

8439

**OPTİK SİSTEMLERDE MERCEK ABERASYONLARI VE
BUNLARIN BİLGİSAYAR YARDIMI İLE İNCELENMESİ**

Nurhan KARABOĞA

**ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ'NE
ELEKTRONİK ANABİLİM DALINDA YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK SUNULMUŞTUR**

OCAK - 1990

**T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi**

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma, Jürimiz tarafından Elektronik Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 22/ 1 /1990.

Başkan : Doç. Dr. Bekir Sami YILBAŞ *Bekir Sami Yilbaş*
Üye : Yrd. Doç. Dr. Kenan DANISMAN *Kenan Danisman*
Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ALGI *Mustafa Algi*


ONAY :

Yukarıdaki imzaların, adı geçen Öğretim Üyelerine ait olduğunu onay-
larım. 30/ 1 /1990.

Doç. Dr. Bekir Sami YILBAŞ
Enstitü Müdürü *Bekir Sami Yilbaş*

ÖZGEÇMİŞ

Nurhan Karaboğa, 1965 yılında Osmaniye'de doğdu. Kayseri Lisesini bitirdikten sonra 1983 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Bölümüne girdi. 1987 yılında mezun oldu. 1988 yılında aynı Fakülte Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu göreve devam etmektedir.



Ö N S Ö Z

Fiziksel ve biyolojik dünya hakkındaki bilgilerimizin çoğunluğunu mikroskop, teleskop, kamera ve diğer optik cihazları kullanmamız sayesinde elde etmekteyiz.

Bu gibi sistemlerin dizaynının temel kısmı, sistem boyunca ışınların izlenmesi ve aberasyon olarak adlandırılan, ideal görüntüden sapmaların belirlenmesidir.

Böyle çok önemli bir konuda bana çalışma fırsatı veren, yardımlarını esirgemeyen değerli Hocam Doç.Dr.Bekir Sami YILBAŞ Bey'e teşekkür eder ve gelecek çalışmalara yararlı olmasını temenni ederim.

Nurhan KARABOĞA

Ö Z E T

Çalışmanın ilk bölümünde konuya giriş yapılarak Fermat prensibi ve Snell Kanunu hakkında bilgi verilmiş, ikinci ve takip eden bölümlerde odak uzaklığı, Gauss görüntü, dalga cephesi, küresel aberasyon ve bunun mercek şekline bağlı değişimini belirlemek için paraksiyal yaklaşım incelenmiştir.

Yedinci bölümde sistem dizaynı için sonlu ışın izleme (finite ray tracing) nin önemi belirtilerek iki boyutta incelenmiştir. Sekizinci bölümde değişik veriler için bilgisayar programlarının neticeleri tartışılmıştır. Aberasyonu en düşük düzeye indirmek için bazı parametrelerin uygun değerleri, bilgisayar programları yardımıyla, daha kısa sürede bulunmuştur.

S U M M A R Y

In the beginning of the study, giving knowledge about the Fermat's principle and Snell's Law, the paraxial approximation that has allowed us to determine the focal length, Gaussian image plane and a measure of the wavefront spherical aberration and its variation with lens shape has considered.

When a design has approached a sufficient minimum in aberration - which may require changes in refractive indices and elements separations as well as changes in curvatures - Then it is time to trace some actual rays through the system procedure for doing this which is called finite ray tracing. In the section 7, this has been considered.

After that two computer programs and results of them and suggestions for further study were given.

S E M B O L L E R

A	: Snell kırılma sabitliğinin paraksiyal değeri	
$bf\ell'$: Arka odak uzunluğu	(m)
C	: Eğrilik merkezi	
C'	: Vakumda ışığın sabit hızı	(m/s)
C_s	: Yüzey eğriliği	
D	: Herhangi bir ışının toplam optik yolu	(m)
D	: Esas ışının toplam optik yolu	(m)
d	: Uzaklık	(m)
F	: Odak noktası	
f'	: Nodal nokta ile odak noktası arasındaki mesafe (Odak uzaklığı)	(m)
$ff\ell$: Ön odak uzunluğu	(m)
gip'	: Görüntü mesafesi	(m)
h	: Cisim yüksekliği	(m)
h'	: Görüntünün yüksekliği	(m)
I	: Gelen ışının normale yaptığı açı	(Derece)
I'	: Kırılmış ışının normale göre yaptığı açı	(Derece)
i	: Marjinal ışının geliş açısı	(Derece)
i_s	: Gelme açısı	(Derece)
i_s'	: Kırılma açısı	(Derece)
K_s	: Yüzey gücü	(W/m^2)
ℓ	: Yüzeyden olan uzaklık	(m)
n	: Kırılma indisi	
n_s	: S nci yüzeyin kırılma indisi	
P'	: Nodal nokta	
r	: Yarıçap	(m)
r_s	: s nci yüzeyin yarıçapı	(m)
s	: Geometrik yol	(m)
t	: Zaman	(sn)
u	: Alan açısı	(Derece)
u_j	: Işının son yüzeyi terk etme açısı	(Derece)
u_s	: S inci yüzeyde ışının eksenle yaptığı açı	(Derece)
u_s'	: Kırılmadan sonra ışının eksenle yaptığı açı	(Derece)
v	: Hız	(m/s)
Y	: Işının ilk yüzeye maksimum geliş yüksekliği	(m)
y_j	: Son yüzeydeki ışın yüksekliği	(m)

y_s	: s nci yüzeyde ışın geliş yüksekliği	(m)
w	: Optik yol farkı	(m)
α	: y yüksekliğinin merkezde oluşturduğu açı	(Derece)
β	: Alan açısı	(Derece)



