

Uyum Teorileri ve Presbiyopi*

Accommodation Theories and Presbyopia

Canan Aslı UTİNE¹

Güncel Konu

Quest Editorials

ÖZ

Uyum, gözün odak mesafesini uzak cisimlerden yakın cisimlere değiştirebilme kabiliyetini sağlayan, gözün refraktif gücündeki dioptrik değişikliktir. Presbiyopi, uyum aralığının daralması nedeniyle gözün yakın noktasının gözden uzağa gerilemesidir. Siliyer cisim, siliyer kas, koroid, anterior ve posterior zonüler lifler, lens kapsülü ve kristalin lens, gözün uyum anatomisini oluşturur. Vitreus cisminin rolünü hem destekleyen hem karşı çıkan görüşler mevcuttur. Uyum kabiliyeti ve mekanizması omurgalılar arasında, yaşadıkları çevresel/görsel koşullar ve uyum gereksinimleri kadar çok farklılıklar gösterir.

Uyum mekanizması üzerinde onördüncü yüzyıldan bu yana çalışılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kabul gören Helmholtz'un "Kristalin Lens Elastisite Teorisi"ne göre, uyum manevrası sırasında siliyer kas anteriora ve iç eksene doğru kasılır. Zonüllerin gerilim lifleri, tüm sistem için bir makara veya çıkık görevi görerek, gerilim kuvvetini posterior zonüllere aktarır; ve anterior zonüler lifler 360° gevşer. Kristalin lens, kendi elastisitesi ile şişkinleşir. Anterior lens yüzeyi eğimi artar, eğrilik yarıçapı azalır ve verteksi öne yerdeğiştirir. Posterior lens yüzeyi eğimi de hafifçe artar, fakat kendi yerinde kalır. Böylece lens merkezde kalınlaşır. Hiçbir zaman lensin ön yüzeyi, arka yüzeyden daha dik olmaz. Glasser ve ark., makak maymunlarında, cerrahi anestezi altında göze giden parasempatik yolları elektriksel olarak uyararak uyum mekanizmasını in vivo ortamda incelemişler ve Helmholtz'un uyum teorisini kanıtlamışlardır.

Artan yaşla birlikte tüm uyum yapılarında değişiklikler meydana gelmekle birlikte, presbiyopi gerçekleşmesinde lens ve kapsül temelli değişiklikler en büyük rolü oynamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Presbiyopi, lens.

ABSTRACT

Accommodation is the dioptric change in the refractive power of the eye, so that the eye can change its point of focus from distance to near. Presbyopia is the receding of the eye's near point away from the eye, due to narrowing of the accommodative amplitude. Ciliary body, ciliary muscle, choroid, anterior and posterior zonular fibers, lens capsule and crystalline lens make up the accommodative anatomy of the eye. The role of the vitreus is both supported and opposed by different theories. The ability and mechanism of accommodation vary among vertebrates, as much as their environmental/visual circumstances and accommodative needs do.

The accommodative mechanism has been studied since fourteenth century. Currently widely accepted Helmholtz's "Crystalline Lens Elasticity Theory" states that during accommodative maneuver, ciliary muscle contracts anteriorly and towards the axis of the eye. Zonullar tension system works as a pulley for the entire system and transfers the tension force to the posterior zonules, so that the anterior zonules are relaxed for 360°. The crystalline lens becomes more spherical with its own elasticity. The anterior lenticular curvature increases, radius of curvature decreases and the vertex displaces anteriorly. Posterior lenticular curvature also increases slightly, but remains in its own place. Thus, the lens is thickened centrally. The anterior surface never becomes steeper than the posterior surface. Glasser et al have proved the Helmholtz's theory of accommodation by studying the accommodative mechanism in vivo in rhesus monkeys, by electrically stimulating the parasympathetic pathways under surgical anesthesia.

Although age related changes take place in all accommodative structures, lens and capsule based changes have the greatest role in the occurrence of presbyopia.

Key Words: Presbyopia, lens.

Glo-Kat 2011;6:1-10

Geliş Tarihi : 25/10/2010

Kabul Tarihi : 28/10/2010

Received : October 25, 2010

Accepted : October 28, 2010

* Bu çalışma, 44. TOD Ulusal Kongresi'nde Katarakt ve Refraktif Cerrahi Birimi Paneli olarak sunulmuştur.

1- Yeditepe Üniversitesi Hastanesi Göz Hastalıkları A.D., İstanbul, Yard. Doç. Dr.

1- M.D. Asistant Professor, Yeditepe University Department of Ophthalmology İstanbul/TURKEY
UTİNE C.A., cananutine@gmail.com

Correspondence: M.D. Asistant Professor, Canan Aslı UTİNE
Yeditepe University Department of Ophthalmology İstanbul/TURKEY

GİRİŞ

Yakın görme refleksi ve presbiyopi, çağlar boyunca araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur ve özellikle ondördüncü yüzyıldan bu yana araştırılmaktadır.

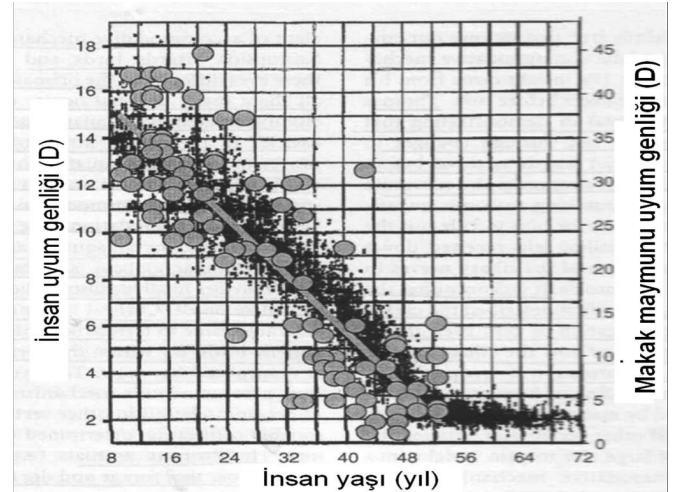
Yakın refleksi üçlüsü içinde uyum (akomodasyon), oküler konverjans ve pupil kontraksiyonu yer alır. Bu üçlü içinde, ilerleyen yaş ile birlikte zayıflayan esas olarak uyumdur. Uyum, gözün refraktif gücündeki dioptrik değişiktir. Gözün odak mesafesini, uzak cisimlerden yakın cisimlere değiştirebilme kabiliyetini sağlar.¹

Gözün optik gücü, göze giren ışınların verjansını artıracak şekilde adapte olmalıdır ve ışık ışınlarının retina üzerinde odaklanmasına izin vermelidir.² Bir optik sistem olarak gözün refraktif gücü, ya odak düzlemine göre görüntü düzleminin mesafesini değiştirerek, ya da görüntüleme sisteminin odak uzunluğu değiştirilerek ayarlanabilir. Dolayısıyla uyum, ya retina ile lens arasındaki mesafe değiştirilerek ya da görüntüleme mekanizmasındaki yapıların eğrilik yarıçapları veya refraktif indisleri değiştirilerek gerçekleştirilebilir.²

Uyum genliği, okunan metnin keskin bir şekilde odakta olduğu en yakın okuma mesafesi ile, en uzak okuma mesafesi arasındaki dioptrik güç farkıdır.¹ Presbiyopi, uyum aralığının daralması nedeniyle gözün yakın noktasının, gözden uzağa gerilemesidir. Diğer bir deyişle, yaşlanma ile gözün uyum yeteneğinin azalması sonucunda yakın objelere odaklanma güçlüğüdür. Presbiyopi, 45 yaş üzerindeki toplumun %100'ünü etkileyen bir durumdur.³

Yakına odaklanırken göz yorulması ile ilgili ilk bilgiler, Aristotle (384-322 İÖ) zamanından gelmektedir. Aristotle, uzakta iyi gören fakat yakını mesafede zorlanan kişileri "presbitler" olarak adlandırmıştır.⁴ Presbiyopinin ilk doğru tanımlamasını ise Spaniard Benito Daça de Valdes 1623'te yapmıştır.⁵ Sturm (1967), Yunanca kaynaklı yaşlı insan anlamına gelen "présbys" kelimesi ile göz anlamına gelen "ops, opos" kelimelerini birleştirmek; "presbiyopi" kelimesini oluşturmuştur.⁶

Meşhur Donders-Duane grafiği (Şekil 1), uyum genliğinin artan yaş ile orantılı ve öngörülebilir bir biçimde azaldığını göstermektedir.⁷ Duane, 1500 olguda subjektif itme ("push-up") yöntemiyle uyum kabiliyetini ölçtü ve yaş ile ilişkili uyum kaybı hayatın erken yıllarında başladığını gösterdi.⁸ Uyum kabiliyetinin objektif yöntemlerle ölçüldüğü çalışmalarda, her onyılıda yaklaşık 2.3 D



