

## Elektron Optiğinin Öğretilmesinde Işık Optiği ile Zenginleştirilmiş Analoji Kurulumu\*

**Yrd. Doç. Dr. Süleyman AKÇAY**

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Eğitim Fakültesi  
suleymanakcay@sdu.edu.tr

**Yrd. Doç. Dr. Ömer ŞİŞE**

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Eğitim Fakültesi  
omersise@gmail.com

**Özet:** Elektron optiği iyi bir matematiksel altyapı gerektirdiği için fen eğitiminde, özellikle fizik eğitiminde anlaşılması zor bir konudur. Elektron optiğinde kullanılan kurallar, ışık optiğinden alınmaktadır. Ayrıca, ışık optiğinde kullanılan formalizasyon son derece gelişmiş olduğu için, elektron optiği tartışmalarında aynı terminoloji ve formüllerden yararlanılması bir gelenek haline gelmiştir. Bu sebeple, ışık ve elektron optiği ile arasında analogiler kurarak ve simülasyon araçları kullanarak lisans ve lisansüstü öğrencilerine elektron optiğinin temelleri basitleştirilerek öğretilir.

Çalışmamızda ilk olarak elektron optiğinin öğretiminde ilgiyi ve verimliliği sağlaması amacıyla ışık ve elektron optiği arasında zenginleştirilmiş analoji inşa edilmiştir. Bu eşleşmede benzer kısımların yanı sıra ortak olmayan ayrıştıkları noktalar da belirtilerek analoji zenginleştirilmiştir. Ek olarak, elektron optiğinin öğretiminde bilgisayar simülasyon uygulamalarının (ray-tracing yöntemi) kullanımı ve bunların anlamaya destekleri tartışılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Analoji, ışık optiği, elektron optiği, yüklü parçacık optiği, odaklama, fen eğitimi.

## Enriched Analogy between Electron & Light Optics in the Teaching of Electron Optics

**Abstract:** Electron optics is a difficult subject to understand because it requires a good mathematical background in science education, especially in physics education. The formalism used in electron optics comes from the analogy of light optics. Because optics formalism has been highly developed, it is customary in electron optics discussions to make use of the same terminology and formula. Therefore, the basics of electron optics may be taught easily to graduate and undergraduate students by constructing analogies between light and electron optics and by using simulation tools.

In our study, analogy that is enriched between light and electron optics has been constructed for the purpose of providing interest and efficiency in electron optics instruction. Similarities are also described. In addition, the constructed analogy is enriched by giving differences between electron optics and light optics.

**Key Words:** Analogy, light optics, electron optics, charged particle optics, focus, science education.

\* Bu çalışma ADIM Fizik Günleri III adı altında 17-18 Nisan 2014 tarihleri arasında Süleyman Demirel Üniversitesinde düzenlenen çalıştayda poster bildiri olarak sunulmuştur.

## 1. GİRİŞ

Analojiler başta fen alanları olmak üzere birçok alanda öğretime yardımcı olarak kullanılmakta ve anlamaya destek olarak önerilmektedir (ör. Cosgrove, 1995; Dagher, 1995; Stollak ve Alexander, 1998; Gentner, Holyoak ve Kokinov, 2001; Hulshof ve Verloop, 2002; Richland, Holyoak ve Stigler, 2004; Chiu ve Lin, 2005; Coll, France ve Taylor, 2005; Glynn, 2007). Elektron optiğinin alt yapısını oluşturan ışık optiği çoğu zaman öğrencilere itici gelmektedir (Şengören, Tanel ve Kavcar, 2007). Buna ek olarak elektron optiği konuları iyi bir matematiksel altyapı gerektirmektedir. Tüm bunlarda doğal olarak elektron optiğinin öğretimini zorlaştıracak unsurlardır. Ancak, ışık optiği ile arasında zenginleştirilmiş analogiler kurarak ve simülasyon araçları kullanarak lisans ve lisansüstü öğrencilerine elektron optiğinin temelleri basitleştirilerek öğretilir.

### 1.1. Elektron Optiği

Elektron optiği veya genel manada yüklü parçacık optiği, elektronların elektrik ve manyetik alan etkisi altındaki davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Bu başlık sadece elektronları değil, diğer yüklü parçacıkları da (proton, pozitif ve negatif iyonlar gibi) kapsamaktadır ve değişiklik sadece kütle, yük değeri ve yükün işaretidir. Elektron optiği genellikle fizik lisans ve lisansüstü seviyesinde okutulmaktadır. Uygulama alanı olarak, hızlandırıcı fiziğinden nanoteknolojiye, medikal uygulamalardan elektron spektrometrelerine, elektron mikroskoplarından kütle spektrometrelerine kadar geniş bir spektrumu kapsayan elektron optiği, teknolojik ilerlemenin temel enstrümanları arasında yer almaktadır (Hawkes ve Kasper, 1989; Yavor, 2009). Fizikçi ve biyologların sıklıkla kullandıkları elektron mikroskoplarında konumsal çözünürlüğün yaklaşık 0.06 nanometreye (milimetrenin milyonda birine) kadar ulaşmasında optik sistemlerin rolü büyüktür (McBride vd., 2004; Geissler ve Zadunasisky, 2005). X-ışını fotoelektron spektroskopisinde kullanılan elektron analizörlerinde enerji çözünürlüğü 1 meV'un altına inebilmektedir (Liu vd., 2008). Enerji çözünürlüğünün iyi olması birbirine yakın enerji spektrumlarını ayırt etmek için gerekli bir koşuldur. İsviçre ve Fransa sınırında yer alan ve Dünya'nın en büyük parçacık fiziği laboratuvarı olan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi CERN'de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (Large Hadron Collider-LHC) içerisindeki proton demetinin enerjisi optik sistemler yardımıyla 7 TeV'a kadar çıkartılabiliştir (Antchev vd., 2011). Bu enerji ışık hızı cinsinden  $0,999999991c$  yapmaktadır ve ışık hızından saniyede sadece 3 metre daha yavaştır. Yüklü parçacıkları kontrol etmekte kullanılan bu farklı teknolojilerin yıllık maliyeti ise milyar dolarları aşmaktadır. Yukarıdaki açıklamalarımızda

göstermektedir ki elektron optiği fizikte yeni ilerlemelerin sağlanmasında önemli bir başlıktır. Bu bağlamda elektron optiğinin mantığının ve işleyişinin öğrenilmesi fizikteki yeniliklerin kavranması açısından önemlidir.

## 1.2. Analoji

Analojiler, ortak yapılar içeren kavramlar arasında bilinen kavram ile bilinmeyen arasındaki paralellikler yoluyla bilinmeyeni anlama araçlarıdır (Gentner, 1989). Analojik akıl yürütme ve anlama insanların tüm yaşantılarında yer aldığı gibi, bilim insanları da analogilerden üst düzey bir akıl yürütme tekniği olarak faydalanmaktadırlar. Analogiler öğrenme/öğretme sürecinde etkin kullanılabilirlerse, önceden bilinen şeylerin üzerine aktif bir öğrenme sağlama potansiyellerinden dolayı anahtar roller alabilirler (Duit, 1991; Glynn, 1991). Elektron optiğinin kapsamı alanına giren birçok konunun ışık optiğinde de karşılığı vardır (Arnaud, 1976; El-Kareh ve El-Kareh, 1970). Bu bağlamda elektron optiğini anlamada ışık optiğinden analogik öğrenme mekanizmaları yardımıyla faydalanmak daha verimli ve anlamlı öğrenme sağlayabilir.

