yaşla birlikte artmaktadır. Gençlerde kornea yüzeyi pozitif sferik aberasyonlara, lens ise negatif sferik aberasyonlara neden olarak birbirini kompanse etmekte ve böylece sferik aberasyonlar sıfırlanmaktadır. Yaşlılarda kornea yüzeyi de lens yüzeyi de pozitif sferik aberasyonlara neden olarak total aberasyon miktarında artışa neden olmaktadır. Bu yazıda son zamanlarda görsel kalite üzerindeki önemi daha çok anlaşılan optik aberasyonlar hakkındaki temel kavramları irdelemeyi amaçladık. (Turk J Ophthalmol 2014; 44: 306-11)

Anahtar Kelimeler: Aberasyon, wavefront, refraktif cerrahi

Summary

The deviation of light to create normal retinal image in the optical system is called aberration. Aberrations are divided two subgroup: low-order aberrations (defocus: spherical and cylindrical refractive errors) and high-order aberrations (coma, spherical, trefoil, tetrafoil, quadrifoil, pentafoil, secondary astigmatism). Aberrations increase with aging. Spherical aberrations are compensated by positive corneal and negative lenticular spherical aberrations in youth. Total aberrations are elevated by positive corneal and positive lenticular spherical aberrations in elderly. In this study, we aimed to analyze the basic terms regarding optic aberrations which have gained significance recently. (Turk J Ophthalmol 2014; 44: 306-11)

Key Words: Aberration, wavefront, refractive surgery

Giriş

Bir optik sistemde ışığın ideal görüntü oluşturacak pozisyonundan sapmasına aberasyon (sapınç) denilmektedir. Görsel algılamanın ilk basamağı retinal görüntü oluşumudur. Retinal görüntü oluşumunu difraksiyon, saçılma, defokus, akomodasyon ve aberasyonlar etkilemektedir.¹

Difraksiyon ışığın dalga özelliği nedeniyle oluşmaktadır ve ışığın bir diyaframdan (pupil, apertür) ya da optik ortamdan geçtiğinde kırılma ya da yansıma dışındaki eğilmesini tanımlamaktadır. Difraksiyon noktasal görüntü oluşumunu engellediğinden difraksiyonun artması görüntü kalitesini azaltmaktadır. Difraksiyon ışığın dalga boyu ile doğru orantılı, pupil çapı ile ters orantılıdır. Difraksiyonu azaltmak için pupil

çapı büyütüldüğünde aberasyonlar artmaktadır. Aberasyonlar görüntünün dağılmasına yol açarak görme keskinliğini azaltmaktadır.^{2,3}

Oküler Aberasyonlar

Paraksiyel optik veya birinci düzey optik, optik akstaki ışık ışınlarının yüksekliğinin az olduğunu varsaymaktadır ve optik sistemi aberasyonsuz kabul etmektedir. Bu ideal koşullarda sferik yüzeyler ideal görüntü oluşturmaktadır. Ancak gerçek hayatta insan gözü gibi optik ortamlar ideal değildir ve optik özellikleri paraksiyel kuralların dışında kalmaktadır. Paraksiyel optiğin tanımladığı ideal durumdan sapmalar yüksek sıralı aberasyonlar olarak adlandırılmaktadır.

Oküler aberasyonlar 2 ana tipe ayrılmaktadır:⁴

a) **Kromatik aberasyonlar**

b) **Monokromatik aberasyonlar**

a) Kromatik aberasyonlar: Kromatik aberasyonlar gözün optik elemanlarının ışığı ayırıştırması sonucu oluşan kusurlardır. Bunun iyi bilinen örneği beyaz ışığı eşit açılardaki ışık demetlerine ayıran cam prizmadır. Her ortamın refraktif indeksi ışığın dalga boyuna göre değişiklik gösterdiğinden insan gözündeki kromatik aberasyonlar her dalga boyu için farklı odak noktasında konumlanmaktadır. Kromatik aberasyonlar ideal görüntüden hareket eden ışınların dağılımına karşılık gelmektedir ve sadece polikromatik ışıktaki görülmektedir. Retinal görüntü kontrastında azalmaya yol açan polikromatik aberasyonları düzeltmek pratik bir çözüm olarak kabul edilmemektedir. Refraktif cerrahi teknikleri kromatik aberasyonları düzeltememektedir çünkü bu kusurların oküler materyalin optik özellikleri ile ilişkili olduğu ve göz komponentlerinin optik şeklinden bağımsız olduğu belirtilmiştir.^{4,5}

