

Review article

## Lens Tasarımcısının Optik Lens Geliştirme Süreçleri Lens Designer's Optical Lens Development Processes

Melike Güzin Semercioğlu \*

Department of Optician, Gümüşhane University, Gümüşhane, Turkey

### Özet

Teknolojinin gelişmesi ile bilgi işlem gücü artmış, bilimsel hesaplama yapma yeteneği de hızla gelişmiştir. Gelişen teknolojinin etkilediği alanlardan biri de optik alanıdır. Lens tasarımı, içerisinde lens optimizasyonu, ışın izi analizi, lens çizimi, modülasyon transfer fonksiyon hesaplamaları gibi birçok alt yapıyı içinde barındıran karmaşık bir çalışma alanıdır. Optik lens tasarımı, maliyet ve üretim sınırlamaları dahil olmak üzere bir dizi performans gereksinimini ve kısıtlamasını karşılayacak bir lens tasarlama sürecidir. Bu lens tasarım süresi, merceğin içinden geçen ışığın nasıl etkilendiğini modellemek için ışın izleme tekniğinin veya diğer tekniklerin kullanarak hesaplanması açısından oldukça karmaşıktır. Ancak optik ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, birçok çalışmanın optik sistemler hakkında ayrıntılı bilgi verdikleri ancak lens tasarımı ve prosedürleri hakkında yeterli açıklama yapmadıkları belirlenmiştir. Bu çalışmada okuyucunun ışın izleme prosedürlerine, eksen dışı verilere ve üçüncü dereceden sapmalara aşına olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca okuyucunun lens tasarımı ve analiz yapılmasına yönelik bir bilgisayar yazılımına erişimi olduğu varsayılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, bir lensin tasarım sürecinin en başından, (son ürün olan) lensin çizimine kadar ki süreç ayrıntılı bir şekilde açıklanmaya çalışılmıştır. Araştırmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünölmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Lens tasarımı, Küresel ve küresel olmayan yüzeyler, İmalat toleransı, Optik camlar.

### Abstract

The development of technology with computing power has increased, and the ability to make scientific calculations has developed rapidly. One of the areas is affected by the developing technology in optics. Lens design is a complex field of study that includes many infrastructures for example; lens optimization, ray trace analysis, lens drawing, modulation transfer function calculations. Optical lens design is the process of designing a lens that will meet a number of performance needs and constraints, including cost and manufacturing limitations. This process is computationally intensive, using ray tracing or other techniques to model how the lens affects the light passing through it. However, when the studies on optics are examined, it has been determined that many studies give detailed information about optical systems, but do not provide sufficient explanation about lens design and procedures. In this study, it is assumed that the reader is familiar with ray tracing procedures, off-axis data, and third-order aberrations. It is also assumed that the reader has access to a computer lens design and analysis program. In this direction, within the scope of the study, the design process of a lens has been tried to be explained in detail from the very beginning to the drawing of the final product, the lens. It is thought that the research will contribute to the literature.

**Keywords:** Lens design, Spherical and aspherical surfaces, Manufacturing tolerance, Optical glass.

Received: 10 April 2022 \* Accepted: 16 June 2022 \* DOI: <https://doi.org/10.29329/ijiasr.2022.454.8>

\* Corresponding author:

Melike Güzin Semercioğlu, Department of Optician, Gümüşhane University, Gümüşhane, Turkey.  
Email: melikesemercioğlu@gumushane.edu.tr

## GİRİŞ

Optik lens tasarımı, sahip olduğu maliyet ve gerekli üretim sınırlamaları dahil olmak üzere bir dizi performans ihtiyacını ve kısıtlamasını karşılayacak bir lens tasarlama sürecidir. Karakteristik özellikler arasında yüzey profili türleri (sferik, asferik, holografik, kırınımlı, vb.), eğrilik yarıçapı, bir sonraki yüzeye uzaklık, malzeme türü ve isteğe bağlı olarak eğme ve merkezsizlik yer alır. Bu lens tasarım süresi, merceğin içinden geçen ışığın nasıl etkilendiğini modellemek için ışın izleme tekniğinin veya diğer tekniklerin kullanarak hesaplanması açısından oldukça karmaşıktır. Performans gereksinimleri aşağıdaki maddeleri içerebilir (Fisher vd., 2008; Strehl, 1895; Strehl, 1902):

1. Optik performans (görüntü kalitesi): Bu, Strehl oranı<sup>1</sup>, hayalet yansıma kontrolü ve göz bebeği performansı (boyut, konum ve sapma kontrolü) dahil olmak üzere çeşitli ölçümlerle belirlenir.
2. Ağırlık, statik hacim, dinamik hacim, ağırlık merkezi ve genel yapılandırma ihtiyaçları gibi fiziksel ihtiyaçlar performans değerlendirmesinde dikkate alınır.
3. Basınç, titreşim, sıcaklık ve elektromanyetik koruma aralıkları gibi çevresel faktörler de performansı etkilemektedir.

Optik lense ait tasarım kısıtlamaları incelendiğinde; merkez ve kenar kalınlıkları, lensler arasındaki minimum ve maksimum hava boşlukları, giriş ve çıkış açılarındaki maksimum kısıtlamalar, fiziksel olarak gerçekleştirilebilir cam kırılma indisi ve dağılma özellikleri gibi maddeleri kapsamaktadır. Optik lenslerdeki üretim maliyetleri ve teslimat programları da optik tasarımın önemli bir parçalarıdır. Belirli boyutlardaki bir optik camın fiyatı; camın boyutuna, camın türüne, bulunabilirliğine, indisine ve homojenlik kalitesi gibi ana özellikler ile elli veya daha fazla yan özelliğin içeriğine göre değişebilmektedir.

### Lens tasarımcısı ile üretici arasındaki ilişkiler

Lens tasarımcısı, üretici ile uyumlu çalışmalıdır çünkü tasarladığı lenslerin üretimi tasarımcının hedefleri ile uyumlu olmalıdır. Bununla birlikte tasarımcı çeşitli üretim süreçleri hakkında bilgi sahibi olmalı ve hatta optik mühendisleriyle yakın çalışmalıdır. Lens elemanlarının maliyetli olduğunu göz önünde bulundurarak (eğer maliyet önemli ise) mümkün olduğunca maliyeti en aza indirmelidir. Bazen “görüntü kalitesi” en önemli unsur olarak dikkate alınır ve buradan hareketle merceğin karmaşıklığına veya boyutuna sınır konulmaksızın planlama yapılır. Sıklıkla, tasarımcı daha az eleman ve düşük fiyatlı cam türleri kullanarak ya da daha düz lens kullanarak tasarruf etmeye yönelmektedir.

---

<sup>1</sup> Strehl oranı, optik kalitesi ölçüsüdür, 0 ile 1 arasında değer alır.

## Lens üretim işlemleri

Lensler önce görüntüleri ve göz bebeklerini konumlandırmak için paraksiyal teori<sup>1</sup> kullanılarak tasarlanabilir. Ardından gerçek yüzeyler yerleştirilebilir ve optimize edilebilir. Paraksiyal teori, daha karmaşık olmayan durumlarda kullanılmaması gündeme gelebilir ve ilgili lens gerçek yüzeyler kullanılarak doğrudan optimize edilebilir.