İ Ç İ N D E K İ L E R

	<u>Sayfa</u>
1. GİRİŞ	1
1.1. FERMAT PRENSİBİ	1
2. PARAKSİYAL YAKLAŞIMLA IŞIN İZLEME	3
2.1. KIRILMA VE GEÇİŞ	5
2.2. IŞIN İZLEME İŞLEMİ	7
3. DURDURUCULAR VE ARALIKLAR	10
4. ODAK UZAKLIĞI	12
4.1. GAUSS: GÖRÜNTÜ	13
5. MERCEK ABERASYONU	15
5.1. BİR KIRILMADAN DOLAYI MEYDANA GELEN ABERASYON	15
5.2. KÜRESEL ABERASYON	17
6. EĞİLME	22
6.1. EĞİLME ETKİSİ	24
7. SONLU IŞIN İZLEME	25
7.1. İKİ BOYUTLU SONLU IŞIN İZLEME	25
8. BİLGİSAYAR PROGRAMLARI	33
8.1. ÖRNEK VERİ	34
8.2. SİBEND'İN SONUÇLARI	35
8.3. RAYTRC'DEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	38
9. SONUÇ	43
KAYNAKLAR	45
EK-1	46
EK-2	

B Ö L Ü M - I

1. GİRİŞ

Biyolojik ve fiziksel dünya ile ilgili bilgilerin çoğunluğu mikroskop, teleskop, kamera ve diğer optik cihazların kullanılmasıyla elde edilir. Bu sayılan cihazlar, sadece gözlerle görülebilenlerden daha detaylı veya daha net bir görüntü elde etmek için, ışık dalgalarını kullanırlar. Böyle optik sistemlerin dizaynının temel kısmı, sistem boyunca ışınların izlenmesi ve aberasyon (aberration) olarak adlandırılan ideal görüntüden sapmaların belirlenmesidir.

Görüntülerin oluşmasında ve ışığın yayınıminin incelenmesinde iki konu önemlidir. Bunlara dalga cephesi ve ışın (ray) dır. Dalga cephesi ışığın aynı zaman içinde ulaştığı noktaların oluşturduğu hat olarak tanımlanır. Cam gibi izotropik malzemelerde ışınlar dalga cephesine diktir.

1.1. FERMAT PRENSİBİ

Dalga cephesi ve ışın arasındaki temel bağıntı Fermat Prensibiyle belirlidir. Geometrik optik yaklaşım (GO), Maxwell teorisinin $w \rightarrow \infty$ (veya $\lambda \rightarrow 0$) için bir yaklaşımından ibarettir. Bu halde, elektromagnetik alan ışığın özelliklerine benzer bir davranış gösterir ; yani yüksek frekanslı dalgalar ışın adı verilen çizgiler boyunca yayılırlar. Işınların belirlenmesinde geçerli olan yasa Fermat ilkesidir. Bu ilke, iki noktayı birleştiren bir ışın üzerinde ölçülen optik yolun sabit olduğunu

gösterir [1] . Basit ortamlar içinde ışınlar kırık yapıda olan doğru çizgilerden oluşurlar.

Işığın aldığı yoldaki değişim,

$$\delta \int dt = 0 \quad (1)$$

olarak yazılır. Burada δ sabit ve t ise zamandır. İntegral uygun sınırlar arasında alınır. Şayet dalganın hızı v (veya diğer bir deyişle ds/dt) ve kırılma indisi $n = c/v$ ise denklem (1),

$$\delta \int n \cdot ds = 0 \quad (2)$$

olacaktır. Burada c vakumda ışığın sabit hızıdır. $\int n \cdot ds$ büyüklüğü ışın boyunca optik yol olarak adlandırılır. Sabit kırılma indisli bölgeler için $\int n \cdot ds = ns$ yazılabileceğinden,

$$\text{Optik yol} = \text{Kırılma indisi} \times \text{Geometrik yol}$$

olarak ifade edilebilir. Fermat prensibinden anlaşıldığı üzere, ışık ışınları bilinen optik kanunlarına tabidir [2] . Kırılma indisi n olan ortamdaki (gelen ışın olarak adlandırılan) bir ışın, bu ortamı kırılma indisi n' olan bir ortamla ayıran yüzeye, normale göre I açısı ile çarparsa, normale göre I' açısı yapar ve kırılmış ışın olarak yoluna devam eder. Kırılma kanunları şunlardır ;