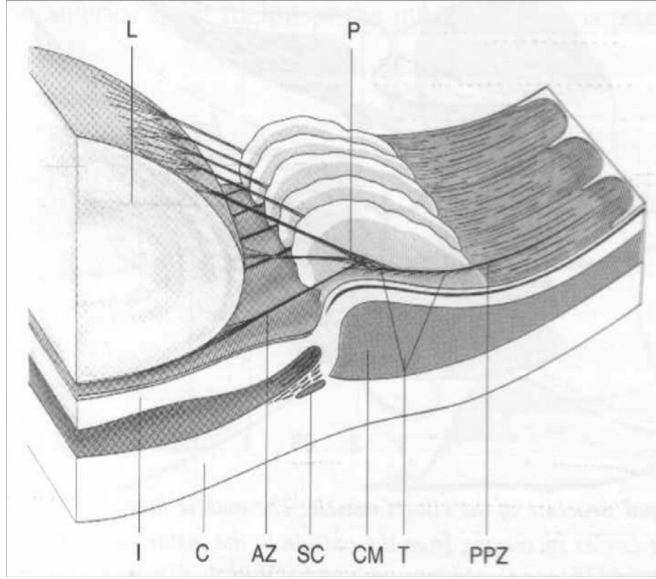
Şekil 1: Donders-Duane grafiği. Grafikteki küçük siyah semboller, insanlarda presbiyopinin ilerleyişini subjektif itme yöntemi ile, büyük gri semboller ise makak maymunlarında topikal kolinerjik agonist pilokarpın uygulandıktan sonra objektif Hartinger eşzamanlılık refraktometresi ile ölçerek göstermektedir. Ancak bu şema, presbiyopinin başlangıç yaşını göstermemektedir. (Kaynak: Glasser A, Kaufman PL: Accommodation and presbyopia. In Kaufman PL, Alm A: Adler's Physiology of the eye. 10th ed. Mosby, Inc. St Louis 2003, P:197-233.)

lineer bir azalma ile birlikte, yaklaşık 50.8 yılda uyum kabiliyetinin tamamen kayb olduğu gösterilmiştir.⁹ Aynı olgularda subjektif yöntemlerle ölçüm yapıldığında ise, her onyılıda yaklaşık 2.4 D lineer bir azalma ile birlikte, 50 yaşında da yaklaşık 1 D ardakalan uyum genliği gösterilmiştir.^{8,9}

Yakın mesafeye uyum, odak derinliği, alan derinliği ve yeterli bir seviyede görme keskinliği gerektirir. Odak derinliği, görme keskinliğinde veya retina üzerindeki görüntü netliğinde farkedilebilir bir değişiklik olmadan tolere edilebilen odaklanma aralığıdır ve pupil çapına bağlıdır. Uyum itme yöntemi gibi subjektif yollarla ölçüldüğü zaman, gözün odak derinliği nedeniyle uyum genliği gerçekte var olduğundan fazla ölçülebilir.¹ Alan derinliği ise bir cismin, görüntüsünün odaklanmasında farkedilebilir bir değişiklik olmadan, göze doğru veya gözden uzağa doğru hareket ettirebildiği aralık olarak tanımlanır.¹ Ayrıca aydınlatma seviyesinin artırılması, kontrast duyarlılık ve görme keskinliğinde artışa neden olur; aynı zamanda pupil boyutunu küçülterek gözün odak derinliğini artırır ve subjektif olarak ölçülen uyum genliğinde artışa neden olur.¹

Tablo: Helmholtz ve Schachar teorilerinin karşılaştırılması.

Kristalin Lens Özellikleri	Helmholtz Teorisi	Schachar Teorisi
Uyum sırasında zonüllerde tam gevşeme	Evet	Hayır
Uyum sırasında merkezi kalınlıkta artış	Evet	Hayır
Uyum sırasında merkezi yüzeylerde dikleşme	Evet	Evet
Uyum sırasında periferik yüzeylerde düzleşme	Hayır	Evet
Uyum sırasında lens ekuatorunun hareket yönü	Skleradan uzağa	Skleraya doğru
Uyum sırasında sferik aberasyonda değişim	Pozitif yönde	Negatif yönde



Şekil 2: Rohen'e göre zonüler lif sisteminin 3 kategorisi.

L: Lens, P: Zonüler Pleksus (Zonüler Çatal), I: İris, C: Kornea, AZ: Anterior zonüler lifler, SC: Schlemm kanalı, CM: Siliyer kas, T: Gerilim lifleri, PPZ: Posterior zonüler lifler. (Kaynak: Lütjen-Drecoll E. Morphology and age-related changes of the accommodative apparatus. In Guthoff R, Ludwig K: Current Aspect of Human Accommodation I. Kaden, Heidelberg 2001, P:25-35.)

UYUM ANATOMİSİ

Siliyer cisim, siliyer kas, koroid, anterior ve posterior zonüler lifler, lens kapsülü ve kristalin lens, gözün uyum anatomisini oluşturur. Vitreus cisminin rolünü hem destekleyen hem karşı çıkan görüşler mevcuttur.¹⁰⁻¹²

Siliyer cisim, dış yüzeyinde anterior sklera, iç yüzeyinde siliyer çıkıntılarının pigmentli epitel ile sınırlanmıştır; anteriorda skleral mahmuz ve posteriorda retina (ora serrata) arasında yer alır.¹ Siliyer kasın anterior tendonları skleral mahmuz, trabeküler ağ ve korneaya bağlanır; posterior tendonları ise pars plananın iç limitan membranına ve koroidin elastik ağına bağlanır. Siliyer kasın iç anterior kısmında yer alan siliyer çıkıntılar "pars plikata"yı oluşturur. Pars plikatanın posteriorunda ise "pars plana" yer alır. Siliyer cisim üç tip kas lifi grubundan oluşmuştur: uzunlamasına (Brücke kası), radyal (oblik/retiküler) ve dairesel (ekvatoryal/Müller kası) kaslar. Periferik yerleşimli uzunlamasına kas, sklera komşuluğunda skleral mahmuz ile koroid arasında yer alır.¹³ Uzunlamasına kasların hemen iç tarafında, radyal kas lifleri yer alır. Bunlar, V veya Y şekilli kas lifleridir. Anteriorda skleral mahmuz ve anterior siliyer cismin periferik duvarına irisin bağlantı yaptığı yere; posteriorda koroidin elastik tendonlarına yapışırlar.^{1,14} Radyal liflerin hemen iç tarafında ise, siliyer cismin daha anteriorunda ve lense en yakın olarak yerleşmiş olan dairesel kas lifleri yer alır.¹⁵ Bu üç kas bölümü ayrı kaslar değildir; fakat farklı açılarda bantları bulunan bir musküler lif şebekesidir. Siliyer kasın kasılması ile birlikte, her üç kas lifi grubu birlikte kasılır ve kas liflerinin dağılımı değişerek dairesel kas oranı artar, radyal ve uzunlamasına kas oranı azalır.¹⁶

Zinn zonülleri, uyum mekanizmasında kuvvet aktarımı görevini gören temel yapıdır. Zonüllerin temel görevleri, kristalin lense anatomik yerleşiminde asılı tutmak ve uyum sırasında, siliyer cisim hareketlerinden kaynaklanan kuvveti lense aktarmaktır. Rohen, üç boyutlu tarayıcı elektron mikroskopik araştırmaları ile, zonüler sistemi üç kategoriye ayırmıştır (Şekil 2):¹⁷

Posterior Zonüler Lifler (Lensin Suspansuar Ligamanı/Siliyer Zonüller)

Pars plananın pigmentli ve pigmentli epitel arasında bulunan iç limitan membrandan, ora serratanın 0.5-1 mm anteriorundan köken alırlar. İççe geçmiş lif ağı olarak, siliyer cismin pars plikata bölgesinde, siliyer çıkıntılar arasındaki vadilere uzanırlar.¹⁸ Bu bölgeye "zonüler battaniye" adı verilir.¹⁷ Zonüller, siliyer epitel hücrelerin iç limitan membranına ince fibriller ile bağlanırlar. Siliyer kasın kasılması ile bu zonüller anteriora, pars plikatanın vadilerine doğru çekilirler.^{1,19}

Anterior Zonüler Lifler

Pars plikatanın vadilerinde, pigmentli olmayan siliyer epiteldeki iç limitan membran ile lens kapsülü arasında yer alırlar. Sirkümlental aralıktan geçen zonüller, lens yüzeyinin anterior ve posterior yüzeylerine ilerleyecek şekilde ayrılırlar ve "zonüler çatal"ı oluştururlar.²⁰ Zonül liflerinin çoğunluğu, 3 dar bölgeden birine insersiyon gösterir. Bu bölgelerin bir tanesi lens ekvatorunun 1.5 mm anteriorunda, diğer iki tanesi 1.0 mm ve 1.25 mm posteriorundadır. Bu bölgeler içinde lens kapsülü de kalınlaşır. Son olarak, ekvatoryal zonüller bir yelpaze gibi dağılarak lens ekvatoruna hemen hemen dik açıyla bağlanırlar.¹⁹

Gerilim Lifleri

Pars plana ve pars plikata arasındaki geçiş bölgesinde zonüler lifler düzenli çaprazlamalar gösterirler. Bu sırada bazı lifler zonüler battanieden ayrılıp, dar açı ile siliyer epitele bağlanırlar. Bu zonüllerin, daha ince ve kırılmalı bir yapısı vardır. Bunlara "destekleyici" veya "gerilim" lifleri denir. Anterior zonüller ile birlikte "zonüler pleksus" veya "zonüler çatal"ı oluştururlar.²⁰