Lensler ilk olarak cam üreticisinin katalogunda yayınlanan ortalama kırılma ve dağılma indisi (Abbe değerine göre) özellikleri ve cam modeli hesaplamaları kullanılarak tasarlanır. Ancak gerçek cam boşluklarının hesabında bazı sıkıntılar yaşanabilir. Örneğin; kırılma indisi değerleri, katalog değerlerinden 0.0003'e kadar veya daha fazla oranda değişebilir ve dağılım biraz farklılık gösterebilir. İndis ve dağılımdaki bu değişiklikler, bazen yüksek düzeyde düzeltilmiş sistemlerde lens odak konumunu ve görüntüleme performansını etkilemek için yeterli olabilir.

Tüm ön işlemler hazırlandıktan sonra lens üretimin süreçlerini incelediğimizde;

- a) Önceden belirlenmiş ve uygun olduğu düşünülen cam türü için toz haline getirilmiş karışık cam yığını oluşturma,
- b) Toz karışımı bir fırında eritme,
- c) Homojenliği artırmak için sıvı haline gelen camı sık sık karıştırma,
- d) Lens kalıplarına dökme,
- e) Deneysel olarak belirlenen zaman ve sıcaklık çizelgelerine göre tavlama olacak şekilde lense oluşturma.

Yukarıda bahsedilen sürecin içerisinde erimiş camdan ve farklı konumlardan örnekler alınarak hassas prizmalar yapılır. Bunların kırılma indisi bir spektrometrede beş ya da daha fazla dalga boyunda ölçülerek belirlenir. Lens tasarım programları, erimiş camdan elde edilen bu verileri belirli bir dağılım eğrisine uyarlayabilme özelliğine sahiptir ve dalga boyu aralığı içindeki herhangi bir dalga boyuna ait kırılma indisi hesaplanır. Daha sonra yeniden optimizasyon yapılır ve erimiş cam yeniden sıkıştırılır. Tekrar belirlenen kırılma indisi de kullanılarak lens tasarımı gerçekleştirilir. Üretildiğinde ortaya çıkan lens performansı, kırılma indisi için ortalama cam katalogunda yer alan kırılma indislerine kıyasla ihtiyaçları daha iyi karşılayacaktır.

Lenslerin teslimat programları, camın bulunabilirliğinden ve bulunan camın üreticiye teslim edilme sürelerinden, bir atölyenin bir projeye başlamadan önce imal etmesi gereken araç miktarından,

---

<sup>1</sup> Geometrik optik genellikle paraksiyal yaklaşım ya da "küçük açı yaklaşımı" ile basitleştirilir. Bunun sonucunda matematiksel işlemler doğrusal olur. Böylece optik bileşenler ve sistemler basit matrislerle açıklanabilir. Bu Gaussyan optiğin temelidir ve paraksiyal ışın izleme ile birlikte bir optik sistemin resim ve nesnenin yaklaşık konumu, büyütme gibi temel özelliklerini bulmada kullanılır (Greivenka, 2004).

parçalardaki üretim toleranslarından (daha dar toleranslar, daha uzun üretim süreleri anlamına gelir), etkilenmektedir. Bitmiş lenslere uygulanması gereken optik kaplamalar, lens elemanlarının genel lens sistemi düzeneğine monte edilmesi, şart olan herhangi bir montaj sonrası hizalama işlemi, kalite kontrol testi ve üretim araçlarının yoğunluğuna göre lens üretim maliyetleri etkilenmektedir.

### **Lens optimizasyonu**

Basit bir iki elemana sahip, hava boşluklu lensin dokuz adet farklı değişkeni vardır (dört tanesi eğrilik yarıçapı, iki tanesi kalınlık, bir tanesi hava boşluğu kalınlığı ve iki tanesi cam türü). Geniş bir spektral bant ve görüş alanı üzerinden birbirinden farklı odak uzunluklarında ve gerçekçi bir sıcaklık aralığında düzeltilen çok konfigürasyonlu bir lens, yüzden fazla boyuta sahip karmaşık bir tasarım hacmine sahip olabilir.

Dijital araçlar ve özellikle paket programlar geliştirilmeden önce lens optimizasyonu yani iki boyutlu kesikler çizmek için trigonometrik ve logaritmik tablolar kullanılarak, manuel olarak yapılan hesaplamalar ile sağlanırdı. Ancak günümüzde bilgisayar aracılığıyla yani dijital olarak ışın izleme yapılır ve böylelikle bir lensin performansının hızlı bir şekilde modellenmesine olanak tanınır. Bu durum da bilgisayarlar, tasarım anlayışlarının hızla geliştirilmesini sağlamaktadır.

Bahse konu olan ve günümüzde popüler olarak kullanılan optik tasarım yazılımları arasında; Zemax OpticStudio, Synopsus Kod V ve Lambda Research Oslo gibi paket programlar yer almaktadır. İlgili programlar kullanılırken, tasarımcı ilk önce optik sistem için program içerisinde uygun bir tasarım seçmelidir. Daha onu iyileştirmek için programlar yardımıyla sayısal modelleme kullanır (Fischer vd., 2008). Sonuç olarak tasarımcı, programlar tarafından optimize edilen tasarımların tüm ihtiyaçları karşılamasını beklemektedir. İhtiyaçları giderecek ayarlamalar yapmazsa, tasarım başarısız olur ve tasarım işleminin yeniden başlatması gerekebilir.

### ***Lens optimizasyonlarının değişkenlerine bakış***

#### ***a. Küresel ve küresel olmayan yüzeyler***

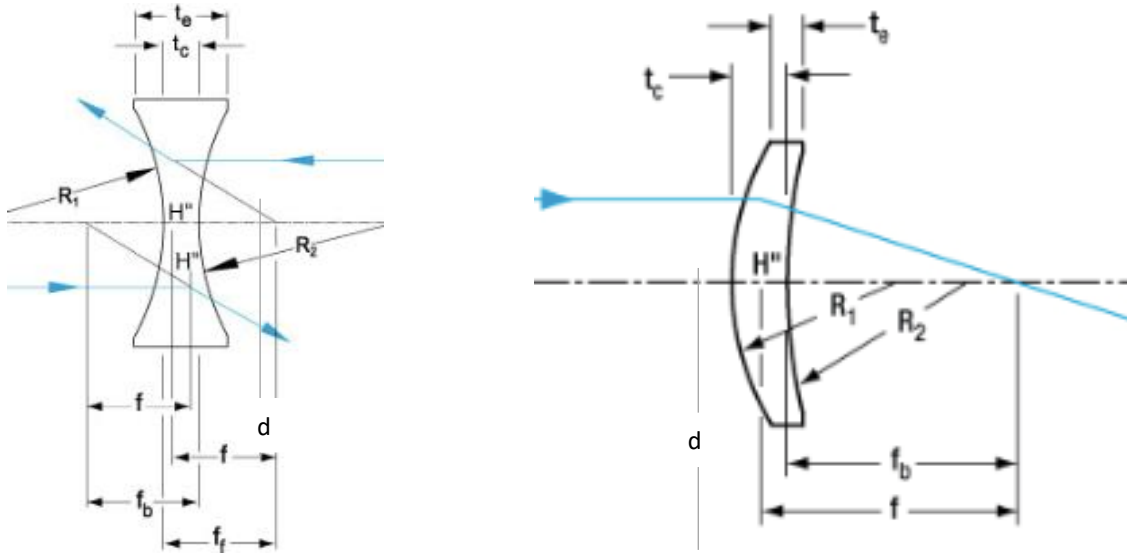
Küresel lens üretim süreçleri, en iyi netlik (doğruluk) ve küresel yüzeyler üretmeyi kapsar. Ancak tasarımcının küresel olmayan (asferik) yüzeyleri kullanma girişimi oldukça zor üretim sorunlarına yol açabilmektedir. Sonuç olarak bu tür yüzeyler yalnızca başka çözüm bulunamadığında kullanılır (Johnson, 1990; Feder, 1968; Levenberg, 1944).