- a) Gelen ışın, kırılan ışın ve normal bir düzlemedir.
- b) Açılar ve kırılma indisleri Snell kanununa uyarlar denklem (3),

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (3)$$

B Ö L Ü M - II

2. PARAKSİYAL YAKLAŞIMLA IŞIN İZLEME (RAY TRACING)

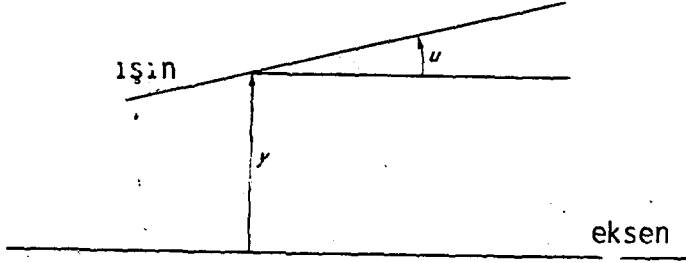
Işığın dalga formunda olmasından dolayı, fiziksel olarak tüm ışınların tek bir cisim noktasından ayrılarak, tek bir görüntü noktasına yakınsandığı ideal bir optik sistem düzenlemek imkansızdır. Hatta geometrik optik kuralı içerisinde benzeri ideal sistem sadece bir kaç durumda gerçekleştirilebilir. Bunların en basit örneği düzlem aynadır [3] .

Bununla birlikte durum görüldüğü kadar kötü değildir. Çünkü ideal sisteme yeteri derecede yaklaşım, pratik olarak kullanışlı olacak şekilde sağlanabilir. İdeal görüntüye yaklaşmamız için aberasyonları en alt seviyeye indirmemiz gerekir. Aberasyonlar, geometrik optik kurallarını kullanan ışın izleme (ray tracing) ile belirlenir. Paraksiyal ve Gauss yaklaşımı olarak bilinen yaklaşımda, tüm ışınların sistemin eksenine yakın ve tüm açılarının çok küçük olduğu kabul edilir. Bu kabullerle paraksiyal denklemler, bu denklemlerin kullanılmasıyla da:

- 1) Sistemin odak uzaklığı,
- 2) İdeal (veya Gauss) görüntünün konumu (ki bundan sapmalar belirlenebilir),

- 3) Gauss görüntü ile gerçek ışın arasındaki optik yol bakımından farklılık ölçülerek görüntü aberasyonunun hesaplanması yapılır.

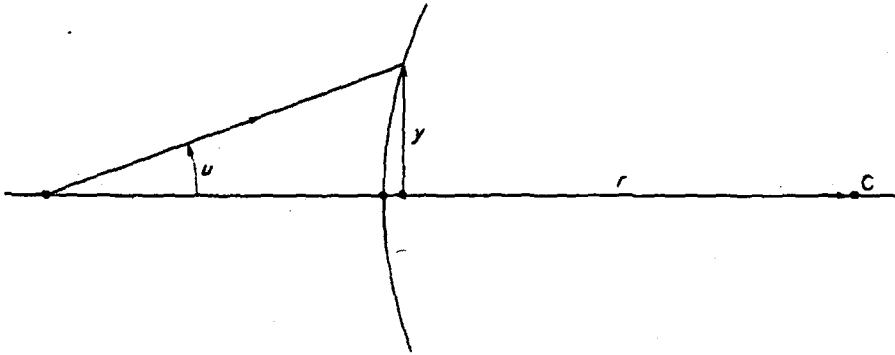
Sistemin tek bir simetri eksenine sahip olduğunu ve bir paraksiyal ışının Şekil-1.1'de gösterildiği gibi u ve y gibi iki parametre ile tanımlandığını kabul edelim. Şekil-1.1'de u ışının eksenle yaptığı açı, y ise eksenenden ışının herhangi bir noktasına olan mesafedir.



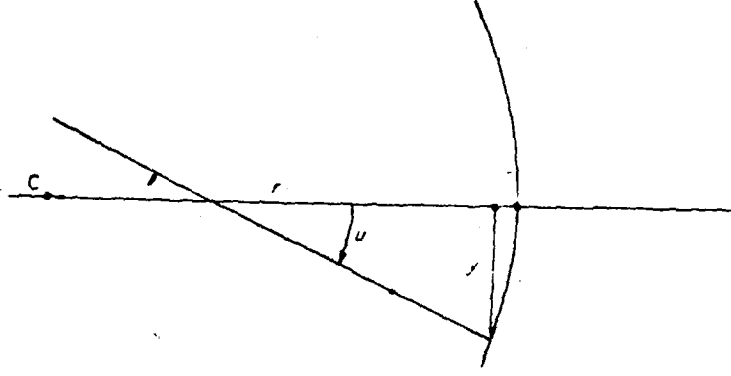
Şekil-1.1 : Işın parametreleri



Şekil-1.2 : Başlangıç ve bitiş parametreleri



Şekil-1.3 : Pozitif parametreler



Şekil-1.4 : Negatif parametreler

Şekil-1.2'de gösterildiği gibi bir ışının izlenmesi, sistemin ilk yüzeyine giriş yaptığı y_1 yüksekliği ve u_1 açısı verildiği takdirde, ışının son yüzeyi (J.) terk etme anındaki y_2 yüksekliği ve u_2 açısının belirlenmesi demektir.