Posterior zonüler lifler ve gerilim liflerinin uyumda önemli iki görevi vardır: Elastik posterior suspansiyondan kaynaklanan, uyum sırasında giderek artan geriye doğru kuvvetlere karşı siliyer kas hareketini desteklemek¹⁹ ve kontraksiyon sonrasında tüm siliyer kasın, uzak-uyumlu halini almak üzere yeniden düzenlenmesine destek olmak.¹

Ayrıca, posterior zonüllerin oluşturduğu zonüler battaniye ora serratadan siliyer çıkıntılara doğru ilerlerken, bazı zonüller iç siliyer kontürü takip etmez ve posterior kamaradan geçerek, siliyer cisim ile lens arasındaki zonüllere veya direkt olarak lense bağlanırlar. Bu zonüller anterior hyaloide penetre olmazlar; posterior kamarada serbest dolaşırlar. Bu zonüllerin uyumda özel bir görevi olup olmadığı bilinmemektedir.²¹⁻²³

Zonüler liflerin ora serratadan çıkışından, lens üzerindeki insersiyolarına kadarki toplam uzunluğu 11 mm'ye varabilir ve posterior:anterior kısımlar oranı kabaca 3:2'dir.¹⁹ Zonüler lifler, lens kapsülünden çok daha fazla elastiktir. Elastisite modülü (3.5×10^5 N/m²), elastinin elastisitesi ile hemen hemen aynıdır.²⁴ Bu değer, 15-45 yaşları arasında yaştan bağımsızdır. Zonüller rüptür olmadan önce 200 mmHg'ye kadar direnebilir;²⁵ ve 2-4 mm'ye uzayabilirler.²⁶ Bu vakum kuvveti, yaşla birlikte tedrici olarak azalır.²⁷ Uyum mekanizmasında ise zonül-lerde 1 mm'den az uzama gerçekleşmektedir.²³

Kristalin Lens

Uyum yapmayan genç erişkin insan lensi, kabaca 9.0 mm çapında ve 4.7 mm kalınlığındadır. Lens kalınlığı, 8 D uyum ile yaklaşık 0.5 mm artar.¹ Artan yaşla birlikte anterior ve posterior yüzey kurvatürlerinin artması ile birlikte lens kalınlığı da artar. Lens ekvatoryal çapının da yaşla birlikte arttığı öne sürülmüşse de, son çalışmalarda erişkin lens çapının yaştan bağımsız olduğu gösterilmiştir.^{28,29}

Lens kapsülü, anterior ve posteriordaki yüzeysel epitelin oluşturduğu bir bazal membrandır. Anterior kapsül, vücuttaki en kalın bazal membrandır. Lens kapsülünün en kalın olduğu yer periferik anterior yüzeyidir ve lensin ekvatoryal bölgesine doğru giderek incilir.¹⁴ Posterior yüzeyde lens kapsülü periferde (zonüllerin bağlandığı yerlerde) kalınlaşma göstermekle birlikte, lensin yüzey eğiminin en dik olduğu posterior kutbunda en incedir. Lens kapsülü, zonüllerden lens materyaline kuvvet aktarımından sorumludur ve bunu kapsül-lens ara yüzeyine dik "normal" kuvvet ve paralel "makaslama" kuvveti ile gerçekleştirir.³⁰

İnsan lensinin kapsülü çıkartıldığında, lens uyum yapmamış şekil alır.^{31,32} Bu, uyumdaki lensin şeklini lens kapsülünden aldığını (lens materyalinin direnmesine rağmen) gösterir. Lensin tam uyum yapmış hali, lens kapsülünün elastisitesine bağlıdır.¹⁴ Yaşlılarda bu etki azalır; hatta kapsülün çıkartılması ile lensin şeklinde değişiklik olmaz.^{33,34}

UYUM TEORİLERİ

Uyum kabiliyeti ve mekanizması omurgalılar arasında, yaşadıkları çevresel/görsel koşullar ve uyum gereksinimleri kadar çok farklılıklar gösterir.² Beslenme davranışları ve görsel ihtiyaçları kadar, hareket yetenekleri ve gececi veya gündüzcü hayvanlar olmaları ve sosyal davranışları da önemli etkiye sahip olabilir.² Örneğin, toynaklı hayvanlarda (at, koyun, inek, geyik gibi), uyum yeteneği ya çok azdır, ya da hiç yoktur. Balıkların ve rakunların sert ve küresel kristalin lensleri vardır. Bu hayvanlar, lensin yerini değiştirerek uyum gerçekleştirirler; lens yüzey eğriliklerini değiştiremezler. Bazı kuşlar, sürüngenler, kaplumbağalar, kornea eğiminde değişiklik yaparak uyum gösterir.³⁵ Dalan ördeklerde ise, kornea gücü beslendikleri su ortamında nötralize olduğu için,

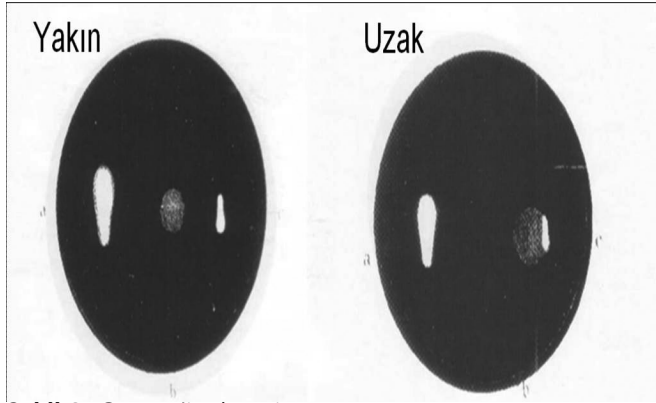
kornea kaynaklı uyumun bir değeri yoktur; fakat 50 D'ye varan lentiküler uyum, iris tarafından gerçekleştirilir.³⁶ "Primatlar" denilen maymunlar dahil memeliler takımının, göreceli olarak yumuşak ve düz lensleri vardır. Sadece primatlar lens yüzeyi eğimlerini artırarak uyum yaparlar.Yine sadece primatlarda sistematik yaşa-bağlı uyum kabiliyetinde kayıp, yani presbiyopi gerçekleşir. Uyum mekanizmaları ve presbiyopi gerçekleşme zamanı, maymunlarda ve insanlarda benzer olduğu için, makak maymunları insan çalışmaları için uygun bir modeldir.^{37,38}

Bir uyum mekanizmasının varlığı hakkında ilk yazan araştırmacı, İtalyan papaz Francesco Mauróico'dur (1575).³⁹ Daha sonra Kepler ve Descartes gelmiştir. Mauróico, kristalin lensi konveks bir lensle kıyaslayan ilk araştırmacıydı. Lensin, presbiyopi olgularında daha düz, miyopide daha konveks olduğuna inanıyordu. Kepler (1611), odaklamadaki değişikliklerin, (bazı balıklarda olduğu gibi) lensin öne ve arkaya hareketi ile gerçekleştiğini söyledi.⁴⁰ Bu teori, böyle bir mekanizmanın gerçekleşebilmesi için lensin öne doğru 10 mm hareket etmesi gerektiği gösterilene kadar diğer araştırmacılar tarafından da desteklendi.⁴¹ Descartes (1637) ise oküler uyum mekanizmasını, kristalin lensin şekli veya eğriliğinde değişiklikler ile açıkladı.⁴⁰

Onsekizinci yüzyılda, uyum mekanizmasını tam ve doğru olarak açıklayamayan pek çok teori ortaya atıldı. Bunlar arasında, göz küresinin şeklinde değişim, kristalin lensin yerdeğiştirmesi, iris hareketi, kornea eğiminde değişim, kristalin lensin şeklinde değişim teorileri yer almaktaydı.³⁹

Uyum konusundaki önemli ilerlemeler, ondokuzuncu yüzyılda bazı araştırmacıların çeşitli hayvan türlerinde yaptıkları deneysel çalışmalar ile katedildi.⁴² İlk olarak Thomas Young (1801), uyumun daha önce inanıldığı gibi kornea eğriliği veya aksiyel uzunluktaki değişikliklerle değil, lensin eğriliğindeki değişikliklerle gerçekleştiğini belirtti.³³ Sir Philip Crampton (1813) ise, deve kuşu ve kartal gözlerindeki araştırmaları ile kuşlardaki uyum anatomisini ve siliyer kasın varlığını ilk olarak gösteren araştırmacı oldu.⁴³ Skleral limbus içinde, gözü çevreleyen küçük kemik skleral kemikçikler ve bunlarında altındaki skleranın içinde yatan ve korneanın iç lamellasına bağlanan siliyer kas, bu hayvanlarda uyumu gerçekleştiriyordu.⁴⁴

Max Langenbeck (1849) kristalin lensin yüzeyinden yansıyan mum görüntülerinin yer ve şekil değiştirmesini basitçe görsel olarak inceleyerek, yakına uyum yaparken lensin anterior yüzeyinin daha konveks hale geldiğini belirtti.⁴⁵ F.C.Donders, Langenbeck'in bu söylemini lensin Purkinje görüntülerini gözlemleyerek doğrulamak istedi. Ancak başarılı olamadı ve bir mikroskop ile inceleme yapılması gerektiğini söyledi.⁴⁵ The Dutch Society of Sciences tarafından 1848'de uyum mekanizması üzerine en iyi tez için bir ödül öne sürülmesi üzerine, Langenbeck ve Donders'in çalışmalarından esinlenen Antonie



Şekil 3: Cramer'in deneyi.