Asferik yüzeylerin oluşturulma ve parlatma problemine ek olarak merkezleme durumu da bulunmaktadır. Küresel yüzeylere sahip ortalanmış lensler, tüm yüzeylerin eğrilik merkezlerini içeren bir optik eksene sahiptir. Ancak asferik bir yüzeyin sistemdeki diğer eğrilik merkezlerini içeren eksenle çakışması gereken kendi bağımsız ekseni vardır. Kullanımı oldukça zor olsa da son yıllarda bu durum önemli ölçüde değişim göstermiştir. Asferik lensler, öncelikle makul bir zaman çerçevesinde ve makul

bir maliyetle kaliteli yüzeyler sağlayan üretim teknolojilerindeki gelişmeler nedeniyle tasarımlara daha yaygın olarak dahil edilmeye başlamıştır. Lens tasarımcısının, hangi camların taşlama, hangi camların diğer işlemlerle kalıplanabileceğini ve asferik hale getirilebileceğini bilmesi oldukça önemlidir.

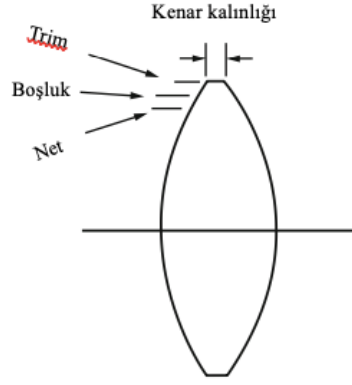
### **b. Kalınlıkların belirlenmesi**

Negatif güçlü lens elemanları, lens çapının %6 ila %10'u arasında bir merkez kalınlığa sahip olmalıdır (Şekil 1). Ancak pozitif bir elemanın kalınlığının belirlenmesi çok daha fazla dikkate alınmasını gerektirir.



**Şekil 1.** d: dia (çap); f: odak uzaklığı; fb: arka odak uzaklığı; ff: ön odak uzaklığı; R: eğrilik yarıçapı; tc: merkez kalınlığı; te: kenar kalınlığı; H'': arka asıl düzlem

Lensin yapıldığı boş cam, taşlama ve cilalama işlemleri sırasında tutulabilmesi için en az 1 mm kenar kalınlığına sahip olmalıdır (Şekil 2). Merceğin kenarları trim çapına göre en az 1 mm çıkarılacaktır ve yuvada destek için en az 1 mm yarıçapa daha ihtiyaç vardır. Ancak bu paylar akılda tutularak ve yüzey eğrilikleri bilinerek, pozitif bir merceğin kabul edilebilir minimum merkez kalınlığı ile belirlenebilir. Bu özel sınırlamalar, ortalama boyutta (örneğin 1/2 ile 3 inç arası çapında) bir lense uyarlanabilir; küçük lensler için biraz azaltılabilir ve büyük lensler için artırılabilir. Bıçak kenarlı bir lense yapmak ve kullanmak çok zordur ve mümkün olduğunca kaçınılmalıdır (Brixner, 1978; Jones ve Forbes, 1995; Greivenkamp, 2004).

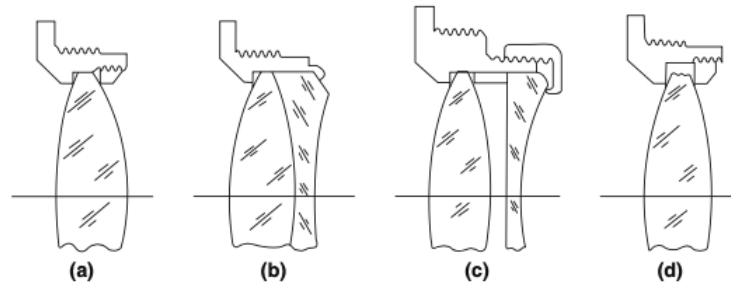


**Şekil 2.** Lensin trim ve net çapları

Şekil 2'de gösterilen net ve trim çapları arasındaki boşluğun merceğin tutulduğu yer olduğunu unutmamak oldukça önemlidir. Bu tür merceklerde, bazı özel sınırlamaların göz önünde bulundurulmaması görüntünün merkezde daha parlak ve doygun, merceğin kenarlarında ise daha bulanık ve karanlık olmasına neden olan “vinyet” etkisine neden olabilmektedir. Buradan hareketle lens tasarımcısının, montajın herhangi bir ışın üzerinde vinyet etkisi oluşturmayacağından emin olması gerekmektedir.

Genel bir kural olarak, bir blok üzerinde birden fazla lens birlikte cilalanabileceğinden, zayıf lens yüzeylerini yapmak güçlü yüzeylerin yapılmasından daha ucuzdur. Ancak, yalnızca tek bir lens yapılırsa, birden fazla blok kullanılmayacaktır ve bu durumda güçlü bir yüzey, zayıf olandan daha düşük maliyetle elde edilecektir. Unutulmaması gereken bir başka nokta ise, eşkonvekse yakın olan bir lensin hata ile arkadan öne doğru yapıştırılması ihtimalidir. Böyle hatanın önüne geçmek için eşkonvekse yakın değere sahip bir lens, mümkünse eşkonveks yapılmalıdır. Bir başka önemli nokta ise, iki lens arasında çok küçük bir kenar ayrımı elde etmenin çok zorluğudur. Bunun önüne geçebilmek için, lenslerin net çapından biraz daha büyük çapta temas etmesini sağlamak gerekmektedir ya da bir ara halkası kullanılarak veya sert bir montaj parçası kullanarak kenar ayrımı artırılmalıdır.

Bazı lens montaj biçimleri şekil 3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Bazı tipik lens yuvaları: (a) Kelepçe halkası, (b) dönen dudak, (c) ara parçası ve vidalı kapak, (d) yuva merkezleme

Bir lens tasarırken ne tür montaj yapılacağı ve hizalama için kullanılacak fiziksel ayarlamalar göz önünde bulundurularak modellenmesinin yapılması gerekmektedir. Bu sayede genel lens geliştirme projesinin ilerlemesi daha sorunsuz hale getirilebilir. Yapılan bir çalışmaya göre, bir merceğin optomekanik yapısının daha büyük bir sisteme entegre edilebilmesi ve yüksek düzeyde performansını gerçekleştirmesini sağlamak için tasarım aşamasında modellenmesi gerekmektedir (Yoder, 1995a, 1995b, 2005; Doyle, Genberg ve Michels, 2005).