Şayet yüzeyler iç bükümlü ise bu durumda r yarıçapı pozitiftir. Şekil-1.3 ve 1.4 (C eğrilik merkezi) sırası ile tüm büyüklüklerin pozitif ve negatif olduğu durumları göstermektedir. Işın izleme işlemi iki kısma ayrılır. Bunlar, yüzeydeki kırılma (refraction) ve bir yüzeyden diğerine geçiştir.

2.1. KIRILMA VE GEÇİŞ

Şekil-2.1'deki kırılma indisleri n_s ve n'_s olan farklı iki bölgeyi ayıran r_s yarıçaplı S nci AB yüzeyi gösterilmektedir. Bir ışının kırılmadan önce ve sonra eksenle sırasıyla u_s ve u'_s açılarını yaptığını farz edelim. Yine ışının i_s ve i'_s ile gösterilen gelme ve kırılma açılarına sahip olduğunu varsayalım.

Buna ilâve olarak, yüzey eğrilik merkezinin C ve geliş yüksekliği y_s nin merkezle α_s lik bir açı oluşturduğunu kabul edelim. Şekil-2.1'den

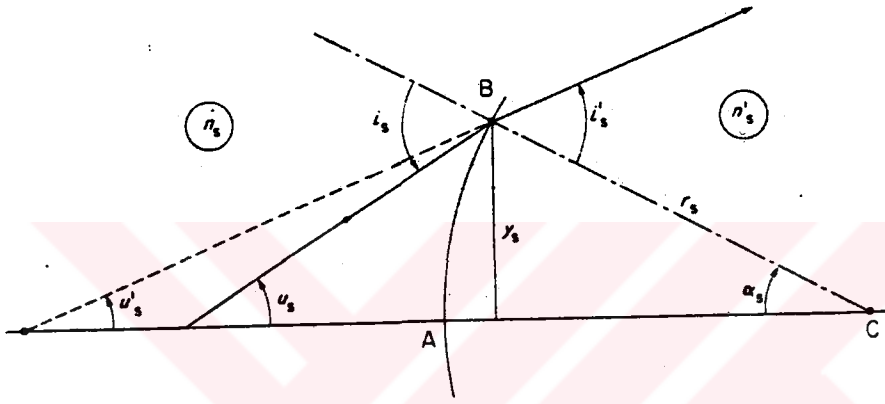
$$i_s = \alpha_s + u_s \quad (4)$$

$$i'_s = \alpha_s + u'_s$$

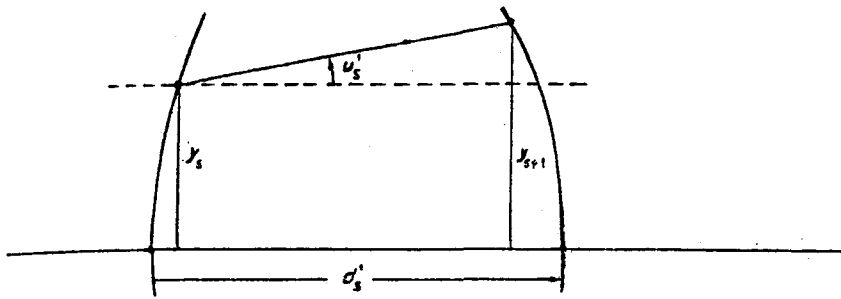
yazılır. Küçük açılar için denklem (3) den $n'.i' = n.i$ ve

$$n'_S (\alpha_{S'} + u'_S) = n_S (\alpha_S + u_S) \quad (5)$$

olur.



Şekil-2.1 : Kırılma



Şekil-2.2 : Geçiş

Aynı zamanda küçük açılar için $\alpha_S = y_S \cdot C_S$ olup burada yüzey eğriliği $C_S = 1/r_S$ dir (şunu belirtmek gerekirkki ; $r_S \rightarrow \infty$ olduğu zaman $C_S \rightarrow 0$ ve böylece düzlem yüzeyler için nümerik değerler kullanılabilir). α_S nin yerine konulmasıyla,

$$n'_s u'_s = n_s \cdot u_s - y_s \cdot K_s \quad (6)$$

elde edilir. Burada K_s , yüzey gücü olup,

$$K_s = (n'_s - n_s) \cdot C_s \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Işın yüzeyden y_s yüksekliğinde eksenle u'_s açısı yaparak geçtikten sonra (s+1) nci yüzeye gelir. Işınla yüzeyin kesiştiği yüksekliğe y_{s+1} ve s nci yüzeye s+1 nci yüzey arasındaki aksenal uzaklığa d'_s diyelim. Şekil-2.2'de görüldüğü gibi küçük açılar ve yükseklikler için,

$$y_{s+1} = y_s + d'_s u'_s \quad (8)$$

yazılır.