b) Monokromatik aberasyonlar: Monokromatik aberasyonlar spesifik dalga boyundaki görünür ışık ile ilişkilendirilmektedir. Düşük sıralı aberasyonlar (defokus: sferik refraktif kusurlar, astigmatizma: silindirik refraktif kusurlar) ve yüksek sıralı aberasyonlar (koma, sferik aberasyon, trefoil, kuadrofoil, tetrafoil, sekonder astigmatizma ve pentafoil) olarak iki alt gruba ayrılmaktadır. Kromatik aberasyonlar düzeltilmeksizin tek başına monokromatik aberasyonlar düzeltildiğinde bile görme kalitesinde iyileşme sağlanmaktadır. Düşük sıralı aberasyonlar gözlük camları, kontakt lensler ve refraktif cerrahi ile düzeltilebilmektedir. Genellikle bu aberasyonlar ortalama wavefront kusurunun yaklaşık %85'ini oluşturmaktadır. Koma, sferik aberasyonlar ve diğer yüksek sıralı aberasyonlar sağlıklı gözlerin görmesini retinal limitlerin altına indiren refraktif çarpıtmalardır. Normal gözlerde yüksek sıralı aberasyonlar ortalama wavefront kusurunun yaklaşık %15'ine karşılık gelmektedir.^{4,5}

Wavefront

Wavefront Teknolojisi

Wavefront teknolojisi astrofizik kökene dayandırılmaktadır. Astronomlar teleskopları ile elde ettikleri görüntüleri mükemmel hale getirmek için bu teknolojiye yararlanmaktadır. Astrofizikçiler galaksiden teleskopik lens sistemlerine giren yüksek sıralı aberasyonları ve wavefront distorsiyonlarını mükemmel hale getirmek için 'adaptif optikler' adında bir ayna sistemi kullanmaktadır.⁶

Wavefront (Öncül Dalga)

Dalgalar frekans ve yayılım hızları ile tanımlanmaktadır. Monokromatik ışık dalgasının dalga boyu bu iki parametreye bağımlı olarak değişmektedir. Dalga boyu frekans ve hızın çarpımı ile elde edilmektedir. Görünür ışığın dalga boyu 400 ile 700 nm arasında konumlanmıştır. Öncül dalga suya düşen taşın etrafında oluşturduğu dairesel dalgalar gibi bir etki noktasından çevreye yayılmaktadır. Homojen bir ortamda bir monokromatik ışık kaynağı her yöne sabit hızda yayılan öncül

dalgalar üretmektedir. Uzayda her hangi bir anda bir ışık kaynağından eşit uzaklıktaki noktaların aynı elektromanyetik değere sahip olduğu belirtilmektedir. Wavefront bu noktaların birleşimi sonucu oluşmaktadır ve ideal durumda sferik olarak tanımlanmaktadır.⁴

Wavefront Yayılımı

Öncül dalganın boşluktaki yayılım hızı 'c' ile tanımlanmaktadır. Düzlemsel wavefront aynı düzlemdeki eğri olmayan (konveks veya konkav olmayan) lenste kırılmaya uğrarsa lensin kırılma indeksine bağlı olarak yavaşlamaktadır. Frekans değişmediği için lens içinde dalga boyu azalmaktadır. Lensin düzlemi wavefront eğrisinin düzlemine paralel olduğu için faz değişikliği görülmemekte ve lensten çıkan öncül dalganın şekli değişmeden kalmaktadır. Lensin düzlemi o anki öncül dalganın düzlemine paralel değil ise wavefront da deviasyon oluşmakta fakat şekil değişikliği meydana gelmemektedir. Lensin eğri pozisyonundan dolayı dalganın bir bölümünün hızı yavaşlamakta diğer bölümünün hızı ise değişmeden kalmaktadır. Bu durum tüm öncül dalganın pozisyon değiştirmesine yol açmaktadır. Düzlemsel wavefront konveks lensten geçerken optik yol lensin farklı bölgelerindeki her ışın için farklı olacaktır. Lensin merkezinden geçen ışınların optik yolu daha uzun olduğundan wavefront fazının orta kısmı kenarlarına göre relatif olarak geride kalmaktadır. Bu öncül dalganın birbirine yaklaşmasına neden olmaktadır. İdeal konveks lensten geçen düz wavefront sferik şekil almakta ve böylece öncül dalgaya dikey tüm ışık ışınları aynı noktada toplanmaktadır. Wavefronttaki bükülme en öndeki nokta ile ilişkili faz gecikmesi dağılımı ile açıklanmaktadır. Homojen ortamdan çıkarken dalga boyu uzun olanlar kısa olanlara göre daha geride kalmaktadır, optik yoldaki bu farkın mikron düzeyinde olduğu ifade edilmiştir.⁴