### ***c. Kaplamalar***

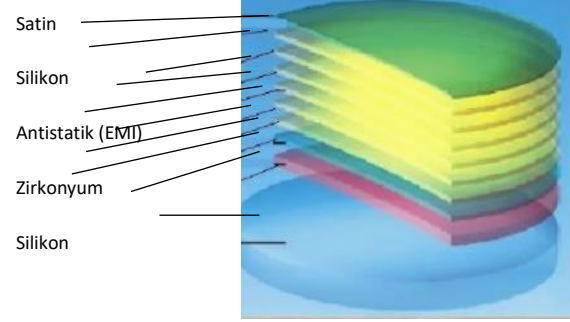
Günümüzde tüm cam-hava mercek yüzeylerinde ışık iletimini iyileştirmek ve hayalet görüntüleri ortadan kaldırmak için yansıma önleyici bir kaplama geliştirilmiştir. Bu kaplamadan farklı olarak (daha çok sert kaplamalarda), büyük bir vernik tankında da kaplanan lensler şaşırtıcı derecede ucuza mal edilmektedir. Fakat sert kaplama sadece organik ve polikarbon lensler için uygulanan bir yöntem olup amaç darbelere ve çizilmelere karşı daha iyi ve daha pürüzsüz lens yüzeyi elde etmektir.

Lensler özel solüsyonlar içeren ultrasonik banyolardan geçirildikten sonra her lens cinsine ve indisine göre vernik tanklarına özel tutucular yardımı ile içeriye daldırılma prensibi ile kaplanmaktadır (Tora, 2021). Özel olarak hazırlanmış bu verniklerle kaplanıp mükemmel bir yüzeye sahip olan lensler bu özelliklerine bir de sağlamlık kazandırılması için 110°C de fırınlanırlar. Ancak, geniş bir dalga boyu aralığında yüzey yansımalarının en eksiksiz şekilde ortadan kaldırılması için çok katmanlı bir kaplama daha (antirefle kaplamalarda) gereklidir. Çift kaplamalı lenslerin maliyeti yüksektir. Yansıması minimuma inen lensin geçirgenliği artar ve bu sayede lensin sağladığı görme yeteneği artmış olur. Bununla birlikte kullanıcının gözleri de daha parlak ve daha net görür.

Antirefle kaplama için özel laboratuvarlar gereklidir (Black, 1955). Bu uygulamanın yapıldığı laboratuvarlarda hijyen de çok önemlidir. Kaplama laboratuvarı havayı dışarı çıkaran ve sirkülasyon sağlayan bir hepa filtre sistemine sahip olmalıdır. Ayrıca bu ortamın sahip olduğu nem durumu ve sıcaklık değerleri de oldukça önemlidir. Sonuçta yansıma önleyici kaplama özel şartlar ve yüksek maliyetli teknik aletler gerektirdiğinden oldukça maliyetlidir (Brixner, 1978, 1981).

Kaplama yüzeyi oluşturulduktan sonra sırasıyla farklı materyaller yüzeye atılır. Şekil 4'te bahse konu ilgili materyaller verilmiştir:

- Vernik (sert kaplamada her indis cama göre vernik)
- Krom
- Silikon
- Zirkonyum
- Silikon
- zirkonyum
- Antistatik (EMI)
- Silikon
- Satin



**Şekil 4.** Kaplama yüzeye uygulanan materyaller

Kaplama yüzeyine uygulanan krom; camlara renk vermeye yarayan ve hem iyi bir iskelet hem de yapışkan bir yüzey oluşturan bir maddedir. Bir diğer madde olan silikon, içerik diğer adı kuvarstır. Bu madde de yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır. Zirkonyum oksit ise içerik açısından yapı sağlamlığına büyük katkı sağlamaktadır. Bu noktada hem silikon hem de zirkonyum kaplama hemen hemen aynı özelliklere sahiptir ancak aynı anda kullanıldığında dalga boylarında ışığın yansımalarını en aza indirmektedir. Antistatik (EMI) materyali İngilizce kökenlidir ve zararlı radyasyon ışınlarını engelleyen bir yapıya sahiptir. Özellikle televizyon ve mobil aygıtlar gibi radyasyon yayan cihazların zararlı etkisini önlerken ve cam yüzeyine yapışan tozların oluşmasını engellemektedir. Son olarak satin; kaplamamın en son ve belki de en estetik materyalidir. Satin uygulaması lense yapıldıktan sonra lens yüzeyine neredeyse mükemmel bir parlaklık meydana gelmektedir. Bu parlaklık yansımaları önlemede kullanılan pürüzlü yapıyı pürüzsüz, kaygan ve olabildiğince kolay bir şekilde silinebilir hale getirmektedir.

#### ***d. Birleştirme – Çimentolama***

İkili (çiftli) mercek, iki basit merceğin eşleştirilmesi ile oluşturulur. Tüm mercek kısımlarının (elemanlarının) yanında “mercekler arasındaki boşluk” da ikili merceğin bir elemanı olarak kabul edilir. Mercekler arasındaki boşluğun mercek elemanı kabul edilmesiyle kalınlık ve formülasyonda daha fazla ek serbestlik derecesi oluşturulur. Optik tasarımcılar, ek serbestlik derecesinden faydalanarak, daha fazla optik sapmaya müdahale ederek daha kapsamlı düzeltme esnekliğine sahip olabilirler (Kingslake, 2010).

İkili merceklerin yağlı, çimentolu (yapıştırılmalı ve hava boşluklu (çimentosuz-yapıştırmasız) olmak üzere üç farklı çeşidi mevcuttur (Greivenkamp, 2004). Çoğu ikili mercek, kromatik sapmayı azaltmak ve aynı zamanda küresel sapmayı ve diğer optik sapmaları azaltmak için optimize edilmiş akromatlardır (Clarkson ve Levi-Setti, 1975). İkili lensler, farklı kırılma indislerine ve farklı dağılım miktarlarına sahip camlardan yapılmıştır. Genellikle bir eleman crown camdan ve diğeri flint camdan yapılmaktadır. İkili mercekler, basit bir lensten daha iyi bir görüntü üretebilmektedir. Yağlı çiftler, yüzey gerilimini kullanarak optik sıvıyı yerinde tutmaktadır. Mercek ve camların farklı termal ortamlarda farklı oranlarda genleşmesine ve dolayısıyla sert çimentoların bükülmesine veya kırılmasına



neden olduğu durumlarda; yağ ya da yumuşak çimentoların kullanılması tercih edilir (Carson, 2011; Kingslake, 2010).

Sert çimentolu bir ikilide, lensler optik olarak şeffaf epoksi gibi mekanik mukavemete sahip bir yapıştırıcı ile bir arada tutulur. Çimento tabakası ışın izlemede her zaman göz ardı edilir, ışın doğrudan bir camdan diğerine kırılır. Küçük lens elemanları genellikle Kanada balsamı veya uygun bir organik polimer kullanılarak birbirine yapıştırılır. Bununla birlikte, çapı yaklaşık 3 inçten büyük olan lenslerde, sert çimento kullanıldığında crown ve flint camların farklı genleşmeleri eğrilmeye ve hatta kırılmaya neden olabilir. Lensleri bir arada yapıştırmanın nedenleri (a) iki yüzeyli yansıma kayıplarını ortadan kaldırmak, (b) toplam yansımayı önlemek ve (c) iki güçlü elemanı tek, çok daha zayıf bir çimentoda birleştirerek montaja yardımcı olmaktır. İki güçlü elemanın merkezlenmesi, genellikle lens yuvası yerine yapıştırma işlemi sırasında gerçekleştirilir. İki'den fazla lens elemanının birlikte yapıştırılması yapılabilir, ancak tüm çimentolu bileşenin mükemmel şekilde merkezlenmesini sağlamak çok zordur. Tasarımcının, üçlü veya dördü çimentolu bir bileşen kullanmayı planlamadan önce imalat departmanına danışması gerekmektedir. Lenslerin hassas bir şekilde yapıştırılması, düşük maliyetli bir işlem değildir ve yuvada hava boşluğu bulunan iki yüzeyi kaplamak, bu yüzeyleri birbirine yapıştırmak yerine genellikle daha ucuzdur.