2.2. IŞIN İZLEME İŞLEMİ (RAY TRACING PROCEDURE)

Herhangi bir ışın, bir sistem boyunca denklem (6) ve (8) e göre ilerler. Şunu belirtmek gerekir ki, her bir yüzeyde $n_{s+1} = n'_s$ ve $u_{s+1} = u'_s$ dir. Işının ilerlemesi aşağıdaki iki yoldan biriyle başlayabilir ;

1) Şekil-2.3'de gösterildiği gibi, geliş yüksekliği y ile birlikte ilk yüzeyden ℓ_1 kadar uzaklıkta cisimde (object) bir başlangıç aksenal 0 noktası seçilir. O zaman, küçük açılar için u_1 açısı,

$$u_1 = y_1 / \ell_1 \quad (9)$$

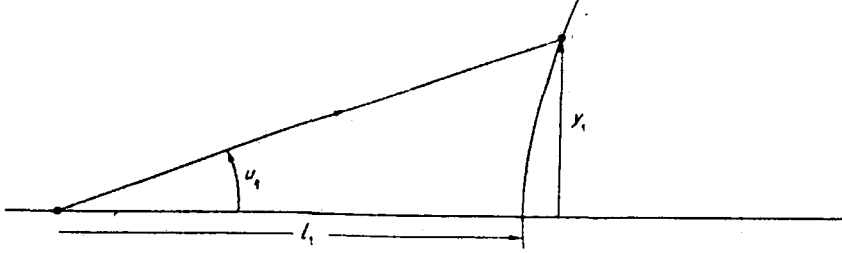
olur ve ilerleme bir kırılma ile başlar.

2) İlk yüzeyden ℓ_1 uzaklığında (Şekil-2.3) h yüksekliğinde bir cisim ve ilk yüzeyin merkezinden geçmekte olan bir ışın seçilir. Bu durumda,

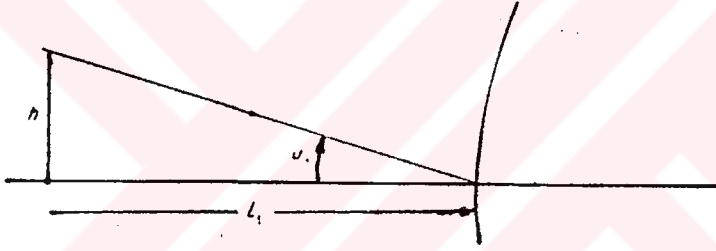
$$y_1 = h$$

$$u_1 = -h / \ell_1 \quad (10)$$

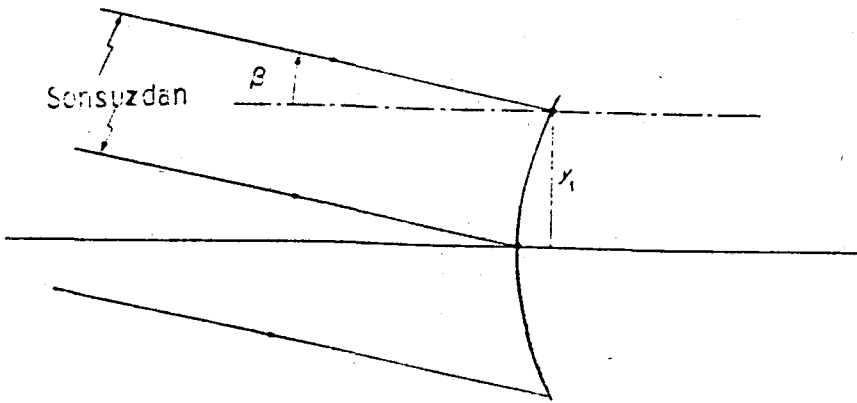
yazılır ve ilerleme bir geçişle başlar.



Şekil-2.3: Belirli bir geliş yüksekliğindeki ışınla başlama



Şekil-2.4: Bilinen bir cisim yüksekliğinden gelen ışınla başlama.



Şekil-2.5: Sonsuzdan gelen ışınlar (β alan açısı ile).

Şunu belirtmek gerekir ki, sonsuzdaki cisimler için h ve l_1 sonsuza gider. Ama alan (field) açısı $\beta = -y_1/l_1$ sabit kalır. Bu Şekil-2.5'de gösterilmektedir. Şayet ilk yüzeyle y_1 yüksekliğinde kesişen bir ışın seçilirse ($u_1 = \beta$) ilerleme bir kırılma ile başlar.