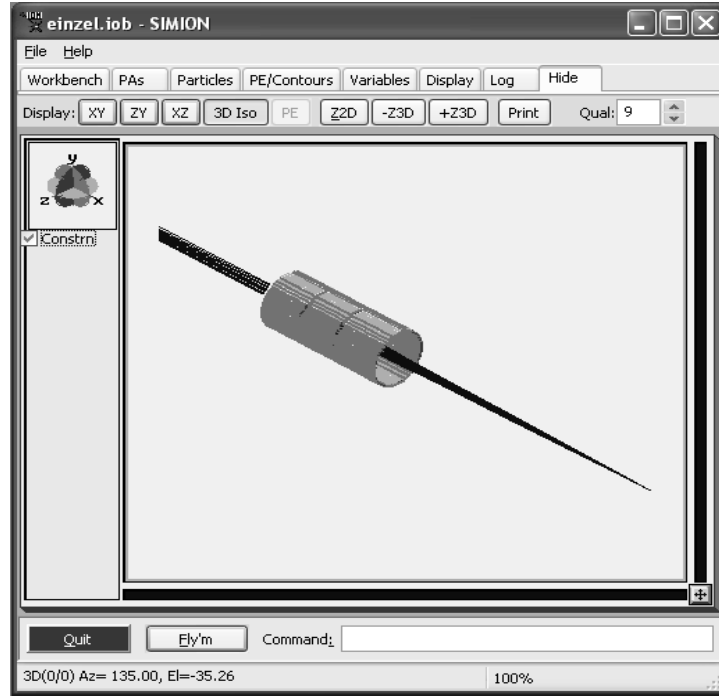
Iding (1997) her yaşta öğrencinin analogilerle öğrenme esnasında olası yanlış anlama ve çıkarsamalar yapılabileceğini söylemektedir. Bunu engellemek için; analogideki benzetilen (analog) ve benzeyen (target) arasındaki kıyaslanabilir ve kıyaslanamaz niteliklerin ve benzetilen özelliklerin açık bir biçimde izah edilmesinin gerektiğini savunmuştur. Bu bağlamda bir sonraki bölümde ışık optiği ile elektron optiği arasında detaylı (zenginleştirilmiş) bir analogik eşleştirme kurulmuştur.

Bu çalışma kapsamına ilk olarak aralarında ortak yapılar içeren ışık optiği ile elektron optiği arasında zenginleştirilmiş bir analogi kurulmuştur. Analogi inşasında ilk olarak benzeyen (target) ve benzetilen (analog) arasındaki kıyaslanabilir benzerlikler detaylı açıklanmıştır. İkinci olarak ise analog ve target arasındaki kıyaslanamayacak yapılar netleştirilmiştir. Devamında ise elektrostatik lens sistemleri ve çalışma prensibi açıklanmıştır. Elektrostatik lens sistemleri elektron optiğinin en temel konularından birisi (Harting ve Read, 1976; King, 1995; Şişe vd., 2005; 2007; 2008; 2009; Heddle, 2010) olması nedeniyle bu konu ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Ayrıca bu başlık altında elektronların (yükü parçacıkların) elektrik ve manyetik alanlarda hareketleri açıklanmıştır. Bu konu optik, elektrik ve manyetizma, nükleer fizik, atom ve molekül fiziği gibi birçok alt disiplinin ortak konusu olmasından dolayı ayrıca açıklanmasının faydalı olacağı düşünülmüştür. Son olarak ise elektron optiğinde kusurlar (aberasyonlar) açıklanmıştır.

### 1.3. Elektron Optiğinin Öğretiminde Simülasyonlar

Harrison ve Treagust (2000) analogik modelleri sekiz kategoriye ayırmış ve bu başlıklardan birini de simülasyonlar (benzetimler) olarak belirlemiştir. Ona göre simülasyonlar; kompleks ve karmaşık bilimsel süreçleri basitleştirirken, aynı zamanda, zenginleştirilmiş analogiler içermektedir.

Elektron optiği simülasyonlarının önemli bir özelliği öğrencilerin vakum ortamında dokunup göremeyecekleri parçacık hareketlerini ve alan dağılımlarını somutlaştırarak anlaşılmasına katkı sağlamasıdır. Bir başka deyişle simülasyonlar kara kutuyu şeffaf yapmaya yaramaktadır. Snir ve diğ. (1993)'e göre simülasyonlar fen eğitiminde uygulama yapılamayan, gerçek olarak gözlenemeyen ve anlatılması zor olan kavramların anlatılmasında yardımcı olabilecek önemli araçlardır. Elektron optiğinde bu amaç için geliştirilen birçok ışın izleme (ray tracing) simülasyon programı mevcuttur. Bunlardan bazıları SIMION (simion.com) ve CPO3D (cpo) gibi programlardır. \*



Şekil 1: SIMION 8 Programında Elektron Demetinin Odaklanması.

Bu çalışmada SIMION programını tanıtacağız. SIMION programı bize göre kullanıcı dostu olması ve kullanıcı tarafından yazılan ek programlara kolayca uyum sağlayabilmesi

\* CPO programı, ücretsiz sürümü [www.electronoptics.com](http://www.electronoptics.com) adresinde mevcuttur.

açısından eğitim amaçlı gösterimlerde kullanılması en uygun olan programlardan biridir. Bunun yanında bu programlar, optik sistemlerin nasıl çalıştığını daha iyi anlamada yardımcı olmaktadır (Romagnoli, 1972; van der Merwe, 1980). İyi anlaşılan sistemlerin daha yüksek performansla çalışacağı; yüksek performansla çalışan sistemlerin daha güvenilir sonuçlar vereceği; iyi sonuçların yeni olanaklara yol açacağı; yeni olanakların ise yeni bilim alanlarını doğuracağı bilimsel bir gerçeklik olarak karşımıza çıkmaktadır (Bhiday vd., 1977).