İkili lens yüzeyleri arasına yumuşak verimli çimentolar veya bir sıvı yağ eklenebilir, ancak bazı ikili lens arasında hiçbir yapıştırıcı kullanılamaz. Büyük boyutlarda yüzeyleri gerçek bir ara halka ile ayırmak daha olağandır. Dolayısıyla bu optik tasarım harici sabitlemeye dayanır (Carson, 2011). Bunlara "çimentosuz", "hava boşluklu" veya "kırık teması" çiftler denir.

Hava boşluklu ikilinin bir alt tipi, diyalit mercektir. Bu mercek türünde kullanılan cam miktarını azaltmak için elemanlar geniş aralıklar yerleştirilebilir. Bu mercek tipi, farklı eğriliğe sahip elemanların yapıştırılmadığı durumlarda tercih edilir (Carson, 2011).

Lensler farklı neden/nedenlerden dolayı birbirine yapıştırılabilir: Lensler; ara yüzünün yansıma kayıplarını ortadan kaldırmak, hava filmi ara yüzünde toplam yansımayı önlemek ve mekanik montaj sınırlamalarına yardımcı olmak amacıyla yani güçlü mercekleri zayıf merceklerde en etkili şekilde birleştirmek amacıyla birbirine yapıştırılabilir (Kingslake, 2010).

Lens elemanlarını birleştirmenin pozitif ve negatif yönleri mevcuttur (Brixner,1978, 1981; Chipman, 1994; Thibault, vd., 2005).

### ***Pozitif Yönleri***

- İkili merceklerde yapıştırılan kısım göz ardı edilebilir. Dolayısıyla ışını kırıyormuş gibi davranır ve böylece ışın izleme işlemleri basitleştirebilir.
- Yapıştırılan gruplar, optik sistemin fiziksel uzunluğunu azaltmaya yardımcı olabilir.

- Sapmaları minimize etmek için daha iyi kontrol sağlar ve nispeten daha az elemanla gelişmiş optik sistemlerin geliştirilmesine fırsat verir.

### ***Negatif Yönleri***

- Yapıştırma elemanlarının, bileşenlerine doğru merkezleyebilmek yüksek hassasiyet gerektirir. Bu zorluk, eleman sayısıyla doğru orantılı bir şekilde artış gösterir.
- Hassasiyetin artması maliyetlerin artmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte iki hava boşluklu elemanı, yansıma önleyici materyal ile kaplamak genellikle daha ucuzdur.

### ***İmalat toleranslarının belirlenmesi***

Lens tasarımcısının bir lensin her boyutuna bir tolerans ataması önemlidir, çünkü bunu yapmazsa başkası yapar ve o kişinin toleransları tamamen yanlış olabilir (Gagné' vd., 2007). Toleranslar çok gevşek ayarlanırsa, zayıf bir lens ortaya çıkabilir ve çok sıkıysa üretim maliyeti artabilir. Tüm bunlar, yarıçaplar, kalınlıklar, hava boşlukları, yüzey kalitesi, cam indisi ve dağılımı, lens çapları ve merkezlemenin mükemmelliği için geçerlidir (Heiting, 2021). Bu toleranslar genellikle ayrı ayrı her parametreye küçük bir hata uygulanarak ve hatanın etkilerini belirlemek için değiştirilen mercekten geçen ışınları izleyerek bulunur. Aslında en sıkı üretim toleranslarında bile, bir grup optik bileşen ortak bir etkin odak uzaklığı, sapma veya görüntüleme kalitesine sahip değildir. Bu parametrelerin analitik olarak belirlenmesi, çok sayıda değişken nedeniyle neredeyse imkansızdır. Tolerans olarak da adlandırılan gerekli doğruluk ve üretim toleranslarının belirtilmesi, bu nedenle genellikle tekrarlı adımlardan oluşan bir süreçtir (Black, 1955; Heiting, 2021). Bu süreç şu şekilde tanımlanabilir:

- Duyarlılık analizi, yani görüntüleme kalitesi üzerinde yüksek etkisi olan bir optik bileşen veya sistemin kritik yüzeylerinin tanımlanması, (Bu analiz, Seidel sapma tablolarına veya Seidel çubuk<sup>1</sup> grafiklerine dayalı olarak gerçekleştirilebilir.)
- Bir hassasiyet analizi sırasında tanımlanan ve izlenen kritik yüzeyleri önlemek veya azaltmak için eğrilik yarıçaplarını, lens malzemesi vb. değiştirerek veya uyarlayarak optik bileşenin veya sistemin nihai yeniden tasarımı,
- Monte Carlo simülasyonu<sup>2</sup>, yani cam kalitesindeki, yüzey doğruluğundaki, konumdaki vb. (kusur olarak adlandırılan) değişikliklerin, hedef görüntüleme kalitesi elde edilene kadar bu

<sup>1</sup> Seidel çubuk grafiği, bir optik sistemin her yüzeyi için Seidel katsayısını, bir çubuk grafiği veya sütun grafiği şeklinde görüntüler. Ayrıca belirli sapmaların kolayca seçilebildiği Seidel toplamını da içerir. Bu çubuk grafiğinde yalnızca optik arabirimleri değil, durma konumunu da dikkate alınır. Durdurmanın yüzeyi yıldızla (\*) işaretlenmiştir, Seidel çubuk grafiği, kritik yüzeylerin, yani belirli sapmanın tercihen meydana geldiği bir yüzeyin tanımlanması için yararlı bir araçtır.

<sup>2</sup> Monte Carlo simülasyonu, uygun hesaplama algoritmaları aracılığıyla rastgele örnekleme ve tekrardır. Bu bilgisayar tabanlı yaklaşım, çok sayıda girdi değişkeni içeren matematiksel görevler için sayısal sonuçlar elde etmek için uygulanır. Bunlar, örneğin kırılma indisi ve V-sayısı, yüzey şekli veya merkezlemedeki değişiklikler gibi tüm malzeme kusurlarını, yüzey sapmalarını konum hatalarını içerir.

tür kusurların art arda sınırlandırılması dahil olmak üzere, görüntüleme kalitesi üzerindeki etkisinin analizi.