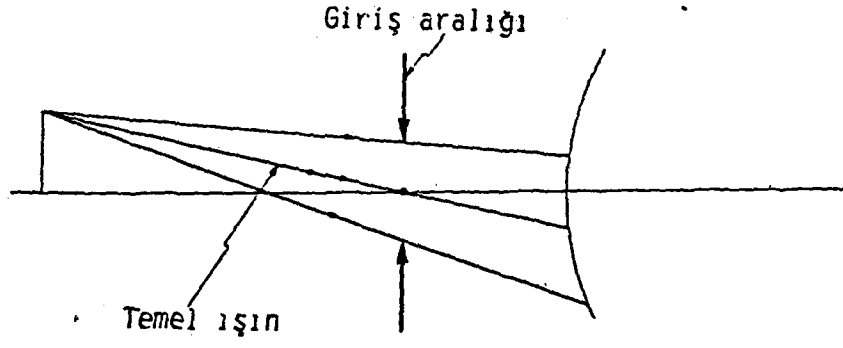
B Ö L Ü M - III

3. DURDURUCULAR (STOPS) VE ARALIKLAR (PUPILS)

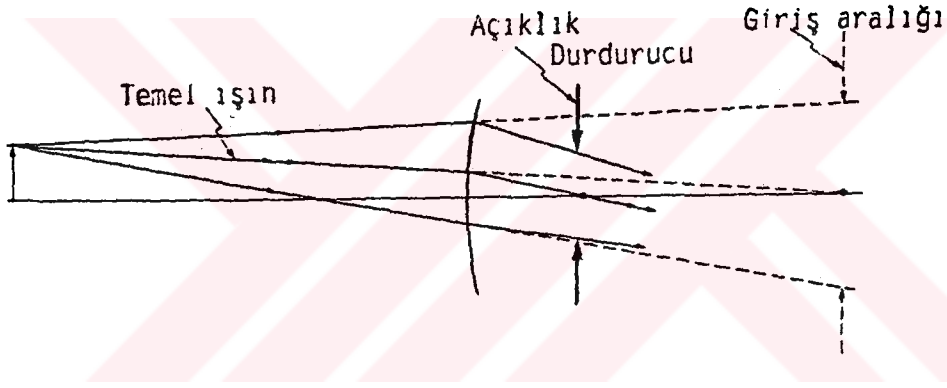
Şunu hatırlatmak gerekir ki, Bölüm-2'de ifade edilen yüzey $n' = n$ ve $C = 0$ olan basit bir dairesel delik olabilir. Böyle açıklıklar (delikler) veya durdurucular, optik sistemlere, sistem boyunca geçen ışınların büyüklüğünü sınırlandırmak ve aynı zamanda aberasyonu kontrol etmek için yerleştirilirler. Bir optik sistemde değişik durdurucular ve mercek açıklıkları vardır. Eksen üzerinde aldığımız bir cisimden ayrılan ışın, eksene göre, en küçük açıyı oluşturacak ve cisim kenarından da görülecektir. Bu giriş aralığı (entrance pupil) olarak bilinir ve ışının eksene yaptığı maksimum açıyı sınırlar. Böylece cisim noktasından ayrılan ışın tüm sistem boyunca ilerler.

Aralık, bir durdurucunun görüntüsü ise bu durdurucu, açıklık durdurucu olarak adlandırılır (Şekil-3.2). Aralık gerçekse durdurucu kendi başına bir açıklık durdurucudur. Görüntü tarafından görüldüğü gibi, giriş aralığının görüntüsü çıkış aralığı (exit pupil) dır. Bir aksenel olmayan cisim (off-axis object) için aralık, sistem boyunca geçen ışınların açısal açıklığını (angular aperture) kontrol edecektir.

Sistem boyunca geçebilecek ışınların oluşturacağı koniyi tanımlayan giriş aralığının merkezinden geçen ışın önemlidir. Bu ışın temel ışın (principle ray) olarak bilinir. Şekil-3.1 ve 3.2 optik sistemdeki temel ışınları ve durdurucu ve aralıkları göstermektedir.



Şekil-3.1: Bir gerçek aralık için temel ışın ve giriş aralığı.

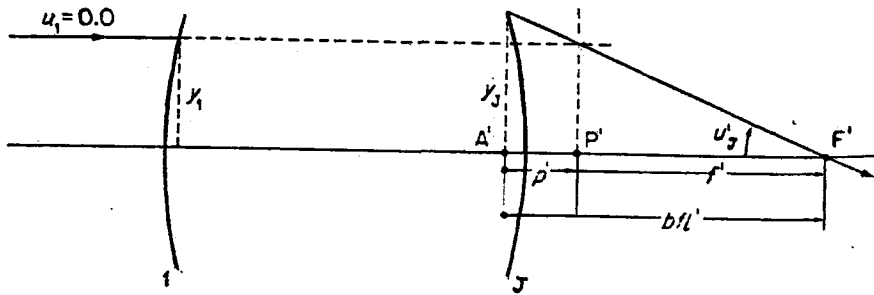


Şekil-3.2 : Bir görünür aralık için temel ışın ve giriş aralığı

B Ö L Ü M - IV

4. ODAK UZAKLIĞI

Başlangıç açısı u_1 , sıfır ve başlangıç yüksekliği y_1 sonlu bir değere sahipse, bu durumda odak noktası belirlenebilir. Işın, sistem boyunca geçtikten sonra (teleskop olarak bilinen sistemler hariç) u_2 sonlu açısı ile ve y_2 yüksekliğiyle son yüzeyi terk eder ve F' odak noktasından geçer. Başlangıçtaki ışın ile son ışının kesme noktasının eksen üzerindeki izdüşümüne esas (principal) nokta denir ve P' ile gösterilir. Son yüzeyden F' noktasına olan uzaklık arka odak uzaklığı (back focal length) olarak bilinir ve bfl' ile gösterilir (Şekil-4.1).