Işık uzayda yol alırken bir doğru boyunca yayılmaktadır. Bir ışık demetinde de çok sayıda ışık hüzmelerinin var olduğunu düşünebiliriz. Bu ışık hüzmeleri optik olarak problemsiz bir göze geldiğinde bu üç boyutlu yapı içinde koni şeklinde kırılarak retinada bir noktada odaklanmaktadır. Bu yolun tam tersi düşünülürse retinadaki bir noktadan yansıyan ışığın aynı şekilde birbirine paralel olarak yayılması beklenmektedir. Bu yansıyan ışınların her birinin bir düzlem üzerinde birbirine eşit uzaklıkta ve netlikte görüntüsü oluşmaktadır ve elde edilen görüntülerin hepsine wavefront denilmektedir. Tüm noktalar birbirine eşit uzaklıkta ve netlikte ise bu haldeki görüntü 'mükemmel wavefront' olarak adlandırılmaktadır. Kusursuz gözün wavefrontu herhangi bir kırılma kusuru olmayan emetrop bir gözdeki gibi görme hattına dik olan düz bir plan olarak görülmektedir. Miyopik gözlerde kaseye benzer yani periferik wavefront santral wavefronttan daha ileride, hipermetropik gözlerde ise tepe şeklinde tanımlanmaktadır. Düzensiz astigmatizma veya yüksek sıralı sapmaları olan gözlerde wavefront düzensiz şekillerde olmaktadır. Bu dalgaların her bir kornea bölgesi için yapılan ölçümlerine wavefront ölçümler denilmektedir.⁷

Wavefront Ölçümü

Wavefront ölçümler gözün önüne çeşitli yapay mercekler konarak yapılmaktadır. Bu ölçümlerin hepsine aberometri (wavefront analizi), ölçümleri yapan aletlere aberometre (wavefront analizörü) denilmektedir. Gözde wavefront analizinin amacı wavefront sapmaları değerlendirerek gözün optik kalitesini saptamaktır. Son yıllarda aberasyon kavramının oftalmik pratiğe girmesi ile yalnız sferik ve silindirik refraksiyon kusurları değil, ayrıca gözde var olan ve aberasyona neden olan yüksek sıralı refraksiyon kusurları da düzeltilmeye çalışılmaktadır. Dalga aberasyonlarını ölçmenin çok kullanılan iki yöntemi vardır. Birinci yöntemde ölçülmek istenen wavefront ideal referans wavefrontu ile karşılaştırılarak referanstan sapmalar hesaplanmaktadır. İnterferometrik teknikler kullanılarak gerçekleştirilen bu yöntemle optik yüzeyler ya da yüksek enerjili lazerler test edilmektedir. İkinci yöntemde wavefront düzlemi boyunca çok sayıda noktada lokalize eğrilik ölçülerek wavefront yeniden oluşturulmaktadır. Elemanlarına ayrılabilmesi için çok sayıda matematiksel fonksiyon bulunmaktadır.

Zernike polinomları yuvarlak apertürlerde en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Zernike polinomları iki numara ile sınıflandırılmaktadır. Birinci parametre n ile ifade edilmekte ve polinomun radyal dağılımındaki sıralanmasını göstermektedir. Sıra sayısı büyüdükçe ana özellikler daha periferde doğru yer değiştirmektedir. İkinci parametre m ile ifade edilmekte ve polinomun rotasyonel simetrisini göstermektedir. Wavefront aberasyonlarının Zernike polinomları ile ifade edilmesi gözün optik özelliklerinin tanımlanmasında sferik ve silindirik kusurlar gibi klasik tanımlara göre daha detaylı bilgi vermektedir. Birinci sıra Zernike polinomları tip ve tilt olarak adlandırılmakta ve genellikle gözün optik ekseninin eğrilmesine (başın hafif dönmesi gibi) bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. İkinci sırada klasik refraksiyon kusurları olan sferik ve silindirik refraksiyon kusurları yer almaktadır. Üçüncü sıra ve daha yüksek sıralı Zernike polinomları ise yüksek sıralı aberasyonları tanımlamaktadır. Bu aberasyonlar gözün optik sisteminin optik hatalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır.⁸

Günümüzde oküler aberasyonları ölçmek için çok sayıda farklı teknoloji kullanan aberometre tipleri bulunmaktadır. Aberometreler aberasyonları ölçmekte kullandıkları yöntemlere göre sınıflandırılabilir.