Ayrıca cam indisi ve dispersiyon konusundaki toleransların bilinmesi, eldeki bir cam stoğunun kullanılabilmesi ile üretimi ciddi şekilde geciktirebilecek ve maliyeti artırabilecek sıkı bir toleransla cam sipariş etme gerekliliğinin önüne geçebilir. Tek bir yüksek kaliteli lens yaparken, katalog indisleri ile tasarlamak, ardından camı sipariş etmek ve ardından üreticiden alınan gerçek camı kullanmak için lensi yeniden tasarlamak alışılmalıdır. Öte yandan, yüksek üretimli bir lens tasarlarırken, tasarımın kırılma indisinde yaklaşık 0,0005 ve V değerinde %0,5'lik normal fabrika varyasyonuna uyarlamak gerekir (Brixner, 1981) Montajdaki kalınlıkları eşleştirmek, tek tek elemanlar üzerindeki üretim toleranslarını arttırmanın olası ancak pahalı bir yoldur. Çoğu zaman belirtmesi gereken en önemli toleranslar yüzey eğimi ve lens elemanının merkezden uzaklaşmasıdır. Bunları bilmek, montajın tasarımı ve sistemin üretilebilirliği açısından büyük bir etkiye sahip olabilir. Optik tolerans konusu başlı başına bir çalışmadır ve gerçekçi toleransların belirlenmesi oldukça zordur.

### **Optik materyaller**

En yaygın lens malzemesi elbette optik camdır, ancak kristaller ve plastikler sıklıkla kullanılır. Sıvı dolgululu lensler uzun zaman önce tasarlanmıştır, ancak birçok nedenden dolayı bunlar yakın zamana kadar hiç kullanılmamıştır (Andrew ve Forbes, 1995; Thibault, Gagne, Beaulieu ve Parizeau, 2005; Gagne, Beaulieu, Parizeau ve Thibault, 2007; Chipman, 1994).

### **Optik camlar**

Lens tasarımcısının en zor sorunlarından biri, akıllıca bir cam türü seçiminin nasıl yapılacağıdır ve bunu yaparken birkaç faktörü göz önünde bulundurması gerekir. Yüksek bir kırılma indisi, daha zayıf yüzeylere ve dolayısıyla daha küçük sapma kalıntılarına yol açar, ancak yüksek indisli camlar genellikle pahalıdır ve ayrıca yoğundur. Lens kalitesi çok önemliyse, tasarımcının skalası oldukça geniş olacaktır ve amacına uygun yüksek maliyetli dahi olsa birçok merceği tercih edebilecektir, ancak maliyet önemliyse daha düşük maliyetli gözlük camları seçilecek dolayısıyla kullanabileceği malzeme aralığı daralacaktır (Heiting, 2021). Camlar, en yoğun lantan kronlarından en sıradan camlara kadar maliyet açısından büyük farklılıklar gösterir. Camın rengi de büyük ölçüde bir kirlilik meselesidir ve bazı üreticiler daha az sarı renkli camı daha yüksek bir fiyata sunar. Bu, özellikle yakın ultraviyolede iyi iletim gerekiyorsa önemlidir (Büyükyıldız, 2010). Modern lens tasarım programlarının en kullanışlı özelliği, çeşitli tedarikçilerden temin edilebilen camların optik özelliklerinin kapsamlı kataloglarının yanında tedarik etmeleridir.

Optik camlar kabaca kron (crown) cam, flint cam, baryum kron, ağır flint, borosilikat vb. olarak sınıflandırılır. Ancak bu sınıfların sınırları sıkı bir şekilde standartlaştırılmamıştır. (Gerhard, 2020). Optik olarak camlar, kırılma indisi, dağılma gücü ve kısmi dağılma oranı bakımından birbirlerinden

farklılık gösterirken, fiziksel olarak renk, yoğunluk, termal özellikler, kimyasal kararlılık, kabarcık içeriği, çizgiler ve cilalama kolaylığı bakımından farklılık gösterirler. En ideal cam materyali; yüksek kırıcılığa, yüksek Abbe değerine ve düşük yoğunluğa sahip olanıdır. Gözlük camları; cam (mineral), plastik (organik) olmak üzere iki türdedir (Büyükyıldız, 2010);

#### **a. Cam (Mineral) gözlük camları**

Kelime anlamı olarak bakıldığında “mineral”, homojen ve doğal bir biçimde oluşmuş, belirli kimyasal bileşimi ve kristalleşmiş saf yapıları olan, katı cisimlere verilen isimdir. Bu noktada Mineral içerikli bir camın içerisinde %60-70 (SiO<sub>2</sub>) Silisyum Oksit bulunmaktadır. Arda kalan bileşiminde ise sodyum, bor ve kalsiyum oksitleri kullanılır (Büyükyıldız, 2010). Kron (Crown, taçlı, B270) cam; ışık saydamlığı fazla olan, rengi ve kokusu bulunmayan, ayrıca sıcak ve atmosferik etkilere karşı dayanıklı, son olarak kolaylıkla çizilmeyen bir lens çeşididir. Kırılma indisi  $n=1,523$  olan kron lens mineral lensler arasında abbe değeri en yüksek lensdir.

Flint (Çakmaktaşı, kurşunlu cam, kristal) cam; özellik olarak geçirgen, ışığı kırma gücü yüksek, parlak, oldukça ağır ve dayanıklı bir cam türüdür. Bu camın kırma indisi 1,62’dir. Dolayısıyla sertliği kron camdan fazladır. Flint camların ışığı ayırma gücü Kron camdan fazladır ancak ağırlıkları oldukça fazla olması sebebiyle günümüzde artık kullanılmamaktadır.

Borosilikat camlar; fotokromik (kolormatik) olarak bilinen UV ışığında lensin koyulaşmasını sağlayan özelliğe sahip camların üretiminde kullanılmaktadır. Kırılma indisi incelendiğinde net bir sayı ile belirtilememekle birlikte, 1.525 ile 1.604 değerleri arasında değiştiği belirlenmiştir.

Yüksek kırıcılık indisli mineral (Ağır Flint) camlar; birbirinden farklı minerallerin ham olan cama eklenmesi sonucunda, kırıcılık indisi yüksek camlar elde etmek için oluşturulduğu cam çeşididir. Bu özelliğe sahip camlar, yüksek diyoptrili kullanıcılar için oldukça ince ve hafif kullanım sağlamaktadır. Bahse konu olumlu etkisinin yanında kırıcılık indisi yükseldikçe, Abbe değeri küçülmemekte, doğal olarak camlardaki renk ayrışması ve yansımalar artmaktadır. Titanyum maddesinin ham haldeki cama eklenmesiyle; yeni 1,7 indisli, baryum ağır flint camlar üretilmeye başlanmıştır. Bu camlara sonradan “Lantan” da eklenerek refraktif indisi daha yüksek ( $n=1,8$ ) olan lantan ağır flint (LaSF) camlar üretilmiştir. Bugünkü en yüksek indisli cam olan ( $n=1,9$ ) cam türü; cama lantan ve niyobyumun eklenmesi sonucunda elde edilmiştir (Büyükyıldız, 2010).