(a) İlk (anteriorda), düz ve en büyük görüntü-kornea kaynaklı.
 (b) Üçüncü (posteriorda), düz ve en silik görüntü-lensin anterior yüzeyi kaynaklı.
 (c) İkinci (ortada), ters ve göreceli olarak parlak görüntü - lensin posterior yüzeyi veya lens kapsülü kaynaklı.

Yakına bakış sırasında Purkinje görüntüleri, Şekil 3a'daki gibi yerleşmiştir. Aynı optik ekseninde uzağa bakış sırasında (Şekil 3b), kornea görüntüsü "a" ve lensin posterior yüzeyinden kaynaklanan görüntü "c" yerinde sabit kalır. Bu görüntülerin boyutları ve parlaklıkları da sabit kalır. Bu, uyum sırasında lensin yerinde kaldığını gösterir. Diğer taraftan görüntü "b", ters görüntü "c"ye yaklaşır, daha az parlaklaşmıştır ancak boyutu büyümüştür. Kişi yakında bir objeye baktığında, bu görüntü hemen görüntü "c"den uzaklaşır ve Şekil 3a'daki pozisyonunu alır. (Kaynak: Cramer A: The accommodative ability of the eyes. Natuurkundige Verhandelingen van de Hollandsche Maatschappij der Wetenschappen [Physical Publication by the Dutch Society of Sciences] in Haarlem, VIII, 1853.)

Cramer, Groningen Hollanda'da tasarladığı mikroskop ile uyum sırasında Purkinje görüntülerinin incelenmesini başararak bugün kabul edilen uyum teorisinin kanıtlarını ilk olarak ortaya koydu; ve "The accommodative ability of the eyes" isimli makalesini yayınladı. Kasım 1851'de başvurduğu tezi ile The Dutch Society of Sciences'dan 21 Mayıs 1852'de 1 altın madalya ve 15 Hollanda parası ödül kazandı. Bu, Hermann von Helmholtz 1855'te yayınladığı çalışmalarını yapmadan 8 ay önceye denk geliyordu. Cramer, uyum üzerinde daha ileri çalışma yapmadan Ocak 1855'te, 32 yaşında öldü.⁴⁵

Cramer, göz önünde tutulan bir ışık kaynağı ile korneanın ve lensin anterior ve posterior yüzeylerinden kaynaklanan 4 adet Purkinje görüntüsünü uyum sırasında inceleyerek ile şu sonuçlara ulaştı: Yakın akomodasyonu sırasında lensin anterior yüzey kurvatürü artar. Ancak kornea eğimi sabit kalır, tensor koroidea (siliyer kas) korneanın posterior yüzeyinin konkavitesini değiştiremez. Retina ve lens arasındaki mesafe de sabit kalır.⁴²

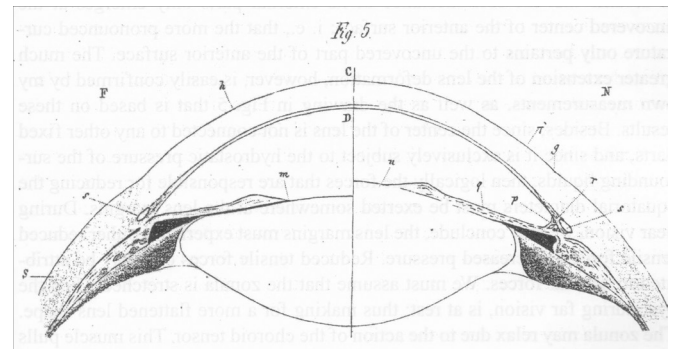
Hermann von Helmholtz, Şubat 1853'te "Berlin Academy of Sciences"da, Cramer'in bulgularına benzer bulgular bildirdi;⁴⁶ ancak 1855'te yayınladığı makalesinde Cramer'in bulgularından haberdar olmadığını belirtti.⁴⁷ Cramer, anterior lens yüzeyinin kurvatüründeki değişiklikleri keşfetmişti. Helmholtz ise ilave olarak, posterior lens yüzey kurvatürünün de uyumda hafifçe arttığını

(ama korneaya yaklaşmadığını) ve siliyer kas kasılması ile, lensin düz kalmasını sağlayan zonüler lifler üzerindeki gerilimin azaldığını söyledi.⁴⁷ Cramer, Purkinje görüntülerini görmeyi sağlayan bir mikroskop kullanmışken, Helmholtz Purkinje görüntülerinin boyutlarını ölçmek için bir oftalmometre kullandı. Ayrıca Helmholtz, hem genç hem yaşlılarda afaki durumunda uyum gerçekleştirilemediğini göstererek, uyumun kristalin lensin şeklindeki değişikliklerle ilgili olduğunu bir defa daha kanıtladı.

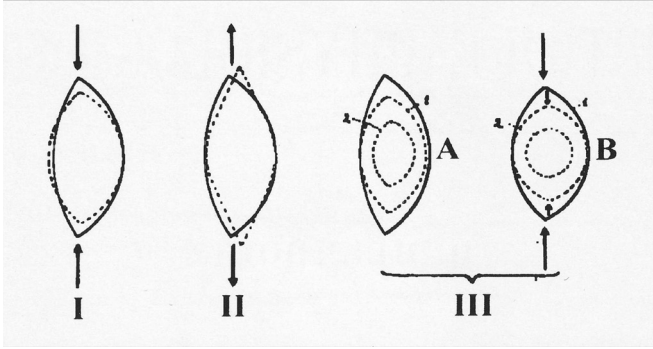
Helmholtz'un uyum teorisine göre, uyuma etki eden üç önemli faktör vardı: siliyer kas, zonüler lifler ve lensin elastik özellikleri. Bu teoride, uyum mekanizmasını açıklamak için vitreusa ihtiyaç yoktu. Helmholtz'un "Kristalin lens elastisite teorisi" olarak bilinen uyum manevrası sırasında siliyer kas, anteriora ve iç eksene doğru kasılır; böylece zonüllerde 360° gevşeme gerçekleşir. Kristalin lens kendi elastisitesi ile şişkinleşir ve daha sferik bir şekil alır.^{47, 48} Helmholtz'un teorisini gösteren kendi çiziminde görüldüğü gibi (Şekil 4), yakına uyum sırasında pupil daralır, irisin pupil kenarı öne doğru yerdeğiştirir, periferik kısımları geride kalır. Anterior lens yüzeyi eğimi artar, eğrilik yarıçapı azalır ve verteksi öne yerdeğiştirir. Posterior lens yüzeyi eğimi de hafifçe artar, fakat kendi yerinde kalır. Böylece lens merkezde kalınlaşır. Lens ön yüzey eğimi, arka yüzeye göre daha hızlı dikleşir. Ancak, hiçbir zaman ön yüzey arka yüzeyden daha dik olmaz.⁴⁷ Helmholtz ayrıca, posterior lens yüzeyi ve kişinin görme çizgisinin, kornea eksenine ile aynı çizgi üzerinde olmadığını ve kornea verteksinin eğrilik merkezinin, lens eksenine göre nazal tarafta olduğunu da saptamıştır.⁴⁷

Heinrich Müller ve Charles Marie Benjamin Rouget (1856) birbirinden bağımsız olarak, uzunlamasına kasa ilave olarak dairesel kasın (Müller-Rouget kası) varlığını da keşfettiler, ve siliyer kasın nasıl lens kurvatürünü değiştirebildiğini mekanistik olarak tanımladılar.^{49, 50}

Lens ekvatorunun lensin optik eksenine göre pozisyonu, lensin merkezinden daha anteriordadır. Böylece anterior zonüler bant anterior lens kapsülü üzerine, posterior kapsül üzerine bağlanan her iki posterior bantından çok daha küçük bir açıyla (neredeyse tanjansiyel olarak) bağlantı gösterir. Bunun sonucunda siliyer kas kasılması ile oluşan anterior zonüler lif gevşemesi ante-



Şekil 4: Kristalin lens elastisite teorisini gösteren Helmholtz'un kendi çizimi. (Kaynak: von Helmholtz H: Ueber die accommodatio des auge. Graefe's Archiv für Ophthalmologie. 1855;1:1-74.)