- a) Çıkış wavefrontu ölçen cihazlar
 - Alcon Summit wavefront algılayıcısı
 - Visx 20/10 Perfect Vision Wavescan wavefront Analyzer
 - Baush&lomb Zyoptik System
 - Aesculap meditec WASCA
- b) Retinal Görüntüleme Aberometreleri (Tscherning prensibi)
 - Wavelight wavefront analyzer
 - Tracy Retinal Ray Tracing
 - ORK Wavefront (SCHWIND eye-tech-solutions)
- c) Oküler aberasyonu nötralize etmek için gerekli giriş wavefrontu ölçen cihazlar (Scheiner prensibi)
 - Emory Vision Spatially Resolved Refractometry

- Nidek Slit Sciascope (OPD-SCAN)

Wavefront ölçümlerinde son teknikler aslında Scheiner'in 17. yüzyılda gösterdiği prensiplere dayanmaktadır ve Smirnov tarafından 1961 yılında sübjektif ayarlanabilen refraktometre olarak ortaya atılmıştır. Bu yöntemde periferde gelen ışın demeti periferel noktadaki oküler aberasyonu nötralize etmek için sübjektif olarak merkezi hedefe doğru yönlendirilmektedir. Bu yöntemin retinayı spesifik aks ve doğrultuda hızlı bir şekilde tarayan objektif varyantı slit retinoskopi prensibine dayanmaktadır. Retinoskop refleksi sistem tarafından objektif olarak yakalanmaktadır. Hiçbir oküler cerrahi geçirmemiş gözde oküler aberasyonların yarısı kornea yarısı da lens kaynaklı olarak kabul edilmektedir. Aberasyonlar pupil çapı ve pozisyon değişikliklerinden de etkilenmektedir. Sferik aberasyonlar korneanın ön yüzeyi, lensin ön ve arka yüzeyinden kaynaklanmaktadır. Aberasyonlar yaşla birlikte değişebilmektedir. Genç bireylerde kornea yüzeyi pozitif sferik aberasyona, lens ise negatif sferik aberasyona neden olarak birbirini kompanse etmekte ve böylece sferik aberasyonlar sıfırlanmaktadır. Yaşlılarda hem kornea yüzeyi hemde lens yüzeyi pozitif sferik aberasyona neden olarak total aberasyon miktarında artışa neden olmaktadır.⁹

Hartman-Shack aberometresinde temel prensip olarak küçük bir yapay açıklıktan paralel gönderilebilen bir ışık demeti (genellikle Nd:YAG 532 nm, laser ışığı) kullanılmaktadır. Bu ışık retinanın küçük (1x1 mm veya daha küçük) bir alanına düşürülerek oradaki netliğin durumu ve netliği bozan faktörler $\pm 2 \mu\text{m}$ duyarlılıkla saptanmaktadır. Ölçümde geri yansıyan ışığın düz bir plan (harita) oluşturması beklenmektedir. Bu durum 'mükemmel wavefront' olarak adlandırılmaktadır. Bu wavefront mikroaynalar ve video kameradan oluşan 'wavefront alıcısı' ile saptanmaktadır (Şekil 1).

Her bir aberasyon ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar renkli şekiller olarak da ifade edilebilir. Bunların hepsi Zernike polinomu şeklinde de gösterilebilir (Şekil 2). Bunun sonucunda ortaya çıkan aberasyonlar temel olarak 2 grupta toplanmaktadır: Düşük ve yüksek sıralı aberasyonlar.

1) Düşük sıralı (0. 1. ve 2. sıralı) sapmalar: Prizmatik, sferik, silindirik sapmalardır. Gözlükle düzeltilebilirler.

2) Yüksek sıralı (3. ve daha fazla sıralı) sapmalar: Refraksiyon cerrahisinde hesaplanan ve refraktif düzeltmeler için referans kabul edilen aberasyonlardır.

Bu aberasyonlar da kendi içinde düz sıralı (simetrik) ve düzgün olmayan sıralı (asimetrik) olarak ayrılmaktadırlar.⁷

Öncül Dalganın Zernike Polinomlarına Ayrıştırılmasının Prensipleri

Bir optik sistemden kaynaklanan optik aberasyonları ayrıştırmak ve tanımlamak için Zernike polinomları denen bir matematik açılım kullanılmaktadır. Bu aberasyonlar sferik ve silindirik olanları kapsamakta ancak aynı zamanda Zernike analizi ile yüksek sıralı aberasyonlar da tanımlanmaktadır. Bu konsept Fourier ayrışımından köken almaktadır ancak basit bir sinüs/cosinüs fonksiyonu kullanımından farklı olarak Zernike fonksiyonuna dayanmaktadır. Bu fonksiyonlar genellikle bir piramiti temsil etmektedirler. İlk Zernike polinomlarının fiziksel pratik yorumları vardır çünkü klasik optik aberasyonlara uymaktadır. Her Zernike fonksiyonu bir polinomun veya bir