Elektromanyetik alanlarda yüklü parçacıkların hareketleri genel olarak Lorentz kuvvet denklemi kullanılarak çözümlenir. Statik alanlarda yörünge denklemlerinin çözümlerinin analitik olarak yapılması oldukça zordur. Bu nedenle çözümler sayısal olarak yapılır (Jackson, 1998; Griffiths, 1999). SIMION programı, genel olarak, elektrotlara uygulanan voltajların boşlukta oluşturdukları potansiyelleri ve yüklü parçacıkların bu potansiyelde izledikleri yörüngeleri sayısal olarak hesaplamaktadır. Şekil 1 de SIMION 8 programında elektron demetinin odaklanması gösterilmiştir. Bu tür programların faydaları şöyle sıralanabilir:

- Yüklü parçacıkların elektrostatik lens sistemi içinde nasıl bir yörüngeye sahip olduğu incelenir.
- Görüntü oluşumu, odaklama ve aberasyon (optiksel kusur) katsayıları gibi karakteristik özellikler hesaplanır.
- Değişik geometri ve boyutlarda birçok sistem deney yapmadan tasarlanabilir ve test edilebilir.
- Öğrenciye interaktif bir ortam sunar (üç boyutta görünüm, elektrot voltajlarının hızlı bir şekilde değişimi, manyetik alan etkisinin incelenmesi, uzay yüklerinin veya Coulomb itme kuvvetlerinin hesaplanması gibi).

## 2. IŞIK OPTİĞİ İLE ELEKTRON OPTİĞİ ARASINDAKİ ANALOJİ KURULUMU

Işık optiğinde enerji taşıyıcıları fotonlar iken elektron optiğinde elektronlardır (yüklü parçacıklar). Bu münasebetle Tablo 1’de aralarında analoji kuracağımız foton ve elektronun özellikleri sıralı olarak gösterilmektedir. Bu tablonun kurulacak zenginleştirilmiş analogiden önce verilmesi konuya giriş özelliğindedir. Foton ve elektronlarda dalga-parçacık ikilemi çalışmamızın dışında tutulmuştur.

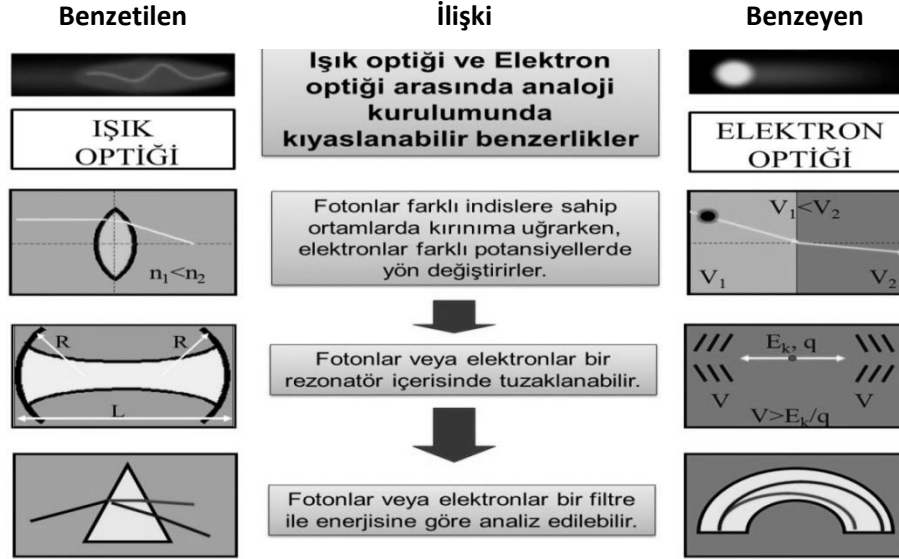
Tablo 1: Işık Optiği ve Elektron Optiğindeki Enerji Taşıyıcılarının Temel Özellikleri (El-Karehve El-Kareh, 1970).

	Foton	Elektron
Yük	0	- e
Kütle	$hf/c^2$	$m = m_0[1 - (v/c)^2]^{-1/2}$
Durgun kütle	0	$m_0$
Momentum	$p = hf/c$	$p = mv$
Enerji	$W = hf = pc$	$W = mv^2/2$ veya $c(m_0^2 c^2 + p^2)^{1/2}$
Dalgaboyu	$\lambda = c/nf$	$\lambda = h/mv$
Dalga denklemi	Reel çözüm	Kompleks çözüm
İstatistiksel dağılım	Boson	Fermion
Kırılma indisi	$n = c/c' = c/\lambda f$	$n = \lambda_0/\lambda = (m/m_0) / (v/c)$
Kırıcı yüzeylerin şekli	İsteğe bağlı	Laplace denklemi ile sınırlı
Optiksel bileşen	Statik	Statik ve dinamik

$h = 6,624 \times 10^{-34}$  J.s (plank sabiti) ;  $c = 3 \times 10^8$  m/s (ışık hızı) ;  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C;  $m_0 = 9,11 \times 10^{-31}$  kg;  $f$  (ışığın frekansı, Hz).

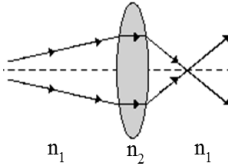
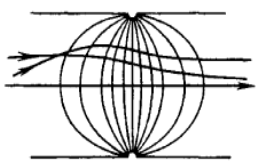
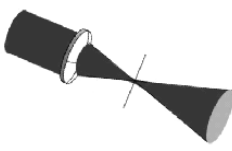
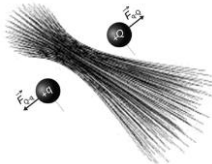
Elektron optiği ile ışık optiği arasında birçok benzer yapılar vardır (Şekil 1). Bunlardan ilki optikte temel bir yasa olan bilinen Snell kırınım yasasıdır. Buna göre bir ışık ışını ilerlediği ortamdan, kırılma indisi ( $n$ ) farklı bir ortama girdiğinde kırınımına uğrar. Elektron optiğinde ise bir elektron bulunduğu potansiyelden ( $V$ ) farklı bir potansiyele geçtiğinde yörüngesini değiştirir. Dolayısıyla ışık optiği için iki ortama ait  $n_1$  ve  $n_2$  kırılma indisleri sistemin hareketini belirleyen önemli parametreler iken, elektron optiğinde  $V_1$  ve  $V_2$  potansiyelleri hareketi belirlemektedir. Işık optiğinde Snell yasası  $\sin\alpha_1/\sin\alpha_2 = n_2/n_1$  ifadesi, elektron optiğinde  $\sin\alpha_1/\sin\alpha_2 = (V_2/V_1)^{1/2}$  ile ifade edilir. Burada  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  iki ortama ait normale yapılan giriş ve çıkış açılarıdır. Mercekler için kullanılan formüller elektron optiğinde de kullanılabilir. İlerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak değinilecek olan, odak uzaklıkları, cisim ve görüntü uzaklıkları, büyütme, aberasyonlar (kusurlar) gibi ifadeler birebir karşılığı olan tanımlamalardır. Bunun yanında fotonlar tuzaklanabildiği gibi elektronların tuzaklanması da mümkündür. İyonlar için geliştirilen tuzaklama (trapping); mekânsal olarak homojen olmayan elektrik alanını kullanarak yüklü parçacıkları depolama işlemi) tekniği 1989'da Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür. Ayrıca, bir kaynaktan salınan ışık veya elektronlar çoğu zaman tek enerjili (monokromatik) değildir ve içerisinde bir enerji bandını ( $\Delta E$ ) barındırır. Farklı enerjileri birbirinden ayırt etmek için ışık optiğinde prizmalar kullanılır ve prizmalar dalga boyuna göre farklı kırılma indislerine sahip olduğu için yüksek enerjili (düşük dalga boylu) ışınlar büyük açılarda kırınımına uğrar. Böylece enerji ayrımı yapılmış olur. Elektron optiğinde ise değişik geometrilere elektrostatik ve manyetik prizmalar mevcuttur (Moore vd., 1983). Temel prensip aynı noktadan çıkan düşük ve yüksek enerjili elektronların elektrik veya manyetik alana girdikten sonra çıkışta farklı konumlara odaklanmasıdır. Böylece enerji değerleri konumsal olarak ayrılmış olur (dispersiyon

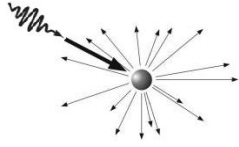
özelliği). Bu çalışmada elektrostatik lensler üzerinde durulduğu için tuzaklama ve prizmalar konusunun ayrıntılarına girilmemiştir.