#### **b. Plastik (Organik) Gözlük Camları**

Mineral gözlük camlarındaki en büyük problem ağır ve kırılğan olmasıdır. Bu nedenle ilk defa “CR 39” adlı maddeden oluşan camlar üretilmiştir. Bu camlar mineral cama göre daha kalın ve kırıcılık indisi daha düşüktür (Büyükyıldız, 2010). Işık geçirgenliği %92,1 oranındadır. Mineral cam ile kıyaslandığında kırılmaya karşı 20 kat daha dayanıklıdır. Bu noktadan bakıldığında özellikle küçük yaşta ve spor yapan kişiler için daha uygun olduğu söylenebilir. Ancak bu cam türünün yüzeyi sert

olmadığı için kolaylıkla çizilebilmektedir. Bahse konu sıkıntıyı aşmak için “sertlik kaplaması” yapılmaktadır. Bu camlar özellikle ısıyı iyi bir biçimde iletirken daha az buhar olmaktadır. Cama zarar vermesi mümkün olan benzin, alkol ve aseton gibi kimyasal maddelere karşı dirençlidir. “CR 39” materyali kullanılarak fotokromik camlar da geliştirilmiştir. Yüksek Kırıcılık indisli olan bu organik camlar; ham olan plastik maddenin polimerizasyon sürecine tesir ederek ve yeni monomer sistemlerin gelişimiyle üretilmiştir. Ayrıca bu karışıma; kükürt ve brom, gibi maddeler de eklenerek kırıcılık indisi yükseltilmiştir.

Polikarbonat camlar; 1970’li yıllarda havacılık uygulamaları için geliştirilmiştir. Günümüzde kask vizörleri ve uzay mekiği ön camları yapımında kullanılmaktadır. Bu cam türüne sanayide de yaygın olarak rastlanmaktadır (Heiting, 2021). Polikarbonat camlar geniş bir alana yayılmıştır. Koruyucu gözlükler, kamera dış materyali, CD üretiminde de kullanılan bu cam türü termoplast grubundadır. Polikarbonattan yapılmış gözlük camları, hafif, darbeye dayanıklı camlara yönelik talebe yanıt olarak 1980’lerin başında piyasaya sürüldüğü günden bu yana emniyet gözlükleri, spor gözlükleri ve çocuk gözlüklerinin tasarımında sıklıkla kullanılmıştır.

Diğer plastik gözlük camlarının çoğu, bir sıvı plastik malzemenin cam şeklinde uzun süre pişirildiği ve camı oluşturmak için sıvı plastiği katılaştıran bir döküm kalıplama prosesi kullanılarak üretilir. Ancak polikarbonat, küçük peletler formunda katı bir malzeme olarak işleme başlayan bir termoplastiktir. “Enjeksiyon kalıplama” adı verilen cam üretim sürecinde peletler eriyene kadar ısıtılır. Sıvı polikarbonat daha sonra hızla cam kalıplarına enjekte edilir, yüksek basınç altında sıkıştırılır ve soğutularak birkaç dakika içinde bitmiş cam ürünü oluşturulur. Bunların dışında polikarbonat camlardan kurşun geçirmez camlar da üretilmektedir. Ancak yüzeyi yumuşak olduğu için, alkol, aseton gibi maddeler kolaylıkla yapısını bozduğundan aşınmaya karşı sertlik kaplaması yapılması gerekmektedir. Bu camın işlenmesi zor olduğundan özel makineler kullanılır. Bu cam türü farklı bir maddeye ihtiyaç duymadan tamamen UV koruma sağladığından, aynı zamanda yüksek indisli ve çok hafif olmasından dolayı; “yüksek diyoptrili” kullanıcılar ile çocuklarda tercih sebebidir. Polikarbonat cam türü, düşük abbe değerine sahip olduğundan düşük optik kaliteye sahiptir (Büyükyıldız, 2010). Bahsedilen pek çok avantajına rağmen polikarbonat, güvenlik uygulamaları ve çocuk gözlükleri için tek uygun cam malzemesi değildir.

Yeni geliştirilmiş (2001 yılında PPG Industries<sup>1</sup> tarafından ortaya koyulmuş) organik bir cam materyali olan Trivex camlar; polikarbonat camlar gibi normal plastik veya cam lenslere göre daha ince, daha hafif ve darbeye karşı daha dayanıklıdır. Birçok cam türünün pozitif özelliklerini bir arada taşımaktadır. Öncelikle bu yeni cam türü kırılmalara, darbelere ve kimyasallara dayanıklıdır. Bununla birlikte esnektir. Ayrıca Abbe değeri yüksek olduğu için optik kalitesi yüksektir. Trivex camlar UV-A

---

<sup>1</sup> PPG 130 yıl önce kurulmuş cam fabrikasıdır. 1900 yılında kaplama işine başlamıştır.

ve UV- B ışınlarını tamamına yakın bir değerinde absorbe edebilir. Trivex camlar, üretilen bazlı bir monomerden meydana gelir ve normal plastik camların yapımına benzer bir döküm kalıplama prosesiyle üretilir.

**Tablo 1.** Polikarbonat ve Trivex camların karşılaştırılması (Helting, 2021)

<b>Kalınlık</b>	Polikarbonat, Trivex'ten daha yüksek bir kırılma indisine sahiptir (1.58'e karşı 1.53), dolayısıyla polikarbonat camlar, Trivex camlardan yaklaşık %10 daha ince olduğu söylenebilir.
<b>Ağırlık</b>	Trivex, polikarbonattan daha düşük ağırlığa sahiptir, bu da Trivex camların polikarbonat camlardan yaklaşık %10 daha hafif olmasını sağladığı söylenebilir.
<b>Optik netlik (merkezi)</b>	Trivex camlar daha az iç gerilime sahiptir ve polikarbonat camlara göre daha keskin merkezi görme ürettiği söylenebilir.
<b>Optik netlik (çevresel)</b>	Trivex camlar daha yüksek Abbe değerine sahiptir. Ayrıca polikarbonat camlara göre daha az renk sapması ve keskin görme sağlayabilir.
<b>Darbe direnci</b>	Bu camların benzer darbe direncine sahip olduğu söylenebilir.
<b>UV koruması</b>	Her iki cam, özel UV'yi bloke eden <u>cam kaplamasına gereksinmeden, güneş ışınlarını %100 bloke ederler.</u>
<b>Bulunabilirlik</b>	Polikarbonat camlar, Trivex camlara oranla daha farklı cam tasarımlarında görülmektedir. Bu bağlamda <u>fotokromik lensler</u> her iki malzemeden de ürettiği söylenebilir.
<b>Maliyet</b>	Her iki camın maliyeti önemli ölçüde değişebilmektedir. Bununla birlikte, birçok optik dükkân Trivex camlar için polikarbonat camlardan daha fazla ücret talep ettiği bilinmektedir.

### *c. Plastik lenslerin mineral lenslere göre avantaj ve dezavantajları*

Plastik lenslerin mineral lenslere göre birçok avantajı vardır. Ancak avantajı olduğu kadar dezavantajlarının da olması tasarımcının önem verdiği hususlar arasında yer almaktadır (Black, 1955).

**Tablo 2.** Plastik lenslerin mineral lenslere göre avantaj ve dezavantajları

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Büyük miktarlarda üretim kolaylığı sağlar ve ekonomiktir.	Mevcut plastiklerin çeşidinin azdır.
Düşük maliyetli hammaddeye sahiptir.	Kırılma indisi düşüktür.
Tek işleme lensin etrafındaki yuva şekillenebilir.	Tamamlanmış lensler mineral lenslere göre daha yumuşaktır.
Lens kalınlıklarını ve hava boşluklarını ayarlamak kolaydır.	Yüksek termal genleşmeye sahiptir (camın 8 katı)
Asferik yüzeyler, sferik yüzeyler kadar kolay kalıplanabilir.	Yüksek sıcaklıkta kırılma indisi <sup>1</sup> camın 120 katıdır
İstenirse ham maddeye bir boya eklenebilir.	Düz yüzeyler iyi kalıplanamaz
Mineral camlar darbe aldığı anda kolaylıkla kırılabilirken, plastik camların kırılması oldukça zordur.	Kalıp maliyetinden dolayı az lens yapmak zarar etmeye neden olur
	Plastikler kolayca toz toplayan statik elektrikle yüklenebilirler.
	Plastik lensler yapıştırılmazlar yalnızca bazı maddeler ile kaplanabilirler.