cosinüs veya sinüs fonksiyonunun ürünüdür. Ayırıştırma kullanılacak polinomların sayısı wavefront analiz sistemi tarafından belirlenen en yüksek dereceye dayanmaktadır. Ayırıştırmanın esas amacı her polinom için katsayıların değerinin ayrıca belirlenmesidir. Bilgisayarlı matris ölçümleri ile ölçülen anlık wavefront ile Zernike polinomlarının toplamı arasındaki fark en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Her Zernike terimine verilen katsayı RMS (root mean square) öncül dalganın total standart deviasyona katılımına karşılık gelmektedir. Ölçülen öncül dalganın Zernike polinomlarına ayrıştırılması yaklaşık bir değer vermektedir. Verilen bir polinomun direkt RMS katsayı değeri direkt olarak görme kalitesini yansıtmamaktadır.⁴

Hartman-Shack sistemi ile elde edilen ideal wavefrontun düz olduğu kabul edilirse aberasyonlar düzlemdeki tümsekler olarak ifade edilebilir (Şekil 3). Zernike fonksiyonlarının tümü geometriktir ve her fonksiyon RMS wavefront kusuru katsayısı ile birlikte verilmektedir. Sonuç olarak Zernike açılımı uygun bir hesaplama şeması sağlamaktadır. Total RMS wavefront aberasyon haritasının Zernike spektrumundaki katsayıların tek tek karelerinin toplamının kareköküne eşittir. Bu katsayılar tek tek radyal düzende n sayısı ile belirtilerek listelenebilirler.⁴

*n=0 aberasyonlar: Görüntüde distorsiyona yol açmayan sabit faz kaymalarıdır.

*n=1 aberasyonlar: Kaymaya karşılık gelmektedir. Tilt prizmatik bir kusur olarak ifade edilmektedir. İdeal wavefrontun şeklini bozmamaktadır ancak orjinal pozisyonundan kaymasına neden olmaktadır. Oküler yapıların açılanmasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

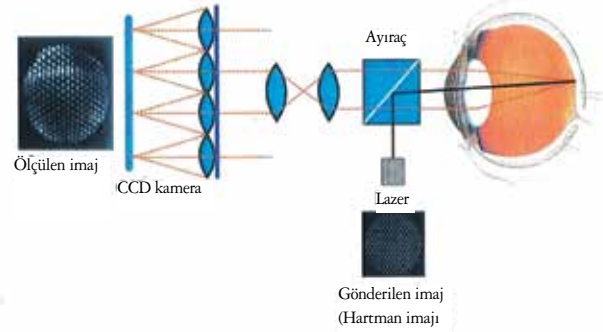
*n=2 aberasyonlar: Defokus ve astigmatizmaya karşılık gelmektedir. Defokus ideal düz wavefrontta parabolik distorsiyona yol açmaktadır. İkinci derece astigmatizma parabolik distorsiyonun simetrik akstaki varyasyonlarıdır. İkinci derece astigmatizmaya karşılık gelen bu selektif polinomların tespiti astigmatizmanın hem büyüklüğünün hem de aksının belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

*n=3 aberasyonlar: Üçüncü düzey sıralı aberasyonlara karşılık gelen polinomlar Zernike sınıflamasında koma aberasyonlar ve trefoil aberasyonlardır. Gözün refraktif özelliğindeki asimetriyi yansıtmaktadırlar. Tüm gözlerin anatomik yapısında üçüncü düzey aberasyonlara neden olacak ortak bir özellik gösterilememiştir. Sıklıkla LASİK veya PRK sonrasında bu aberasyonlarda artış görülmektedir.

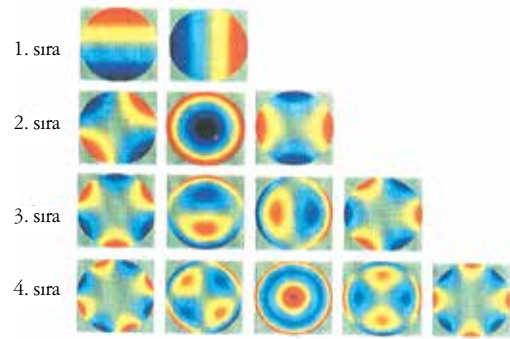
*n=4 aberasyonlar: Sferik aberasyonlar pupil açıklığının periferinden giren ışınlarla santral pupiller alanda lokalize ışınların odaklanması arasındaki farka karşılık gelmektedir.⁴

n=4 aberasyonlar wavefront yüzeyinde deformasyona yol açan sistematize edilemeyen optik aberasyonların varlığını temsil etmektedir. Oranları genellikle düşük olarak saptanmaktadır.⁴