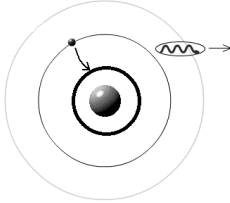
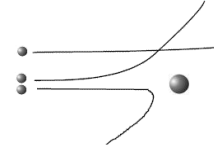
**Şekil 2: Işık Optiği ve Elektron Optiği (veya Yüklü Parçacık Optiği) Arasındaki Kıyaslanabilir Benzerlikler.**

Şekil 2 de ışık optiği ile elektron optiği arasındaki analojik yapıdaki karşılaştırılabilecek paralellikler netleştirilmeye çalışılmıştır. Işık optiği ve elektron optiği arasındaki analojik eşleştirmede yukarıda ayrıntılarının gösterildiği üzere paralellikler olmasına rağmen bazı sınırlamaları (farklılıklar) bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

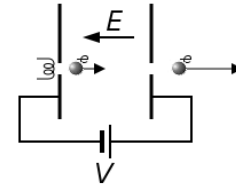
Benzetilen	İlişkilendirilemez	Benzeyen
<b>Işık Optiği</b>		<b>Elektron Optiği</b>
	a) Işık optiğinde farklı iki ortam arasında ışığın hareketinde fotonlar için bir kırıcı yüzeyden bahsedilirken, elektron optiğinde kırınım eş-potansiyel yüzeyler boyunca süreklidir. Dolayısıyla sonsuz sayıda kırıcı yüzey tanımlanabilir.	
	b) Elektronlar yüklü parçacıklardır, fotonlar ise yüksüzdür. Elektron optiğinde demet içerisinde elektronların birbirini Coulomb kuvveti ile itmesi sonucu demet çapında genişleme söz konusudur. Bu olay uzay yükü etkisi (space charge effect) olarak bilinir ve ışık optiğinde gözlenmez.	



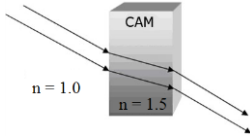
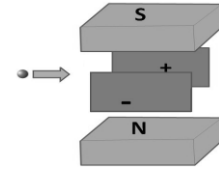
c) Fotonların durgun kütlesi sıfırdır, elektronların ise hem durgun hem de hareketli kütleleri vardır. Dolayısıyla elektron optiğinde elektronlar ile hedef arasında etkileşme ışık optiğinden farklıdır.



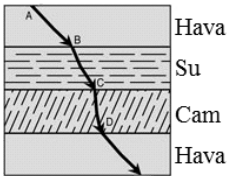
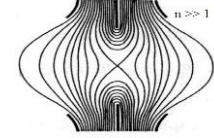
d) Elektronların enerji ve momentumu değişkendir ve istenilen değere uygun hızlandırma veya yavaşlatma potansiyelleri altında getirilebilir. Işık optiğinde ise enerji frekansa bağlıdır. Atomlardan yayımlanan ışığın frekansı, enerji düzeyleri arasındaki farka bağlı olarak sabit (kesikli veya kuantumlu) değerler alabilir, sürekli değerler alamaz.



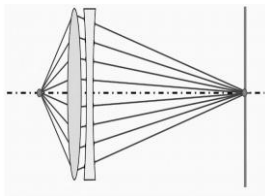
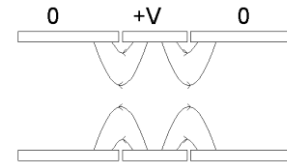
e) Işık optiğinde ortam olarak hava, cam, su gibi sayısı artırılabilir kırıcı (hızın farklı olduğu) ortamlar vardır, ancak elektron optiğinde kırıcı yüzeyler olarak sadece elektrik ve manyetik alanlar kullanılır (Işık ise bu alanlardan geçerken normal koşullarda etkilenmez).



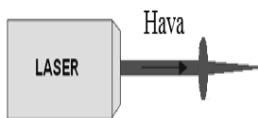
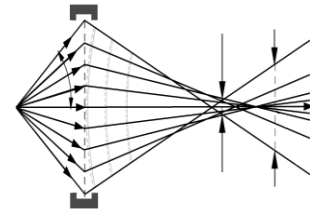
f) Kırılma indisi ışık optiğinde genellikle  $n = 1$  ve  $2, 5$  arasında değişirken, elektron optiğinde kırılma indisi  $n = 1000$  gibi büyük değerler alabilmektedir.



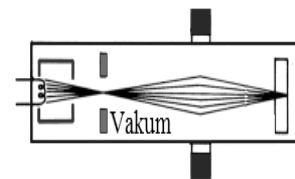
g) Elektrik ve manyetik alanlar güç kaynaklarındaki potansiyellere ve sarım tellerindeki akım değerlerine bağlı olduğu için elektronların yönlendirilmesinde deneysel açıdan bir kolaylık sağlamaktadır. Fakat ışık optiğinde kırılma indisi ortam ya da malzeme değiştirilmedikçe sabittir.



h) Işık optiğinde optiksel aberasyonlar (kusurlar) farklı lenslerin bir arada kullanılmasıyla önlenmektedir. Fakat elektron optiğinde elektrik ve manyetik lenslerde aberasyonlar tamamen sıfırlanamamaktadır (Scherzer teoremi) (Scherzer, 1936). Etkisinin büyük oranda azaltılması ise oldukça karmaşık bir tasarım gerektirmektedir.



i) Elektronlar mutlaka iyi bir vakum ortamında (düşük basınç altında) hareket ettirilmelidir. Aksi takdirde ortamda bulunan atomlar tarafından absorbe edilerek saçılır. Işık ise özel durumlar hariç hava ve su gibi birçok ortamda serbestçe ilerleyebilir.