Şekil 5: Uyum sırasında lensde oluşan değişiklikler. (I) Helmholtz'a göre uyumla birlikte lens ekvatoryal çapında kısalma ve anterior ve posterior kurvatürde artış, (II) Tscherning'e göre zonüllerin gerginleşmesi ile periferik kurvatürde düzleşme ve merkezi kurvatürde artış; ve (III) Gullstrand'a göre intrakapsüler mekanizma ile lensin anterior yüzey eğiminde artış meydana gelir. (Kaynak: Simón-Tor JM, Simón-Castellví G, Simón-Castellví SI: The history of presbyopia. In Agarwal A.: Presbyopia - A Surgical Textbook, Slack Inc., Thorofare 2002, P:3-15.)

rrior lens kapsülü üzerine, posterior lens kapsülü üzerine olduğundan çok daha etkin bir biçimde aktarılır. Böylece, lens ekvatoru ve anterior lens kapsülü üzerine etki eden gerilim kuvvetleri daha belirgin olarak azalır. Bu kuvvetler, lensin iç elastik kuvvetleri nedeniyle, özellikle anterior lens kapsülü üzerine baskı uygular. Bu mekanizma, Helmholtz teorisine göre uyum ile birlikte merkezi anterior lens yüzeyinin asferik olarak, posterior lens yüzeyinden çok daha fazla dikleşmesini açıklar.¹⁹

Danimarkalı oftalmolog Marius Hans Erik Tscherning ise (1895), Helmholtz teorisinin tam tersini öne sürdü. Uyumun periferik lens yüzey eğiminin düzleşmesi ve merkezi lens yüzeyinin eğiminin artışı ile gerçekleştiğini söyledi. Bu teoriye göre lenste sert bir nukleus ve şekil değiştirebilen bir korteks mevcuttur. "Tscherning akomodatif tabakası" adı verilen kristalin lensin bu yüzeyel tabakası, sert çekirdek etrafında kendi plastisitesi ve kıvamı nedeniyle şekil değiştirme kabiliyeti olan kalın bir tabakadır.⁵¹ Refraktif güçteki değişim, lensin sagittal çapında bir değişiklik olmadan, lensin yüksek refraktif gücü olan sert nukleusunun, lens içinde yer değiştirmesi ile elde edilir.⁵¹ Ancak daha sonra Tscherning (1909), ilk teorisini modifiye ederek uyum sırasında lens kalınlığının değişebileceğini söyledi.⁵² Tscherning teorisine göre, siliyer cisim kasıldığı zaman zonüller gerginleşmekte, kurvatür merkezde dikleşip periferde düzleşmekteydi. Miyozis, lens periferinden kaynaklanan görüntü bulanıklığını önlemekteydi.⁵¹

Ancak Tscherning, uyum sırasında artan zonül gerilimini deneysel olarak kanıtlayamadı. Bu teori, hatalı olarak, uyum yapmayan toynaklı hayvan gözlerinin lense incelenerek geliştirilmişti.¹ A. von Pflugk (1932), Tscherning teorisindeki eksiklikler nedeniyle, uyum sırasında vitreusun rolü hakkında araştırma yaptı.⁵³ Pflugk'a göre vitreus, lense posteriordan-özellikle periferde-etkin bir kuvvet uygulamaktaydı. Böylece, uyum sırasında lens

merkezi çoğunlukla etkilenmezken, posterior periferdeki basınç nedeniyle lens anterior yüzeyinin şekli değişmekteydi.⁵³ Bu teoriye göre artan yaş ile birlikte periferik vitreusun öne doğru hareketinin regresyonu ve sıvılaşması presbiyoyu başlatmaktadır. Bu teori daha sonra Schachar tarafından, Tscherning-Pflugk teorisinin aksine vitreusa bir rol vermeyerek tekrar ortaya atılmıştır.⁵⁴

Allvar Gullstrand (1909) Helmholtz'un teorisini geliştirdi ve Bruch membranı ile birlikte koroid elastisitesinin ve lens kapsülünün rolünü vurguladı. Gullstrand'a göre tüm uyumun yaklaşık üçte biri "intrakapsüler mekanizma"larla gerçekleşir. Uyum sırasında kristalin lifler merkezi kısımlarında kendi içlerine doğru kıvrılır, birbirleri üzerinde kayar. Lens merkezinin refraktif indisi artar. Bu da, lensin anterior yüzey eğiminin artmasıyla oluşan "dış uyum"u kuvvetlendirir.⁵⁵ Optiğe olan katkısı ile Gullstrand, 1911'de Nobel Tıp ödülünü kazanmıştır.⁵⁶ Şekil 5'te, Helmholtz, Tscherning ve Gullstrand teorilerine göre uyum sırasında lensde oluşan değişiklikler karşılaştırılmalı olarak görülmektedir.

Fincham (1924), lens kapsülünün kendinden varolan elastisitesini farkederek ilk araştırmacıdır. Ona göre uyum yapılmadığı zamanki lens şekli, lensin plastisitesine bağlıdır. Uyum sırasındaki lens şeklindeki değişiklik ise lens kapsülünün elastisitesine bağlıdır.^{57,58}

Lensteki düzleşme tercihen periferde lens kapsülünün en kalın ve güçlü olduğu yerde, öne çıkıntılılaşma ise en zayıf olduğu aksiyel bölgelerde olacaktır. Kapsülün posterior kutbu çok incedir ve burada, uyum yapılmayan durumda bile lenste maksimum yüzey eğimi bulunur.⁵⁹ Fincham'a göre yaşlı gözlerdeki kapsül elastisitesi, sklerotik lens materyalinin deformasyonunu sağlayamadığı için presbiyopi ortaya çıkar.⁵⁷

Helmholtz'un orijinal teorisi, Rohen'in siliyer kasın öne hareketini içeren katkısı ile bir kez daha modifiye edildi. Rohen'e göre (1979), siliyer kasın kasılması ile zonüllerin gerilim liflerindeki gerilim kuvveti artar; ve siliyer kas ve zonüler pleksusta öne ve içe doğru yer değiştirme gerçekleşir. Gerilim lifleri, gerilim kuvvetini tüm lens suspansiyon sisteminden, lensin posterior suspansuar ligamanına (yani, posterior zonüllere) aktarmaktan sorumludur. Böylece, anterior zonüler lifler gevşer. Zonüler pleksus, tüm sistem için bir makara veya çıkırcık görevi görür. Uyumun gevşeme mekanizması ise gevşemiş kasın, elastik koroid ve zonüler pleksusun posteriora ve dışa doğru yer değiştirmesini içerir.¹⁷

Ronald A. Schachar (1992) ise teorisini lens ekvatoruna bağlanan zonüllerin anatomisi üzerine kurdu. Schachar'a göre ekvatoryal zonüler lifler siliyer cismin köküne değil, iris altındaki siliyer kasın anterior yüzeyine bağlanır.^{54,60-64} Anterior ve posterior lifler ise, siliyer çıkıntılar arasından siliyer cisme ilerler. Siliyer kas kasılması sırasında, radyal ve uzunlamasına kas lifleri aracılığıyla, siliyer kasın anterior kısmı iris kökünde skleraya doğru (öne ve dışa) kıvrılırlar. Bu hareket, anterior ve posterior zonüler lifler üzerindeki gerilimi azaltırken, ekvatoryal zonüllerdeki gerilimi artırır.⁶⁴

Shachar'a göre bu, ekvatoryal zonüler lifler aracılığıyla lens ekvatorunda net dışa-doğru kuvvete neden olur. Lens ekvatoru skleraya doğru çekilir ve gerilirken, anterior ve posterior zonüler lifler gevşer.⁶⁵ Böylece lens periferik yüzeyleri düzleşirken, merkezi anterior ve posterior lens yüzeyi kurvatürleri artar. Bu artış, lensin viskoelastik özelliklerine bağlı olur. Shachar'ın teorisi, Tscherning-Pflugk teorisinden farklıdır, çünkü lensin uyumda şekil değişikliğinin açıklanması için vitreusa bağlı değildir.³⁸

Schachar da bu görüşünü geliştirmek için hatalı olarak uyum yapmayan sığır lenslerini kullanmıştı.⁶⁶ Teorisini desteklemek için de, Mylar balonu adı verilen kenarlarından gerildiğinde periferik kurvatürü düzleşen ve merkezi eğimi dikleşen bir balon kullandı.⁶⁷ Tablo'da, Helmholtz ve Schachar teorilerinin karşılaştırması görülmektedir.

Glasser ve ark., (1999) makak maymunlarında, cerrahi anestezi altında göze giden parasempatik yolları elektriksel olarak uyarak uyum mekanizmasını *in vivo* ortamda incelediler. Bu, siliyer sinirlerin siliyer ganglionunun uyarılması ile elde edilebilirdi.⁶⁸ Ancak, siliyer ganglion posterior orbitada ekstraoküler kaslar altında ve optik sinire komşu olduğu için bu işlem çok zordur ve eş zamanlı olarak uyum anatomisini incelemeyi zorlaştırabilir. Bu nedenle, beyindeki Edinger-Westphal çekirdeğine elektriksel uyarı vererek uyum manevrası canlandırıldı.⁶⁹

Glasser'in bu çalışmaları, uyum sırasında gözün refraksiyonunun miyopa kaydığını, siliyer çıkıntılar, posterior zonül ve lens ekvatorunun skleradan uzağa doğru hareket ettiğini ve lens çapının konsantrik olarak küçüldüğünü kanıtladı. Dokulardaki bu hareket, Schachar tarafından önerilen aksine, Helmholtz tarafından tarif edilen klasik uyum teorisiyle uyumludur.⁷⁰

ARTAN YAŞ İLE UYUM YAPILARINDAKİ DEĞİŞİKLİKLER VE PRESBYOPI

Uyum mekanizması için olduğu gibi, presbiyopi gelişimini açıklamak için de çeşitli teoriler öne sürülmüştür.