<sup>1</sup> Bir maddenin kırılma indisi, kullanılan ışımın dalga boyuna, sıcaklığa, derişime ve basınca bağlıdır. Sıcaklık yükseldikçe kırılma indisi düşer.

Tüm dezavantajlarına rağmen plastik lensler düşük maliyetlerinden dolayı kameralar da dahil olmak üzere birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Üretim ve malzeme teknolojileri ilerledikçe, uygulama çeşitliliği de artmaktadır. Bazı durumlarda optik sistemlerde cam ve plastik lensler birlikte etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

## SONUÇ

- Optik sistem tasarımının ilk adımı, belirli bir görüntüleme görevinin analizi ve verilen ve istenen parametrelerin tanımlanmasıdır. Tüm parametrik çalışmalardan sonra gerekli üretim toleransları tanımlanır ve belirlenir. Lens tasarımının veya optik sistem tasarımının nihai ürünü olan nihai çizim yapıldıktan sonra kullanım amacına göre gözlük üretim aşamasına geçilir.
- Üretim aşamasında tasarımcı ile üretimi gerçekleştirecek birimin iletişimi oldukça önemlidir. Üretilen gözlüğün kullanım alanına dikkat edilerek, kullanılacak materyaller titizlikle belirlenir. Örneğin endüstriyel üretim sektöründe çalışanlara yönelik tasarlanan gözlüklerin, darbeye dayanıklı lensler olması gerektirdiğinden daha sıkı bir düşme testinden geçmesi gerekmektedir. Endüstriyel kullanım için renkli lensler, belirli bir mesleğin doğası gereği gerektirmedikçe veya bir oftalmik pratisyen tarafından bir kişi için reçete edilmediği sürece üretilmemelidir. Soğurucu lensler, çiftler halinde sağlanmalı ve iki göz için olan lensler %10 içinde eşit ışık iletim değerlerine sahip olmalıdır. Numaralı bir lens için minimum kalınlık, lensin belirtilen şekilde darbeye dayanıklılık testini geçmesi koşullarını sağlaması gerekmekte ve seçilen lens bu özellikleri taşımaktadır. Şeffaf bir lens olarak nitelendirilebilmek için ışık geçirgenliği %89'dan az olmamasına dikkat edilmelidir. Bunların yanında gözlük üretiminde maliyeti düşürmek önemlidir ancak görüntü kalitesi en önemli unsurdur dolayısıyla merceğin karmaşıklığına veya boyutuna sınır konulmadan maliyet ve fayda dengesi göz önünde bulundurularak üretim yapılmadan planlamanın yapılması tasarımcıya büyük kolaylık sağlar.

**Ek beyan:** Makalenin tüm süreçlerinde IJIASR'ın araştırma ve yayın etiği ilkelerine uygun olarak hareket edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Andrew E. Jones and Forbes, G. W. (1995). An adaptive simulated annealing algorithm for global optimization over continuous variables, *J. Global Optimization*, 6:1–37.
- Black, G. (1955). Ultra high-speed skew-ray tracing, *Nature*, 176:27.
- Brixner, B. (1978). The LASL lens design procedure: Simple, fast, precise, versatile, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-7476, UC-37.
- Brixner, B. (1981). Lens design and local minima," *Appl. Opt.*, 20:384–387.

- Büyükyıldız, H. Z. (2010). Eyeglass lenses, lens materials and personalized lenses. Journal of Turkish Optoloji. Doi: DOI: 10.4274/tjo. 41.06.
- Carson, F. A. (2011). Basic optics and optical instruments, Naval education and training program development center, s. 4-32.
- Chipman, R. A. (1994). Polarization issues in lens design, OSA Proc. International Optical Design Conf., 22:23–27 (1994).
- Clarkson, E. N. K. ve Levi-Setti, R. L. (1975). Trilobite eyes and the optics of Descartes and Huygens, *Nature Journal*, 254 (5502):663–7.
- Doyle, K. B., Genberg, V. I. ve Michels, G. J. (2005). *Integrated Optomechanical Analysis*, SPIE Press, Bellingham.
- Feder, D. P. (1968). Differentiation of raytracing equations with respect to construction parameters of rotationally symmetric optics, *Journal of Opt. Soc. Am.*, 58:1494.
- Fischer, R.E., Tadic Galeb, B., Yoder. P.R (2008). *Optik Sistem Tasarımı* (2. baskı). McGraw-Hil, New York. Ss. 179–198. ISBN 978-0-07-147248-7.
- Gagne. C., Beaulieu, J., Parizeau, M. ve Thibault, S. (2007). Human-competitive lens system design with evolution strategies, Genetic and Evolutionary Computation Conference, London.
- Gerard, C. (2020). *Lens design basics. Optical design problem-solving in theory and practice*. IOR publishing, UK.
- Greivenkamp, J.E. (2004). *Field Guide to Geometrical Optics*. SPIE Field Guides vol. FG01. SPIE. ss. 19-20. ISBN 0-8194-5294-7.
- Heiting, G. (2021). Polikarbonat veya Trivex Gözlük Camları. <https://www.allaboutvision.com/tr/gozluk/gozluk-camlari/polikarbonat-lensler/> adresinden alınmıştır.
- Johnson, R.B. (1990). Knowledge-based environment for optical system design, International Lens Design Conference, Lawrence, G.N. (Ed.), Proc. SPIE, 1354:346–358.
- Jones A. E. ve Forbes, G. W. (1995). An adaptive simulated annealing algorithm for global optimization over continuous variables, *J. Global Optimization*, 6:1–37.
- Kingslake, R. ve Johnson, R. B. (2010). *Lens Design Fundamentals*. Elsevier. US.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in leastsquares, *Quart. Appl. Math.*, 2:164.
- Russell A. C., (1994). Polarization issues in lens design, OSA Proc. International Optical Design Conference, 22:23–27.
- Strehl, K. (1895). Aplanatische und fehlerhafte Abbildung im Fernrohr, *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 15, 362-370.
- Thibault, S., Gagne, C., Beaulieu, J. ve Parizeau, M. (2005). Evolutionary algorithms applied to lens design, Proc. SPIE, 5962–5968.
- Tora, Y. 2021. Lens kaplama teknikleri <https://www.slideshare.net/YedaTora/lens-kaplama-teknikleri> adresinden alınmıştır.
- Yoder, P.R. Jr. (1995a). *Mounting Lenses in Optical Instruments*, SPIE Press, Bellingham.



Yoder, P.R. Jr. (1995b). Design and Mounting of Prisms and Small Mirrors in Optical Instruments, SPIE Press, Bellingham.

Yoder, P.R. Jr. (2005). Opto-Mechanical Systems Design, Third Edition, SPIE Press, Bellingham.

<http://www.zeiss.de/compendium>

<http://www.cem-fa.com/cemfa/makalelerimiz>

<http://www.essilor.com/les-materiaux>