**Şekil 3: Işık Optiği ve Elektron Optiği Arasındaki Kıyaslanamaz Benzerlikler**

Harrison ve Treagust (2006) a göre analoji inşasında istenen; benzeyen ve benzetilen arasındaki ortak yapıların benzerliklerinin detaylı açıklanmasının yanı sıra yanlış yorumlara yol açmaması için aralarındaki kıyaslanamayacak yapıların netleştirilmesidir. Bu bağlamda yukarıda elektron ve ışık optiği arasındaki zenginleştirilmiş analoji inşasında benzerlikler detaylandırılmış ve farklılıklar Şekil 3 de netleştirilmiştir. Böylece analojinin sınırları çizilmiştir. Elektron optiğinin temel unsurlarından birisi olan elektrostatik lenslerin çalışma prensipleri Ek 1’de detaylı biçimde açıklanmıştır.

**3. SONUÇ VE TARTIŞMA**

Analojilerin kurulumu benzeyen ve benzetilen arasındaki ortak yapıların eşleştirilmesine dayanmaktadır. Bu eşleşmeler yapılırken ilişkilerin düzgün ve detaylı açıklanması ve analogilerin sınırlarının çizilmesi analojinin yanlış anlamalara sebep olmaması açısından önemlidir (Iding, 1997; Harrison ve Treagust, 2000, Harrison ve Treagust, 2006).

Elektron optiğinde kullanılan içerik, formül ve yörünge hesaplamaları ile ışık optiğindeki mercek ve prizmalarda kullanılan formüllerin birçok ortak özelliği bulunmaktadır. Örneğin, odak uzaklığı, lineer ve açisal büyütme, aberasyonlar (küresel, kromatik, eksen-dışı), asıl düzlemler ve cisim ve görüntü uzaklıkları gibi terimler iki alan arasında bire-bir kullanılan terimlerdir. Bu çalışmada, ışık ve elektron optiği arasındaki bu paralellikler; kıyaslanabilir ve kıyaslanamaz olarak sınıflandırılmıştır. Böylece analoji zenginleştirilmiştir. Buna benzer zenginleştirilmiş analogilerin elektron optiği gibi karmaşık gözükken soyut konuların öğretiminde faydası olacağı inancındayız.

Ayrıca, karmaşık matematiksel formüller içermesinden dolayı anlaşılması güçleşebilen elektron optiğinin öğretilmesinde analogiler ve simülasyon programları öğretimi cazip ve verimli hale getirebilir. Çalışmamızda ışık ve elektron optiği arasında kurduğumuz zenginleştirilmiş analoji inşasının elektron optiği konusuna ilgiyi artıracacağı ve elektron optiğinin temel işleyiş mekanizmalarını daha kolay kavratılabileceği görüşündeyiz. Ayrıca, simülasyon programlarından SIMION, kullanıcı dostu olması ve kullanıcı tarafından yazılan ek programlara kolayca uyum sağlayabilmesi açısından uygulamalı elektron optiği eğitimlerinde uygun bir program gibi gözükmektedir.

**Teşekkür ve Bilgi:** Elektron optiği konusunda sürekli bilgi alışverişinde bulunduğumuz Prof. Dr. Theo J.M. Zouros ve Prof. Dr. Genoveva Martinez Lopez'e ve SIMION programında öğretim materyallerinin geliştirilmesinde bize yardımcı olan SIMION 8'in kurucusu David J. Manura'ya teşekkür ediyoruz.

#### KAYNAKLAR

- Akata, A. Ç. (2009). *Türkçe Programıyla İlgili Ölçme ve Değerlendirme Sürecinin İşlevselliği*
- Antchev, G., Aspell, P., Atanassov, I., Avati, V., Baechler, J., Berardi, V., ... & Oljemark, F. (2011). First measurement of the total proton-proton cross-section at the LHC energy of  $\sqrt{s}=7$ , TeV. *EPL (Europhysics Letters)*, 96 (2), 21002.
- Arnaud, J. A. (1976). Analogy between optical rays and nonrelativistic particle trajectories: a comment. *American Journal of Physics*, 44 (11), 1067-1069.
- Bhiday, M. R., Gaud, S. W., & Kanitkar, P. L. (1977). Versatile optical bench for teaching, development, and testing of electron and ion optical systems. *American Journal of Physics*, 45 (4), 382-383.
- Chiu, M. H., & Lin, J. W. (2005). Promoting fourth graders' conceptual change of their understanding of electric current via multiple analogies. *Journal of Research in Science Teaching*, 42 (4), 429-464.
- Coll, R. K., France, B., & Taylor, I. (2005). The role of models/and analogies in science education: implications from research. *International Journal of Science Education*, 27 (2), 183-198.
- Cosgrove, M. (1995). A study of science-in-the-making as students generate an analogy for electricity. *International Journal of Science Education*, 17 (3), 295-310.
- Dagher, Z. R. (1995). Review of studies on the effectiveness of instructional analogies in science education. *Science education*, 79 (3), 295-312.
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science education*, 75 (6), 649-672.
- El-Kareh A. B. & El-Kareh J. C. J. (1970). *Electron Beams, Lenses and Optics* (London: Academic)
- Geissler, P., & Zadunaisky, J. (2005). Electron optics for biologists: physical origins of spherical aberrations. *American Journal of Physics*, 42 (11), 1002-1005.
- Gentner, D. (1989). The mechanisms of analogical learning. *Similarity and analogical reasoning*, 199, 241.
- Gentner, D., Holyoak, K. J., & Kokinov, B. N. (Eds.). (2001). *The analogical mind: Perspectives from cognitive science*. MIT press.
- Gil, S., Saleta, M. E., & Tobia, D. (2002). Experimental study of the Neumann and Dirichlet boundary conditions in two-dimensional electrostatic problems. *American Journal of Physics*, 70 (12), 1208-1213.
- Glynn, S. (2007). The teaching-with-analogies model. *Science and Children*, 44 (8), 52-55.
- Glynn, S. M. (1991). Explaining science concepts: A teaching-with-analogies model. *The psychology of learning science*, 219-240.