Lens ve Kapsül Temelli Teoriler: Lensin elastik özelliklerindeki değişiklikleri presbiyopiden sorumlu tutar. Lens kapsülünün Young elastisite modülüsü, gençlik ile 60 yaş arasında yarı yarıya azalır.⁷¹ Lens kapsülü, daha kalın, daha az genişleyebilen ve daha kırılğan bir hal alır;⁷² ve sertleşmiş lensin şeklini uyum yapmış duruma değiştiremez.⁷³ Genç gözde elastik kapsül kuvveti baskın iken presbiyoplarda ise uyum yapmamış hale geri çağırıcı kuvvetler baskındır. Azalmış kapsül elastisitesi, presbiyopiyi tamamen açıklayamasa da, kurvatür değişikliği kapasitesinin azalmasını açıklar.

Geometrik Teori: Lens kalınlığında yaşa bağlı artış ile birlikte lens üzerindeki zonüler birleşmelerin geometrisinde değişiklik olduğunu vurgular.^{9,74-77} Artan yaşla birlikte zonüler lifler, lensin anterior yüzeyinde optik ek-

sen yönünde kayma gösterir.⁷⁵ Zonüler liflerin bağlantı açısı değiştiğçe, siliyer kastan lens kapsülüne uygulanan kuvvetin yönü ve miktarı değişir.^{12,77,78}

Disakomodasyon Teorisi: Bu teoriye göre artan yaşla birlikte zonüler gerilimde tedrici gerileme olmakta ve lens, uyum yapmış konfigürasyon almaktadır.⁸⁰ Zonüler lifler, lensi düz ve uyum yapmamış halde tutamamaktadır.^{76,81-83}

Schachar Teorisi: Artan yaşa bağlı olarak lens ekvatoryal çapında artış ile birlikte "posterior kamarada kalabalıklaşma" meydana geldiğini ve lens ekvatorundaki zonüler gerilimin azaldığını, siliyer cisim ile lens ekvatoru arasındaki mesafenin azaldığını öne sürer.⁶⁰ Böylece uyum yapma çabası ile zonüller, lens ekvatoru üzerinde aktif olarak çekme kuvveti uygulayamazlar. Ancak, artan yaşla birlikte lensin aksiyel kalınlığında artış görülürken, ekvatoryal lens çapının yaş ile bağlantılı olarak değiştiği kanıtlanamamıştır.³²

Ekstralentiküler Teoriler: Siliyer kas, vitreus değişiklikleri ve posterior siliyer kas tendonunun elastisitesindeki değişikliklerin, insan hayatında presbiyopi ile hemen hemen aynı dönemlerde gerçekleştiğini vurgular. Ancak bu teoriler, uyum genliğindeki azalmanın neden hayatın erken safhalarında başladığını açıklayamaz.⁸⁴

Çok Faktörlü Teori: Bu teoriye göre presbiyopi bir son nokta değil, uyum yapan yapılardaki ilerleyici bozulmaların seyrinde bir noktadır.⁸² Hem ilerleyici lens elastisitesi kaybı, hem de siliyer kontraktilitenin azalması, eş zamanlı olarak gelişen yaşlanma faktörleridir.⁸⁵ Ancak presbiyopi gelişimini, sadece kişisel farklılıklar değil, refraksiyon, kişinin genel durumu, fiziksel maruziyet, jeografik, herediter ve diyet faktörleri de etkilemektedir.^{86,87}

Artan yaşla birlikte, uyum anatomisinin bileşenlerinin tümünde presbiyopi gelişimine katkıda bulunabilecek değişiklikler meydana gelir. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

a. Siliyer Kas Uzunluğu: 30-80 yaşları arasında kas lifi kaybı ve bağ dokusu artışı sonucu yarı yarıya azalma görülür. Kas lifleri arasında hücre-dışı materyal artışı, özellikle radyal kas kısmında ve ön kamaraya yakın kısımlarda belirgindir. Dairesel kaslardan oluşan anterior iç kısımda belirginleşme olur.⁸³ Yaşlı gözlerde atropinize insan siliyer kası, genç ve uyum yapmış siliyer kasa benzer.^{83,88} Siliyer kasın iç tepe noktası öne ve içe doğru hareket eder, skleral mahmuz ile arasındaki mesafe kaybolur. Yaşlanmış insan siliyer kasının, kristalin lensi düz ve uyum yapmamış konfigürasyonda tutma kabiliyeti daha azdır.⁸¹ Bu nedenle siklopleji genç gözlerde, yaşlı gözlerle göre daha etkin ve daha hızlı olmaktadır.⁴¹

Siliyer kasın maksimum kontraktibilitesi 45 yaş civarında iken, artan yaşla birlikte uyum hareketinin miktarı azalır. Ancak, presbiyopik insanlarda da siliyer kas kasılması olmasına rağmen,⁸⁹ lensteki uyum cevabı görülmemesi,²⁸ zonüller, lens ve lens kapsülüne ait faktörlerin uyum genliğindeki azalmaya anlamlı olarak katıldığını gösterir.

Posterior elastik suspansiyon sisteminde de, daimi gerilim stresine maruziyet sonucu elastosis benzeri dejenerasyon olur. Siliyer kasın posterior tendonlarının elastisitesinin azalması da kası geri çeken kuvveti (yani uyum yapmamış hali) etkiliyor olabilir.⁹⁰

b. Lens-Zonül Bağlantıları: Özellikle hayatın ilk 2 dekadında daha dardır. Artan yaşla birlikte, zonül - kapsül bağlantısında genişleme ve anteriorda ve posteriorda merkeze ilerleme görülür.⁷⁵ Bu ilerleme, 5. dekattan sonra dramatik olarak artar.⁷⁵ Yaşlanmayla zonülsüz alan anterior kapsülde 20 yaşta 8 mm iken, 80 yaşta 6.5 mm'ye, hatta 5.5 mm'den daha aza düşer.⁷⁵ Zonül insersiyosu ile lens ekvatoru arasındaki mesafe artarken sirkumferans mesafe azaldığı için, zonül insersiyosu ile siliyer çıkıntılar arası mesafe değişmez. Böylece, lens ekvatorunda anterior zonüler lifler tarafından dışa doğru kuvvetin miktarı azalır.⁷⁵

Anterior lens kurtatürü ve lens kalınlığında artış nedeniyle anterior ve posterior zonüllerin bağlantısı arasındaki mesafe artar ve "zonüler çatal"da açılma görülür ve zonül insersiyosu genç gözlerdeki kadar tanjansiyel olmayabilir.¹⁹ Böylece zonüllerden kapsüle aktarılan gerilim, uyum olmayan durumda etkisiz hale gelir (yani, lensi uyum yapmamış halde tutabilmek için daha fazla gerilim gerekir). Diğer taraftan siliyer kas kasıldığında, zonüller normalde kapsül üzerindeki gerilimi azaltmalıdır. Ancak bu etkin olarak gerçekleşemez, çünkü zonüller daha gergin bir pozisyonadadır. Bu da presbiyopinin, lens ve zonüllerin büyüklük ve açısal ilişkiler açısından geometrik bir bozukluğu olduğunu düşündürür.

İnsan dokularında germe çalışmaları ile indirekt olarak ortaya konan zonül yay sabitleri yaş ile bir korelasyon göstermemektedir. Ancak, zonüller daha seyrek, daha kırılğan hale gelir; daha az, daha küçük çaplı zonüler lifler kalır.⁷⁵ Zonül lifleri tarafından maksimum tolere edilebilen gerilim kuvvetinde ~0.5 mm / 5 yıl azalma görülür.²⁶

c. Lens Kapsülü: Artan yaşla birlikte daha kalınlaşır. Örneğin, anterior kapsül kalınlığı doğumda yaklaşık 11 mikron iken, 60 yaşında yaklaşık 20 mikrona artar.⁷² Kapsül, daha az esneyebilen, ve daha kırılğan bir yapı olur.^{71,72} Lensi şekillendirme kabiliyeti azalır,⁹¹ lensin artan sertleşmesi de buna eklenir. Lens kapsülünün Young elastisite modülüsü 40 yaşına kadar hemen hemen sabitken, daha sonra giderek azalır.^{92,93} Lensin tam uyum yapmış hali, lens kapsülünün elastisitesine bağlıdır. Yaşlılarda bu etki azalır; hatta dekapülasyon ile lensin şeklinde değişiklik olmaz.^{33,34}

d. Kristalin Lens: Optik ve fiziksel özelliklerinde de karmaşık bir değişiklik olur; lensin sertleşmesi bunlardan sadece bir tanesidir.³² Doğumda varolan embriyonik çekirdek, hayat boyu lens merkezinde kalır ve etrafına lifi hücreleri tabakalar halinde eklenerek, lens korteksi büyür. Lens sklerozu, kristalin lensin su bileşenini azalması ile ilişkilidir.¹⁴ Dehidratasyon, komşu lens lifleri arasında kimyasal veya fiziksel bağlar kurulması, proteinlerin hi-

perpolimerizasyonu gibi değişiklikler sonucunda lensin deforme olma kabiliyeti azalır.^{13,94} İnsan lensinin sertliği çocukluktan itibaren üssel olarak artar ve insan ömrü boyunca dört katından fazla artış gösterir.³² Lensin elastisitesini kaybetmesi, presbiyopiyi başlatır. Yaşlı bir lensin dış şekli, genç ve uyum yapmış bir lensin şekline benzer. Ancak, uyum ile genç gözlerdeki negatif sferik aberasyon artarken, yaşlanma ile birlikte sferik aberasyon sistematik olarak pozitif döner.^{32,92}