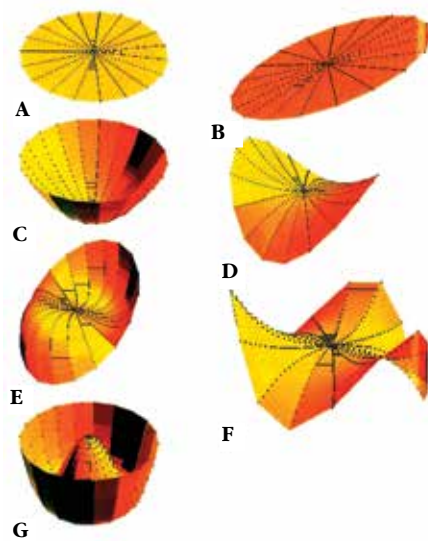
Salmon ve ark.¹⁰ on farklı laboratuvarın Hartmann Shack aberometre verilerini (1433 hastanın 2560 gözü) kullanarak normal, sağlıklı erişkin gözlerin yüksek düzey aberasyonlarını yayınlamışlardır. Altı mm pupil çapı için coma, sferik, trefoil aberasyon ortalama RMS değerleri sırasıyla 0,14 μm , 0,13 μm ve 0,11 μm olarak bildirilmiştir. Bu değerler referans olarak kullanılabilir.



Şekil 1. Hartman-Shack ve öncül dalga analizörü.⁷



Şekil 2. Zernike polinomlarının grafik görünümü.⁴



Şekil 3. A) Piston B) tilt aberasyon C) Defokus aberasyon D) silindirik: defokus silindirik E) koma aberasyon F) Trefoil aberasyon (triangular astigmatizma) G) sferik aberasyon.⁴

Yüksek Sıralı Aberasyonların Görme Keskinliği ve Semptomlarla Korelasyonu

Üçüncü ve beşinci sıralar arasındaki aberasyonlar tüm aberasyonların %7'sini oluşturmaktadır. Yüksek sıralı aberasyonların görme üzerine etkisi sıra arttıkça azalmaktadır.

İstisna olarak sferik aberasyon 4. sıralı olmasına rağmen en sık karşılaşılan aberasyondur ve pupil çapının 4. üssü olarak artmaktadır. Zernike piramidinde merkeze daha yakın aberasyonlar (ör. koma ve sferik aberasyon gibi) kenara daha yakın olanlara göre (ör. trefoil, tetrafoil gibi) görme kalitesini daha fazla etkilemektedir. Bazı yüksek sıralı aberasyonlar birlikte olduklarında görme kalitesine olan olumsuz etkileri azalabilir (ör. sferik aberasyon ve defokus birlikteliği gibi).¹¹ Zernike katsayısına bakılarak yapılan değerlendirmelerde görme keskinliği ve kalitesi üzerine etkili iki esas sapmanın sferik ve koma aberasyonlar olduğu görülmüştür.⁵ Koma üçüncü sıralı bir aberasyondur. Aynı meridyende hipermetropik alanın komşuluğundaki miyopik alanı temsil etmektedir. İsmi bu aberasyonun yarattığı virgül şeklindeki paternden kaynaklanmaktadır. Zernike komponentleri incelendiğinde koma vertikal veya horizontal şekilli olabilmektedir. Çift görme şikayeti belirgin olarak horizontal koma ile ilişkilendirilmiştir. Sferik aberasyon pupillanın santralinden ölçülen radyal mesafeye bağlı olarak varyasyon gösteren dördüncü sıralı bir aberasyondur. Bir optik sistem pupilla santralinde refraktif kusur barındırmazken pupil merkezini çevreleyen dairesel zonlarda kusur artabilir. Sonuç görüntü küçük pupil çapı için keskin iken pupil genişledikçe bozulmaktadır. Sferik aberasyonlar pozitif veya negatif olabilir. Normal gözlerde genellikle düşük miktarda pozitif sferik aberasyon bulunmaktadır. Pozitif sferik aberasyon santralde hızlanmış alan (hipermetropik odak) ve bunu çevreleyen gecikmiş bir ışık halkası (miyopik daire) içermektedir. Normal popülasyonun küçük bir bölümünde negatif sferik aberasyon bulunabilir. Negatif sferik aberasyon santralde geri kalmış alan ve bunu çevreleyen hızlanmış ışık halkası içermektedir. Sferik aberasyon cisimlerin etrafında halo görme şikayeti ile kendini gösterebilmektedir.⁵

Sferik aberasyonların kontrast duyarlılığı, görme keskinliği ve derinlik hissi için çok önemli olduğu saptanmıştır. Sferik aberasyonlar artarsa hastanın gece görüşü ve özellikle kontrast duyarlılığının azaldığı, glare ve halo şikayetlerinin arttığı belirtilmiştir. Komanın kontrast duyarlılığı, görme keskinliği ve akomodasyon üzerinde etkili ikinci en önemli aberasyon olduğu kabul edilmektedir.¹²

Tzelikis ve ark.¹³ sferik aberasyon azalışının kontrast duyarlılığı ve görme keskinliğini arttırdığını belirtmişlerdir.