- Griffiths, D. J., & Reed College. (1999). *Introduction to electrodynamics* (Vol. 3). Upper Saddle River, NJ: prentice Hall.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22 (9) , 1011-1026.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2006). Teaching and learning with analogies. In *Metaphor and analogy in science education* (pp. 11-24). Springer Netherlands.
- Harting, E., Read, F. H., & Brunt, J. N. H. (1976). *Electrostatic lenses*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Hawkes, P. W., & Kasper, E. Principles of Electron Optics, 1989. *See in particular Chapters, 24*.
- Hedde, D. W. (2010). *Electrostatic lens systems* (Vol. 1). CRC Press.
- Hulshof, H., & Verloop, N. (2002). The use of analogies in language teaching: Representing the content of teachers' practical knowledge. *Journal of Curriculum Studies*, 34 (1) , 77-90.
- Ilding, M. K. (1997). How analogies foster learning from science texts. *Instructional Science*, 25 (4) , 233-253.
- Jack. R Fraenkel, & Wallen, N. E. (2000). *How to design and evaluate research in education*. McGraw-Hill.
- Jackson, J. D. (1998). Classical electrodynamics. *Classical Electrodynamics, 3rd Edition*, by John David Jackson, pp. 832. ISBN 0-471-30932-X. Wiley-VCH, July 1998., 1.
- King, G. C. (1995). Electron and ion optics. *Experimental Methods in the Physical Sciences Vol 29A* (New York: Academic)
- Liu, G., Wang, G., Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, G., Wang, X., ... & Zhou, X. J. (2008). Development of a vacuum ultraviolet laser-based angle-resolved photoemission system with a superhigh energy resolution better than 1meV. *Review of Scientific Instruments*, 79 (2) , 023105.
- McBride, J. R.; Kippeny, T. C.; Pennycook, S. J.; Rosenthal, S. J. (2004). Aberration-Corrected Z-contrast Scanning Transmission Electron Microscopy of CdSe Nanocrystals. *Nano letters*. 4, 1279-1283
- Moore, J. H., Davis, C. C., & Coplan, M. A. (1983). Building Scientific Apparatus, Addison-Wesley. Reading, MA, 168.
- Mulligan, F. J. (1992). An illustration of method of finite differences in the solution of Laplace's equation. *European journal of physics*, 13 (2) , 57.
- Richland, L. E., Holyoak, K. J., & Stigler, J. W. (2004). Analogy use in eighth-grade mathematics classrooms. *Cognition and Instruction*, 22 (1) , 37-60.
- Romagnoli, R. J. (1972). Electron optics: a topic of a computer applications course. *American Journal of Physics*, 40 (3) , 401-403.
- Sherzer, O. (1936). On Some Defects of Electron Lenses. *Zeitschrift für Physik*, 101, 593.
- SIMION 3D v8.0, Scientific Instrument Services Inc. www.simion.com
- Şengören, K. S., Tanel, R., & Kavcar, N. (2007). Optik dersine yönelik tutum ölçeği geliştirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 20, 86-94.

- Şişe, O., Manura, D. J., & Dogan, M. (2008). Exploring focal and aberration properties of electrostatic lenses through computer simulation. *European Journal of Physics*, 29 (6) , 1165.
- Şişe, O., Okumus, N., Ulu, M., & Dogan, M. (2009). Computer simulation of electrostatic aperture lens systems for electron spectroscopy. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 175 (1) , 76-86.
- Şişe, O., Ulu, M., & Dogan, M. (2005). Multi-element cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 554 (1) , 114-131.
- Şişe, O., Ulu, M., & Dogan, M. (2007). Aberration coefficients of multi-element cylindrical electrostatic lens systems for charged particle beam applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 573 (3) , 329-339.
- Snir, J., Smith, C., & Grosslight, L. (1993). Conceptually enhanced simulations: A computer tool for science teaching. *Journal of Science Education and Technology*, 2 (2) , 373-388.
- Stollak, M. A., & Alexander, L. (1998). The Use of Analogy in the Rehearsal. *Music Educators Journal*, 84 (6) , 17-21.
- van der Merwe, J. P. (1980). Electron optics cannot be taught through computation?. *American Journal of Physics*, 48 (7) , 569-576.
- Yavor, M. (2009). *Optics of charged particle analyzers*. Academic Press.

## SUMMARY

“Electron optics” investigates the behavior of electrons under the influence of the electric and magnetic fields. This term covers not only electrons, but also other charged particles such as protons and positive and negative ions and the main differences are only the mass and charge. Electron optics, or in general terms, charged particle optics are usually taught at undergraduate and graduate level. The application of electrons optics covers a broad spectrum from accelerator physics to nanotechnology, from medical applications to electron microscopy. The annual cost of these different technologies used for controlling charged particles exceed a billion dollars, showing that electron optics is an important topic in physical science. In this context, understanding of electron optics is important in physics innovation.

Electron optics, however, is a difficult subject to understand because it requires a good mathematical background in science education, especially in physics education. But, the basics of electron optics may be taught easily to graduate and undergraduate students by constructing analogies between light and electron optics and by using simulation tools.

Analogies are the tools to understand the unknown in the common structures of concepts that include the similarities. Analogical reasoning and understanding take place in people lives, and scientists benefit from the analogies as a high-level reasoning technique. If analogies can be used effectively they can play key roles in the learning process due to the potential to provide an active learning. Many issues falling within the scope of electron optics have their counterparts in light optics. In this context, benefiting from analogical learning mechanisms between light and electron optics can provide more efficient and meaningful learning.

In this work, firstly, an enriched analogy between light optics and electron optics is established. This will include discussions of similarities and differences between photons and electrons, the properties of electrostatic lenses, a detailed description of their aberrations, and computer simulation. Since electrostatic lens systems are the most fundamental issue in electron optics they are investigated under a separate heading. Third, aberrations in electron optics are described. Finally, we discuss the role of computer simulations in the teaching of electron optics and introduce the electron optics simulation program SIMION.

There are main differences between light and electron optics. In light optics there is one refractive surface when the ray passes another region; however, in electron optics, there are a number of equipotential surfaces which deviate the beam of electron at different regions. It is clear that when teaching this subject, the mathematical description of the electron interaction with fairly complicated electric fields can be quite difficult. However, when a computer simulation is used, the analytical or numerical solutions are relatively easy to produce. Moreover, a computer simulation's ability to produce animated three-dimensional (3D) plots is an extra bonus that can provide a sense of wonder and joy for the student.

Analogical models can be divided into eight categories, and one of them is simulations which simplify complex and complicated scientific processes and also comprise enriched analogies. In the last few years, new computer tools have become readily available for solving problems in electron optics. These programs

broaden the understanding of electron/ion motion in vacuum throughout the instruments. In the present work, we will use one of these simulation programs, SIMION (because of its relatively low cost and ease of use), and illustrate its use as an educational tool with just a few of the many optical principles of electrostatic lens systems it can be used to study. Computer simulations make it possible to explore physical situations where conducting the real experiment is impractical. For example, students "measure" what happens to an electron in an electric field so they can have a direct visualization of what happens to the electrons when the electric field is varied. Here we used electrons in simulations as a charged particle, but the lens systems can also be used to focus positive ions. We believe that these examples are appropriate to illustrate the use of the computer to solve physical problems.

Much of the work on electron-optical devices makes use of the concepts, formalism, and terminology of light optics, as these concepts provide a concise way of describing the behavior of a given device. The basis of light optics theory is the paraxial approximation, and added on to this is the theory of lens aberrations which accounts for the deviations from first-order paraxial behavior. In elementary electron optics books, it is generally stated that an electrostatic lens focuses the beam of electrons that are parallel to the optical axis to a single point defined as the focal point of the lens. Immediately before or after this sentence, it is usually admitted that it is true only in the limit of paraxial approximation. However, when the electrons are not moving close to the axis, then the basic approximation begins to fail and aberrations start to form.