Lens kütlesi insan ömrü boyunca 1.5 katından fazla doğrusal olarak artar.³² Lensin hem anterior hem posterior lens yüzey kurtatürleri artar.^{80,95} Böylece lens merkezi öne doğru ilerler ve ön kamara derinliği azalır; ancak lensin posterior yüzeyinin pozisyonu değişmez.⁹ Yaş ile lensin ekvatoryal çapında ise sistematik bir değişiklik olmaz.^{9,28} Artan yaşla birlikte, lens yüzeyleri dikleştiği halde uzak görüşün değil, yakın görüşün bozulması durumuna "Lens Paradoksu" denir.⁷⁴ Bunun, lensin gradient refraktif indisindeki yaşa bağlı değişiklikten kaynaklandığı öne sürülmüştür.^{96,97}

Artan lens kalınlığı da, refraktif gücü azaltmaya yardımcı olabilir. Bu durum, Schachar'ın kendi teorisini için önesürdüğü destek noktalarından biridir. Ancak Glasser ve ark., çalışmaları, presbiyopinin ilerlemesinde ana faktörün lens sertleşmesi olduğunu ortaya koydu. Ayrıca in vitro lenslerle yaptıkları çalışmalarında, "lens paradoksu" nun belirttiği gibi yaşlanma ile refraktif indiste anlamlı bir değişiklik olduğunu bir kanıtını bulamadılar.⁹⁸ Koretz ise, yüzey kurtatüründeki değişikliklerin, refraktif yüzeyler arasındaki mesafelerdeki değişikliklerle neredeyse tamamen kompanse edildiğini gösterdi.⁷⁴

Glasser ve Campbell in vitro laser tarama tekniği kullandıkları çalışmalarında Helmholtz teorisini ile uyumlu olacak şekilde, lens ekvatorunu periferde doğru gerek lensin odak uzunluğunun artırılabilirliğini gösterdiler. Ancak insan lensinin refraktif güç değişimi, yaşla azalmaktadır. Odak gücü genç lenslerde germe kuvveti ile 14 D'ye kadar azaltılabilirken, 58 yaşından büyük lenslerde değişiklik yapmak mümkün olmamaktadır.⁹¹

Tüm uyum yapılarındaki bu yaşa bağlı değişiklikler sonucunda, presbiyopi gerçekleşmekte ve yakın gözlükleri hayatımıza girmektedir.

KAYNAKLAR/REFERENCES

1. Glasser A, Kaufman PL: Accommodation and presbyopia. In Kaufman PL, Alm A: Adler's Physiology of the eye. 10th ed. Mosby, Inc. St Louis. 2003;197-233.
2. Glasser A: How other species accommodate. In Guthoff R, Ludwig K: Current Aspect of Human Accommodation II. Kaden, Heidelberg. 2003;13-37.
3. Gomez Fernandez MT: Cirugia de la presbicia. (Editorial) Archivos de la Sociedad Espanola de Oftalmologia. 2001;8.
4. Aristotle: Problems. Mass: Harvard University Press, Cambridge. 1957.
5. Daça de Valdés B: Uso de los antojos. Imp Diego Pérez, Seville, Spain. 1623.
6. Sturm H.: Dissertio de Presbyopia et Myopia. Altdorfii. 1697.
7. Duane A.: An attempt to determine the normal range of accommodation at various ages, being a revision of Donder's experiments. Trans Am Ophthalmol Med Assoc. 1908;11:634-641.

8. Duane A.: Normal values of accommodation at all ages. *JAMA*. 1912;50:1010.
9. Koretz JF, Kaufman PL, Neider MW, et al.: Accommodation and presbyopia in the human eye: aging of the anterior segment. *Vision Res*. 1989;29:1685-1692.
10. Coleman DJ.: On the hydraulic suspension theory of accommodation. *Tr Am Soc*. 1986;84:846-868.
11. Fisher RF.: Is the vitreous necessary for accommodation in man. *Br J Ophthalmol*. 1983;67:206.
12. Koretz JF, Handelman GH.: A model for accommodation in the young human eye. *Vision Res*. 1983;23:1679-1686.
13. Brücke E.: Über den musculus Cramptonianus und den Spannmuskel der Choroidea. *Archiv für Anatomie, Physiologie und Wissenschaftliche Medicine*. 1846;1:370.
14. Pandey SK, Thakur J, Werner L, et al.: The human crystalline lens, ciliary body, and zonules: Their relevance to presbyopia. In Agarwal A: *Presbyopia: a surgical textbook*. Slack, Inc., Thorofare. 2002;17-27.
15. Müller H.: Über einen ringförmigen Muskel am Ciliarmuskel des Menschen und über den Mechanismus der Akkommodation. *Albrecht v. Graefe's Arch Ophthalmol*. 1858;3:1.
16. Tamm ER, Lütjen-Drecoll E.: Ciliary body. *Micros Res Tech*. 1996;33:390.
17. Rohen JW.: Scanning electron microscopic studies of the zonular apparatus in human and monkey eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1979;18:131-144.
18. Glasser A, Croft MA, Brumback L, et al.: Ultrasound biomicroscopy of the aging rhesus monkey ciliary region. *Optom Vis Sci*. 2001;78:417-424.
19. Ludwig K.: Zonular apparatus; Anatomy, biomechanics and coupling to the lens. In Guthoff R, Ludwig K: *Current Aspect of Human Accommodation*. Kaden, Heidelberg. 2001;71-92.
20. Rohen JW, Rentsch FJ.: Der konstruktive Bau des Zonulaapparates beim Menschen und dessen funktionelle Bedeutung. *Albrecht v. Graefe's Arch Kin Exp Ophthalmol*. 1969;178:1-19.
21. Farnsworth PN, Burke P.: Three-dimensional architecture of the suspensory apparatus of the lens of the rhesus monkey. *Exp Eye Res*. 1977;25:563-576.
22. McCulloch C.: The zonule of Zinn: Its origin, route, and insertion, and its relation to neighbouring structures. *Trans Am Ophthalmol Soc*. 1954;52:525-585.
23. Ludwig K.: *Akkommodation und Presbyopie*. Habilitationsschrift an der Augenklinik, Klinikum der LMU München. 1996.
24. Burton CA.: Relation of structure to function of the tissues of the wall of blood vessels. *Physiol Rev*. 1954;34:619.
25. Saber HR, Butler TJ, Cottrell DG.: Resistance of the human posterior capsule and zonules to disruption. *J Cat Refr Surg*. 1998;24:536-542.
26. Assia EI, Apple DJ, Morgan RC.: The relationship between the stretching capability of the anterior capsule and zonules. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1991;32:2835-2839.
27. Nishikawa S, Okisaka S.: The tension of zonule and aging changes of ciliary bodies. *Nippon Ganka Gakkai Zasshi*. 1992;96:721-730.
28. Strenk SA, Semmlow JL, Strenk LM.: Age-related changes in human ciliary muscle and lens: a magnetic resonance imaging study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1999;40:1162-1169.
29. Koretz JF, Kaufman PL, Neider MW, et al.: Accommodation and presbyopia in the human eye: aging of the anterior segment. *Vision Res*. 1989;29:1685-1692.
30. Weeber HA, Martin H.: The role of the capsular bag in accommodation. In Guthoff R, Ludwig K: *Current Aspect of Human Accommodation II*, Kaden, Heidelberg. 2003;119-126.
31. Fisher RF.: Presbyopia and the changes with age in the human crystalline lens. *J Physiol*. 1973;228:765-779.
32. Glasser A, Campbell MCW.: Biometric, optical and physical changes in the isolated human crystalline lens with age in relation to presbyopia. *Vis Res*. 1999;39:1991-2015.
33. Young T.: On the mechanism of the eye. *Philos Transact*. 1801;23.
34. Cramer A.: *Het Accommodatievermogen der Oogen*, Physiologist Toegelicht. Haarlem, Netherlands: De Erven Loosjes. 1853.
35. Glasser A, Troilo D, Howland HC.: The mechanism of corneal accommodation in chicks. *Vis Res*. 1994;34:1549-1566.
36. Sivak JG, Hildebrand T, Lebert C.: Magnitude and rate of accommodation in diving and nondiving birds. *Vis Res*. 1985;25:925-933.
37. Rohen JW.: Scanning electron microscopic studies of the zonular apparatus in human and monkey eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1979;18:133-144.
38. Glasser A, Kaufman PL.: The mechanism of accommodation in primates. *Ophthalmology*. 1999;106:863-872.
39. Simón-Tor JM, Simón-Castellví G, Simón-Castellví Sl.: The history of presbyopia. In Agarwal A.: *Presbyopia - A Surgical Textbook*, Slack Inc., Thorofare. 2002;3-15.
40. Kepler J.: *Dioptrice, seu demonstratio eorum, quae visui et visibilibus propter conspicilla non ita pridem inventa accidunt*. Augsburg: Frank. 1611.
41. Werner LP, Werner L, Pandey SK, et al.: Physiology of accommodation and presbyopia. In Agarwal A: *Presbyopia - A Surgical Textbook*, Slack Inc., Thorofare. 2002;29-34.
42. Cramer A.: *The accommodative ability of the eyes*. Natuurkundige Verhandelingen van de Hollandsche Maatschappij der Wetenschappen [Physical Publication by the Dutch Society of Sciences] in Haarlem, VIII. 1853.
43. Crampton P.: The description of an organ by which the eyes of birds are accommodated to the different distances of objects. *Thompson's Annals of Philosophy*. 1813;1:170-174.
44. Glasser A, Troilo D, Howland HC.: The mechanism of corneal accommodation in chickens. *Vis Res*. 1994;34:1549-1566.
45. Koopmans S.: The accommodative ability of the eyes: Preface. In Guthoff R, Ludwig K: *Current Aspect of Human Accommodation I*, Kaden, Heidelberg. 2001;172-173.
46. von Helmholtz H.: *Bericht zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königl. Preuss. Akademie der Wissenschaften*, Berlin: Verl. D. Kgl. Akad. D. Wiss., Februar. 1853.
47. von Helmholtz H.: *Ueber die accommodatio des auge*. Graefe's Arch für Ophthalmologie. 1855;1:1-74.
48. von Helmholtz H.: *Physiological Optics*. Vol I. Dover, New York. 1962;143-415.
49. Müller H.: Über einen ringförmigen muskel am ciliarkörper. *Arch für Ophthalmologie*. 1857;III:1; IV:2.
50. Rouget C.: *Recherches anatomiques et physiologiques sur les appareils érectiles*. Appareil de l'adaptation de l'oeil. *C R Soc de Biol*. 1856;113.
51. Tscherning M.: *Étude sur le mécanisme de l'accommodation*. Arch De Phys. 1894.
52. Schneider H, Bacskulin A, Guthoff R.: History of accommodation research. In Guthoff R, Ludwig K: *Current Aspect of Human Accommodation II*, Kaden, Heidelberg. 2001;11-23.
53. von Pflugk, A.: *Neue Wege zur Erforschung der Lehre von der Akkommodation*. Albrecht von Graefe's Arch. Ophthalmol. 1935;133:545-558.
54. Schachar RA.: Cause and treatment of presbyopia with a method for increasing the amplitude of accommodation. *Ann Ophthalmol*. 1992;24:445.
55. Gullstrand A.: *Einführung in die Methoden der Dioptrik des Auges des Menschen*. Leipzig, Germany: Bergmann. 1911.
56. Ravin JG.: Gullstrand, Einstein, and the Nobel Prize. *Arch Ophthalmol*. 1999;117:670-672.
57. Fincham EF.: The mechanism of accommodation. *Br J Ophthalmol*. 1937;8:5-80.
58. Fincham EF.: The changes in the form of the crystalline lens in accommodation. *Trans Opt Soc*. 1924;26:239.
59. Last RJ.: *The eyeball*. In Wolff E.: *The Anatomy of the Eye and orbit*. 6th ed. WB Saunders, Philadelphia. 1968.
60. Tscherning M.: *Physiologic Optics: Dioptrics of the Eye, Functions of the Retina, Ocular Movements, and Binocular Vision*. 2nd ed. Keystone, Philadelphia. 1904;160-189.
61. Schachar RA, Black TD, Kash RL, et al.: The mechanism of accommodation and presbyopia in the primate. *Annals of Ophthalmology*. 1995;27:58-67.
62. Schachar RA, Cudmore DP, Torti R, et al.: A physical model demonstrating Schachar's hypothesis of accommodation. *Annals of Ophthalmology*. 1994;26:4-9.
63. Schachar RA, Tello C, Cudmore DP, et al.: In vivo increase of the human lens equatorial diameter during accommodation. *Am J Physiol*. 1996;271:670-676.