Şekil-4.1 : Odak parametreleri P' , F' , p' , f' , bfl'

Şekil-4.1'den

$$\text{Odak uzaklığı} \quad f' = -y_1/u'_J \quad (11)$$

$$\text{Arka odak uzaklığı} \quad bf\ell' = -y_J/u'_J \quad (12)$$

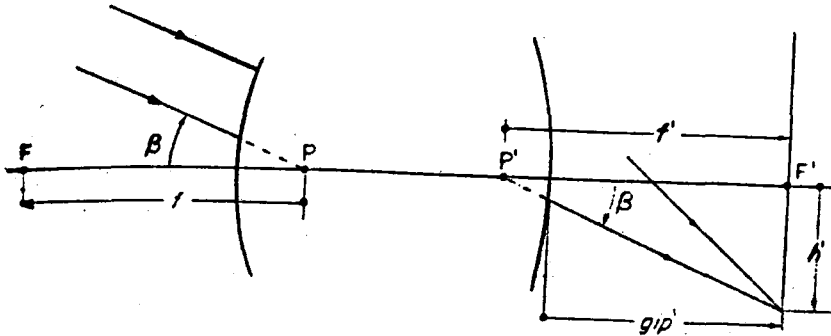
$$\text{Esas noktanın konumu} \quad P' = bf\ell' - f' \quad (13)$$

olduğu görülmektedir.

$u_1 = 0.0$ ve sonlu y_1 değeri için F ve P noktaları ve f, p ve $bf\ell'$ mesafeleri Şekil-4.1'de gösterilmektedir. $n_1 = n'_J$ olan sistemlerde odak uzaklıkları f ve f' nümerik olarak eşittirler. P ve P' temel noktaları nodal noktalar olarak adlandırılır. Cisim tarafından P noktasına doğru giden bir ışın, görüntü tarafında, sistemi sanki P' den ayrılıyormuş gibi terk eder. Bu durum Şekil-4.2'de görülmektedir.

4.1. GAUSS GÖRÜNTÜ (GAUSSIAN IMAGE)

Sistemin son yüzeyine göre olan görüntü Gauss görüntü olarak adlandırılır. Sistemin son J nci yüzeyine göre Gauss veya paraksiyal görüntünün konumu gip' ve görüntünün büyüklüğü h' dür.



Şekil-4.2 : Gauss görüntü düzlemi ve sonsuz bir cisim için büyüklüğü

Sonsuzdaki bir cisim için Şekil-4.2'den görüldüğü gibi görüntü mesafesi,

$$gip' = b f \ell' \quad (14)$$

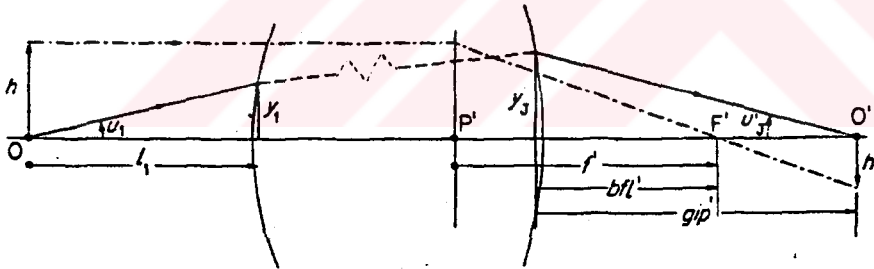
ve büyüklüğü

$$h' = f' \beta \quad (15)$$

dır. İlk yüzeyden ℓ_1 kadar uzaklıkta ve h büyüklüğünde bir cismin görüntü yerini, ışının eksen boyunca aldığı yol takip edilerek bulunur. Eksen üzerindeki O noktasından u_1 açısıyla ayrılan ışının görüntü yeri ise bu O noktasından ayrılan paraksial ışının izlenmesi suretiyle bulunur.