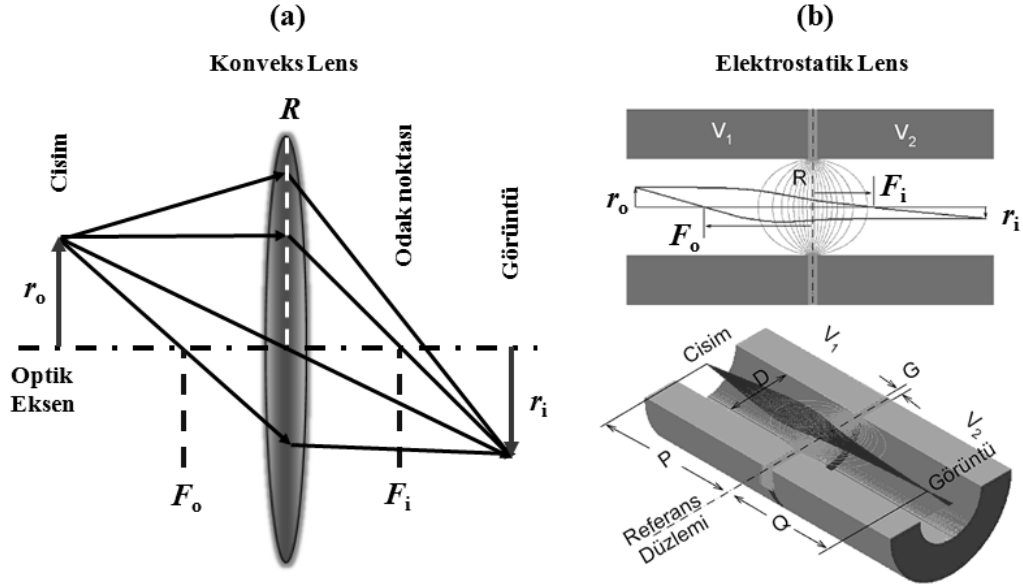
Computer simulations enable the trajectories of the electrons to be visualized in 3D as they pass through the system. They also show directly the formation of an image and the associated lens aberrations which can be difficult or tedious to evaluate analytically. We presented some examples of the electron-optical properties of electrostatic lens systems. The direct ray-tracing method was then presented, which is more robust in terms of the aberration effects, because the overall aberration effects, including all possible orders, are computed. In these examples we showed how the blur of a round lens system can be calculated by using the direct ray-tracing method. This can help the understanding of the limit of validity of the imaging properties of electrostatic lenses.

The concept of charged particle optics or electron optics is usually intuitive for the undergraduate and postgraduate students, who can understand the basics of charged particle propagation in an electrostatic field. Even today, when high speed computers are available, such computer models of lens systems are valuable instructional tools, which allow the student to visualize the essential focusing effects.

## EKLER

## EK-1

## ELEKTROSTATİK LENSLELER



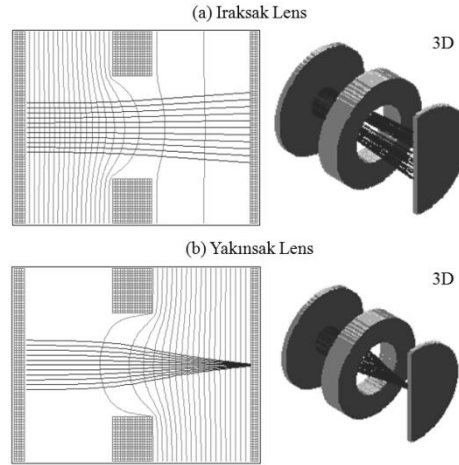
Şekil 4: Işık Optiğinde Bir Konveks Lens (a) ve Elektron Optiğindeki Karşılığı Olan İki-Elektrotlu Elektrostatik Lens (b) Gösterimi. Elektronlar İki Elektrot Arasında Eş Potansiyel Yüzelelere Dik Olarak Hareket Etmektedir.

Günlük hayatta, ışık optiğinde kırılma indisleri farklı olan ortamlar kullanılarak ışık demetinin odaklanması veya dağılmasını sağlayan mercekleri görmekteyiz. Elektron optiğinde de merceklerle benzeyen ve değişik geometrilere sahip elektrostatik ve manyetik lens sistemlerini oluşturmak mümkündür. Aslında evlerde kullanılan tüplü televizyonlarda elektron demeti kaynaktan çıktıktan sonra bu lensler yardımıyla ekrana odaklanır. Şekil 4a da ışık optiğinde kullanılan ince kenarlı bir mercek ve Şekil 4b de bunun elektron optiğindeki karşılığı olan iki-elektrotlu lens sistemi gösterilmektedir. Elektron optiğinde farklı voltajlarda iki veya daha fazla elektrot belli bir uzaklıkta birbirlerine yaklaştırıldığında elektriksel potansiyel konuma göre değişim gösterir. Şekil 4 de gösterildiği gibi mercek şeklinde eş potansiyel yüzeyler oluşur. İki elektrot arası bu bölge lens bölgesidir. Elektronlar eş potansiyel yüzeylere dik olarak hareket ettiklerinden dolayı, merceklerde ışığın odaklanmasında olduğu gibi elektronların odaklanması sağlanabilmektedir.

Elektron optiğinde, Şekil 4 de  $r_o$  boyundaki cismin görüntüsü, iki elektron gönderilerek  $r_i$  (Şekil 4) olarak elde edilir. Şekil 4 de referans düzlemi (R) lens elemanlarının orta noktasını

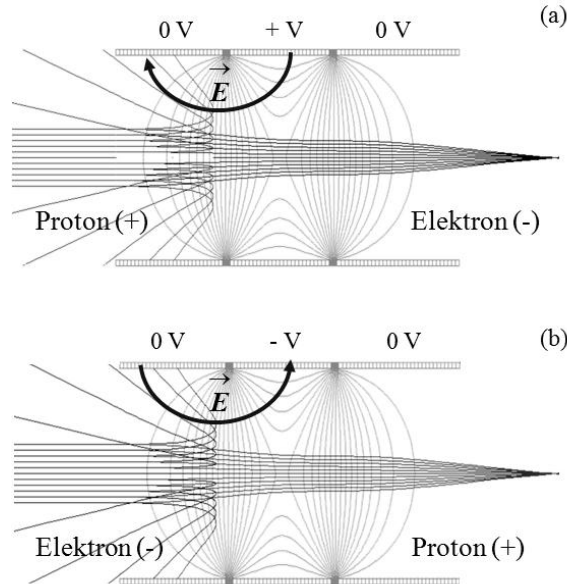






**Şekil 6: İraksak ve Yakınsak Elektrostatik Lenslerde Elektron Yörüngelerinin İki ve Üç Boyutlu Gösterimi.**

Işık optiğinde konvex (yakınsak, ince kenarlı) ve konkav (ıraksak, kalın kenarlı) lensler sırasıyla ışığı toplamak ve dağıtmak amacıyla kullanılır. Elektron optiğinde çoğunlukla lensler konvex özelliktedir ve kaynaktan çıktıktan sonra elektronları toplamak amacıyla kullanılır. Şekil 6 da gösterildiği gibi hem yakınsak hem de ıraksak lensleri uygun potansiyel altında oluşturmak mümkündür.