Katarakt cerrahisinin optik sonuçları iyi retinal görüntü oluşumu üzerine etkili iki ana faktöre bağlı olup bunlar gözün aberasyonları ve intraoküler lensin indüklediği aberasyonlardır. İnsizyon çapı cerrahinin indüklediği optik aberasyonlar üzerine çok etkilidir ve küçük insizyon daha az aberasyon ve daha iyi görme kalitesi sağlamaktadır.^{14,15}

İntraoküler lense bağlı yüksek düzey aberasyonların artışı retinal görüntü kalitesinde düşüşe neden olmaktadır. İntraoküler lens gözün bütün aberasyonlarını modifiye edebilir. Silikon veya PMMA lens ile karşılaştırıldığında akrilik intraoküler lens takılan hastalarda istatistiksel olarak anlamlı şekilde aberasyonlar düşük olarak saptanmıştır. Kesin mekanizma ise bilinmemektedir.¹⁶

Sferik monofokal intraoküler lens takılmış hastalarda gözün

yüksek düzey wavefront aberasyonlarının görme fonksiyonları üzerinde önemli derecede etkili olduğu belirtilmiştir. Farklı intraoküler lens tiplerinde farklı yüksek sıralı aberasyonlar oluşabilmektedir.¹⁷

Farklı intraoküler lens tasarım ve materyalleri farklı miktar ve şekillerde wavefront aberasyonları etkileyebilmektedir. Belucci ve ark.¹⁸ farklı intraoküler lens tiplerinin koma aberasyonlar üzerindeki etkisinin anlamlı olarak farklı olmadığını ancak sferik aberasyonların çok önemli derecede lens tiplerinden etkilendiğini vurgulamıştır.

Düşük sıralı aberasyonlar laserle görme düzeltilmesi sonrası azalırken, miyopi için konvansiyonel PRK ve LASİK işlemini takiben özellikle sferik aberasyon ve koma gibi yüksek sıralı aberasyonlar artabilir. Bu artış operasyon öncesi miyopi derecesiyle ilişkilidir. Standart hipermetropik laser tedavisinden sonra yüksek sıralı aberasyonlar miyopide olduğundan daha fazla ama tam ters yönde (negatif değerlere doğru) artış göstermektedir. Kişiyi özel ekzimer laser tedavisi konvansiyonel laser tedavisiyle kıyaslandığında neden olunan yüksek sıralı aberasyon sayısını azaltılabilir ve özellikle mezopik koşullarda daha iyi bir görme sağlanabilir.¹⁹

Wavefront rehberli laser ablasyonlarda bir wavefront duyarlı aberometreden sağlanan bilgi laser ablasyonun programlanması için elektronik olarak tedaviyi yapacak lasere aktarılır. Wavefront rehberli laserle hem düşük sıralı hemde yüksek sıralı aberasyonlar tedavi edilmeye çalışılmaktadır. Wavefront rehberli laserler, sonuçta istenen kornea şekline ulaşmak adına aberasyonları düzeltmek için kornea üzerine kompleks ablasyon paternleri uygulamaktadırlar. Genel olarak wavefront teknolojisi ile tedavi edilen gözlerde konvansiyonel tedavilerle kıyaslandığında daha az yüksek düzey aberasyona neden olduğu (her iki grupta da operasyon sonrası yüksek düzey aberasyon artışı vardır) ancak snellen görme düzeyi parametrelerinin benzer olduğu bulunmuştur.^{20,21}

Görsel semptomların yüksek sıralı aberasyonlar ile ilişkisi pupil çapı arttıkça belirginleşmektedir. Şikayeti olan hastalara wavefront ölçümünün skotopik pupil çapında uygulanması önerilmektedir.⁵

Patel ve ark.²² Fuchs' distrofilisi hastalarda kontrol grubuna göre Descemet's soymalı endotelial keratoplasti sonrası yüksek sıralı aberasyonların yüksek olduğunu ve iki yıl boyunca yüksek kalmaya devam ettiğini gözlemlemiştir.

Greenstein ve ark.²³ keratokonus ve korneal ektazili hastalarda korneal ve oküler yüksek sıralı aberasyonların cross linking sonrası azaldığını saptamış ve bunun kornea şeklinin düzeltilmesinin göstergesi olduğunu vurgulamışlardır.