64. Schachar RA, Anderson DA.: The mechanism of ciliary muscle function. *Ann Ophthalmol.* 1995;27:126-132.
65. Schachar RA.: Zonular function: A new hypothesis with clinical implications. *Ann Ophthalmol.* 1994;26:36-38.
66. Schachar RA, Cudmore DP, Black TD.: Experimental support for Schachar's hypothesis of accommodation. *Arch Ophthalmol.* 1993;25:404.
67. Schachar RA.: The mechanism of accommodation and presbyopia: The scleral expansion band procedure. In Agarwal A: *Presbyopia: a surgical textbook*, Slack, Inc., Thorofare. 2002;37-49.
68. Marg E.: Accommodative response of the eye to electrical stimulation of the ciliary ganglion in cats. *Am J Optom Arch Acad Optom.* 1953;31:127-136.
69. Crawford K, Terasawa E, Kaufman PL.: Reproducible stimulation of ciliary muscle contraction in cynomolgus monkey via a permanent indwelling midbrain electrode. *Brain Res.* 1989;503:265-272.
70. Glasser A.: Edinger-Westphal stimulated accommodation in monkeys. In Guthoff R, Ludwig K: *Current Aspect of Human Accommodation II*, Kaden, Heidelberg. 2001;53-69.
71. Fisher RF.: Elastic constants of the human lens capsule. *J Physiol.* 1969;201:1-19.
72. Krag S, Olsen T, Andreassen T.: Biomechanical characteristics of the human anterior lens capsule in relation to age. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1999;38:357-363.
73. Fisher RF.: The elastic constants of the human lens. *J Physiol.* 1971;212:147-180.
74. Koretz JF, Handelman GH.: The "lens paradox" and image formation in accommodating human eyes. In Duncan G: *The lens: Transparency and cataract. Topics in Aging Research in Europe.* 1986;6:57.
75. Farnsworth PN, Shyne SE.: Anterior zonular shifts with age. *Exp Eye Res.* 1979;28:291-297.
76. Koretz JF, Handelman GH.: Modeling age-related accommodative loss in the human eye. *Mathematical Modeling.* 1986;7:1003.
77. Koretz JF, Handelman GH.: How the human eye focuses. *Sci Am.* 1988;259:92-99.
78. Handelman GH, Koretz JF.: A mathematical representation of lens accommodation. *Vision Res.* 1982;22:924-927.
79. Koretz JF, Handelman GH.: A model of the accommodative mechanism in the human eye. *Vision Res.* 1982;22:917-924.
80. Brown N.: The change in lens curvature with age. *Exp Eye Res.* 1974;19:175.
81. Bitto LZ.: Miranda OC Accommodation and presbyopia. In Reinecke RD: *Ophthalmology Annual*, Raven Press, New York. 1989.
82. Pierscionek BK, Weale RA.: Presbyopia: a maverick of human aging. *Arch Gerontol Geriatr.* 1995;20:229.
83. Tamm S, Tamm E, Rohen JW.: Age-related changes of the human ciliary muscle: a quantitative morphometric study. *Mech Age Dev.* 1992;62:209-221.
84. Duane A.: Studies in monocular and binocular accommodation with their clinical applications. *Am J Ophthalmol.* 1922;5:867-877.
85. Duane A.: Accommodation. *Arch Ophthalmol.* 1931;5:1-14.
86. Weale RA.: Presbyopia toward the end of the 20th century. *Surv Ophthalmol.* 1989;34:15-30.
87. Weale RA.: Evolution, age and ocular focus. *Mech Ageing Dev.* 1990;53:85-89.
88. Lütjen-Drecoll E, Tamm E, Kaufman PL.: Age-related loss of morphologic responses to pilocarpine in the rhesus monkey ciliary muscle. *Arch Ophthalmol.* 1988;106:1591-1598.
89. Bacskulin A, Martin H, Kundt G, et al.: Analyse der Dynamik des Ziliarmuskels während der Akkommodation. *Ophthalmologe* 2000;97:855-859.
90. Tamm E, Croft M, Jungkunz W, et al.: Age-related loss of ciliary muscle mobility in the rhesus monkey. Role of the choroid. *Arch Ophthalmol.* 1992;110:871-876.
91. Glasser A, Campbell MCW.: Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age. *Vision Res.* 1998;38:209-229.
92. Martin H, Schmidt W, Schmitz K-P, et al.: Material properties of the isolated human capsular bag. In Guthoff R, Ludwig K.: *Current Aspect of Human Accommodation II*, Kaden, Heidelberg. 2003;127-133.
93. Fisher RF.: Presbyopia and the changes with age in the human crystalline lens. *J Physiol.* 1973;228:765-779.
94. Bowman W.: *Lectures delivered on the London Royal Ophthalmic Hospital.* London: Moorfields. 1847.
95. Dubbelman M, Van der Heijde GL.: The shape of the aging human lens: curvature, equivalent refractive index and the lens paradox. *Vis Res.* 2001;41:1867.
96. Pierscionek BK.: What we know and understand about presbyopia. *Clin Exp Optom.* 1993;76:83.
97. Smith G, Atchison DA, Pierscionek BK.: Modeling the power of the aging human eye. *J Opt Soc Am A.* 1992;9:2111.
98. Streeten BW.: Zonular apparatus. In Jakobiec FA.: *Ocular Anatomy Embryology and Teratology.* Harper&Row, Philadelphia. 1982;331-353.