**Şekil 7: Elektron (Negatif Yüklü) ve Protonun (Pozitif Yüklü) Odaklanmasında Elektrik Alan Yönünün Etkisi (Elektrik Alan E Yönü Ok ile Gösterilmiştir).**

Manyetik alan ihmal edildiğinde elektrik alanda hareket eden bir parçacığa etki eden Lorentz kuvveti  $F=qE$  şeklindedir. Parçacık yükünün negatif veya pozitif olmasına göre elektrik kuvveti, elektrik alana zıt veya aynı yönlü oluşabilir. Dolayısıyla zıt yüklü parçacıklar

odaklanırken elektrik alanın tersine çevrilmesi, başka bir ifadeyle, elektrotlara uygulanan voltajların kutuplarının değiştirilmesi gerekir. Şekil 7 de seçilen bir enerji değeri için elektrik alan yönüne göre proton ve elektronların odaklanması gösterilmiştir. Lens sistemi üç silindirik elektrottan oluşmuştur ve ilk ve son elektrotlar topraklanmıştır. Elektron optiğinde bu sistem “einzellens” lens olarak isimlendirilmektedir ve parçacığın enerjisi çıkışta değişmemektedir.

Eksensel simetriye sahip elektrostatik lenslerde alan içinde yüklü parçacıkların hareketini eksene bağlı potansiyeller belirler (Mulligan, 1992). Eksensel simetrisinin kullanılmasının nedeni, potansiyellerin hesaplanmasında Laplace denklemi çözümünün sayısal olarak kolay yapılmasından dolayıdır (Gil vd., 2002).

## EK-2

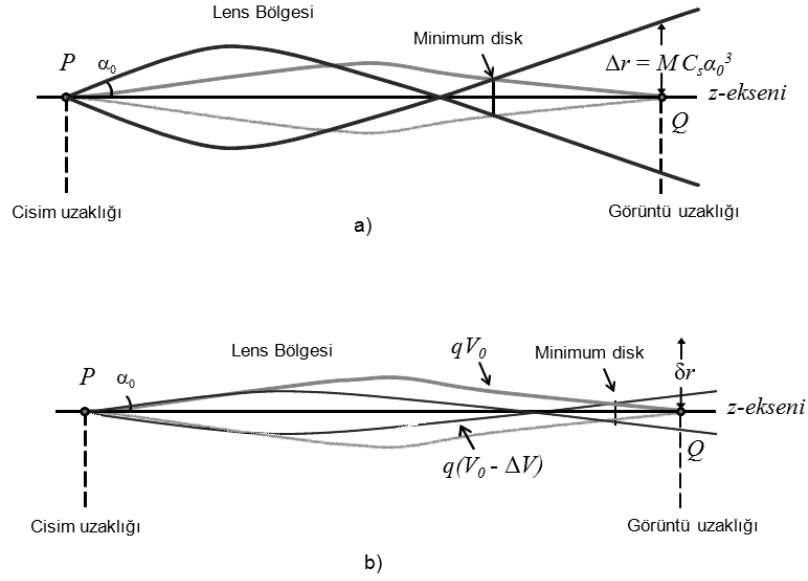
**OPTİKSEL KUSURLAR (ABERASYONLAR)**

Işık optiğinde optiksel aberasyonlar (kusurlar) farklı lenslerin bir arada kullanılmasıyla önlenebilmektedir. Fakat elektron optiğinde elektrik ve manyetik lenslerde aberasyonlar tamamen sıfırlanamamaktadır (Scherzer teoremi) (Sherzer, 1936). Etkisinin büyük oranda azaltılması ise oldukça karmaşık bir tasarım gerektirmektedir. Bu nedenle elektron optiği, aberasyon (optik kusur) fiziği olarak da isimlendirilebilir. Matematiksel olarak ise bir çeşit Taylar serisi açılımıdır. Çok küçük demet açılarında küçük açı yaklaşıklığı kullanılırsa bu durumda  $\sin\alpha \approx \alpha$ ,  $\tan\alpha \approx \alpha$  ve  $\cos\alpha \approx 1$  olarak alınır. Bu durumda yörüngeler optik eksene oldukça yakındır (paraksiyel yaklaşım). Fakat elektronların veya yüklü parçacıkların açısız ve enerji dağılımları artarsa bu durumda paraksiyel yaklaşım ötesine geçilmiş olur. Bu tip aberasyonlar demetin odak kalitesini bozmaya başlar.

Denklem (1) 'de tanımlanan lens parametrelerinin yanında elektronların açısız dağılımını niteleyen iki farklı aberasyon vardır. Bunlar küresel ve kromatik aberasyonlardır. Küresel (veya geometrik) aberasyon, verilen bir voltaj değerinde oluşan eş potansiyel yüzeylerin kırıcılıklarının her yerde aynı olmamasından kaynaklanır. Burada oluşan eş potansiyel yüzeyler yarı-küresel olduğundan oluşan kusur küresel aberasyon katsayısı ( $C_s$ ) ile belirlenir. Şekil 8a da küresel aberasyonun oluşumu gösterilmektedir.  $\Delta r$  görüntü noktasında oluşan diskin yarıçapı,  $M$  lensin büyütmesi,  $C_s$  büyütmeyle ait küresel aberasyon katsayısı ve  $\alpha_0$  maksimum yarı-açı olmak üzere bu parametreler arasındaki ilişki

$$\Delta r = -MC_s\alpha_0^3 \quad (2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Elektronlar eş potansiyel yüzeylere dik bir kuvvetin etkisi altında kalırlar. Lensler arası boşluklara yakın yerlerde bu eş potansiyel yüzeyler geometrik olarak değişime uğrarlar. Elektrotlar arası boşluklarda eş potansiyel yüzeyler yatay hale gelmektedir. Böylece yüzeyin normaline göre etkiyen kuvvet, o bölgedeki elektron yörüngesi için daha kırılgen olmaktadır.



**Şekil 8: Küresel (a) ve Kromatik (b) Aberasyon Etkisinin Gösterimi ve Gaussian Odak Noktasında Disk Oluşumu.**

Kromatik aberasyon ise gelen elektron enerjilerinin farklı olmasından kaynaklanır ve bunun değeri kromatik aberasyon katsayısı ( $C_c$ ) ile belirlenir. Bu, ışık optiğindeki dalga boyları ve enerjileri farklı ışınların farklı oranlarda kırılmaya uğramalarına benzetilebilir. Şekil 8b de kromatik aberasyon oluşumu gösterilmektedir. Şekil 8 de gösterilen iki yörüngeden ilki, istenilen enerjide ( $qV_0$ ), diğeri ise ilkinden daha fazla enerjiye ( $qV_0 + \Delta V$ ) sahiptir. Enerjinin artması hızın artması anlamına geldiğinden, elektron daha az lens bölgesinde kalmış, böylece enerjisi az olan elektrona göre daha az kırılmaya uğramıştır. Bu ilişki aşağıda gösterilmektedir.

$$\delta r = M C_c \alpha_0 \frac{\Delta V}{V_0} \quad (3)$$

Burada  $\delta r$  enerjisi fazla olan parçacığın normal odak noktasındaki diskin yarıçapını göstermektedir.