Sonuç olarak katarakt ve refraktif cerrahide mükemmelliğin sağlanması için optik aberasyonların önemi aşikar hale gelmiştir. Anatomik ve fizyolojik olarak mükemmellik beklentisi artan hastalara cevap verebilmek için optik aberasyonlar daha ciddi araştırma konusu haline gelmiştir.

Kaynaklar

1. Applegate RA. Glenn Fry award lecture 2002: Wavefront sensing, ideal corrections and visual performance. *Optom Vis Sci.* 2004;81:167-77.

2. Kaya V. Wavefront ve topoğrafi temelli lazer.(1.baskı) İstanbul. Epsilon Yayıncılık. 2005;97-116.
3. Applegate R, Hilmantel G, Thibos L: Assesment of visual performance (chapter7). In:Kruger R, Applegate RA,Macrae S.,editors.Wavefront customized visual correction:the quest for super vision.2nd ed. New Jersey Slack, Inc.:2004;65-76.
4. Azar DT. Wavefront Analysis. In Gatinel D, Hoang-Xuan T eds. Refractive Surgery. Second Edition. Philadelphia:Mosby, 2007;117-46.
5. Rabinowitz YS. The genetics of keratoconus. Ophthalmol Clin North Am. 2003;16:607-20, vii.
6. Boyd BF, Agarwal A. Wavefront Analysis and Corneal Topography. In:Alio JL, Krueger RR, Wilson SE eds. Wavefront Analysis, Aberometers and Corneal Topography. Panama: Highlights of Ophthalmology .2003;217-42.
7. Özçetin H, Sener AB. Myopi ve Tedavisi. Bursa: Nobel, 2002;51-61.
8. Özdamar A. Aberometreler ve topoğrafi aracılı laser sistemleri. 24. Ulusal Oftalmoloji Kursu, Refraktif Cerrahi. 2004;65-8.
9. Holladay J. Spherical Aberration: the next frontier. J Cataract Refract Surg. 2006;95-102.
10. Salmon TO, van de Pol C. Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors. J Cataract Refract Surg. 2006;32:2064-74.
11. Applegate RA, Sarver EJ, Khemsara V. Are all aberrations equal? J Refract Surg. 2002;18:556-62.
12. Kuroda T, Fujikado T, Maeda N, Oshika T, Hirohara Y, Mihashi T. Wavefront analysis of higher-order aberrations in patients with cataract. J Cataract Refract Surg. 2002;28:438-44.
13. Tzelikis PF, Akaishi L, Trindade FC, Boteon JE. Spherical aberration and contrast sensitivity in eyes implanted with aspheric and spherical intraocular lenses: a comparative study. Am J Ophthalmol. 2008;145:827-33.
14. Guirao A, Redondo M, Geraghty E, Piers P, Norrby S, Artal P. Corneal optical aberrations and retinal image quality in patients in whom monofocal intraocular lenses were implanted. Arch Ophthalmol. 2002;120:1143-51.
15. Holladay JT. Optical quality and refractive surgery. Int Ophthalmol Clin. 2003;43:119-36.
16. Vilarrodona L, Barrett GD, Johnson B. High-order aberrations in pseudophakia with different intraocular lenses. J Cataract Refract Surg. 2004;30:571-5.
17. Hayashi K, Yoshida M, Hayashi H. Correlation of higher-order wavefront aberrations with visual function in pseudophakic eyes. Eye (Lond). 2008;22:1476-82.
18. Bellucci R, Morselli S, Piers P. Comparison of wavefront aberrations and optical quality of eyes implanted with five different intraocular lenses. J Refract Surg. 2004;20:297-306.
19. Temel ve Klinik Bilimler Kursu: Refraktif Cerrahi. American Academy Of Ophthalmology, Güneş Tıp Yayıncılık. 2008; Vol 13:17.
20. Krauger RR, Applegate RA, MacRae S. Wavefront Customized Visual Corrections: The Quest for Super Vision.2nd ed.Thorofare, NJ:Slack; 2004;28-32.
21. Netto MV, Dupps W, Wilson SE. Wavefront-guided ablation:evidence for efficacy compared to traditional ablation. Am J Ophthalmol. 2006;141:360-8.
22. Patel SV, Baratz KH, Maguire LJ, Hodge DO, McLaren JW. Anterior corneal aberrations after Descemet's stripping endothelial keratoplasty for Fuchs' endothelial dystrophy. Ophthalmology. 2012;119:1522-9.
23. Greenstein SA, Fry KL, Hersh MJ, Hersh PS. Higher-order aberrations after corneal collagen crosslinking for keratoconus and corneal ectasia. J Cataract Refract Surg. 2012;38:292-302.