$y_1 = \ell_1 - u_1$ dir. Görüntü yeri Şekil-4.3'de gösterilmektedir. Şekil-4.3'den

$$gip' = y_J / u_J' \quad (16)$$



Şekil-4.3 : Gauss görüntü düzlemi ve sonlu bir cisim için büyüklüğü

Görüntü büyüklüğü Şekil-4.3'den şu şekilde elde edilir;

$$\frac{-h'}{F'O'} = \frac{h}{P'F'}$$

$$h' = - (gip' - bf\ell') \cdot h/f' \quad (17)$$

B Ö L Ü M - V

5. MERCEK ABERASYONLARI (LENS ABERRATIONS)

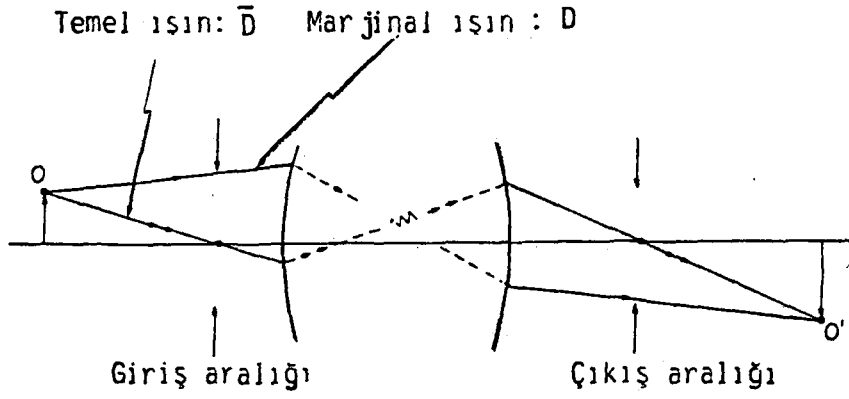
Mükemmel bir optik sistemde, noktasal bir cisimden (O) ayrılan tüm ışınlar O' ile gösterilen bir nokta görüntüye yakınsanır. Cisimden görüntüye kadar tüm sistem boyunca giden ışınlara Fermat prensibi uygulandığında, ışınların takip ettikleri optik yolların eşit olduğu görülür. Herhangi bir gerçek optik sistemin hatalarını ölçmek için uygun yol, ışınların optik yollarındaki farklılığından faydalanmaktır. Bu işlem, daha sonra seçilecek esas ışın (referans ışın) la verilen herhangi bir ışının optik yolunun karşılaştırılmasıyla yapılır. Bu durum Şekil-4.1'de gösterilmektedir.

$$W = \bar{D} - D \quad (18)$$

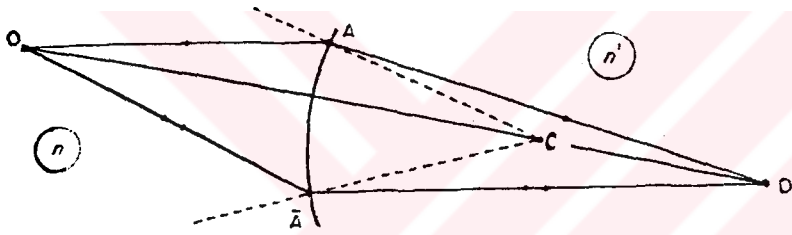
Burada \bar{D} esas ışının, D ise alınan herhangi bir ışının toplam optik yoludur.

5.1. BİR KIRILMADAN DOLAYI MEYDANA GELEN ABERASYON

Şekil-5.2'de O, n kırılma indisine sahip bir ortamdaki cisim, O' ise n' kırılma indisine sahip ortamdaki O cisminin görüntüsüdür.



Şekil-5.1 : Temel ışın ve marjinal ışın



Şekil-5.2 : Kırılmadan dolayı dalga aberasyonu

Bu durumda

$$\bar{D} = n \cdot O\bar{A} + n' \cdot \bar{A}O' \quad (19)$$

$$D = n \cdot OA + n' \cdot AO'$$

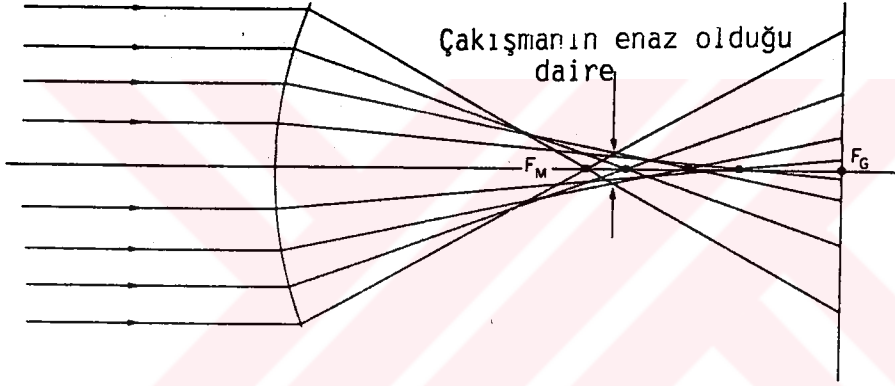
ve optik yoldaki fark, denklem (18) ile belirlendiği gibi,

$$\begin{aligned} w &= n' (\bar{A}O' - AO') + n (O\bar{A} - OA) \\ &= n' (\bar{A}O' - AO') - n (\bar{A}O - AO) \\ &= \Delta \{ n (\bar{A}O - AO) \} \end{aligned} \quad (20)$$

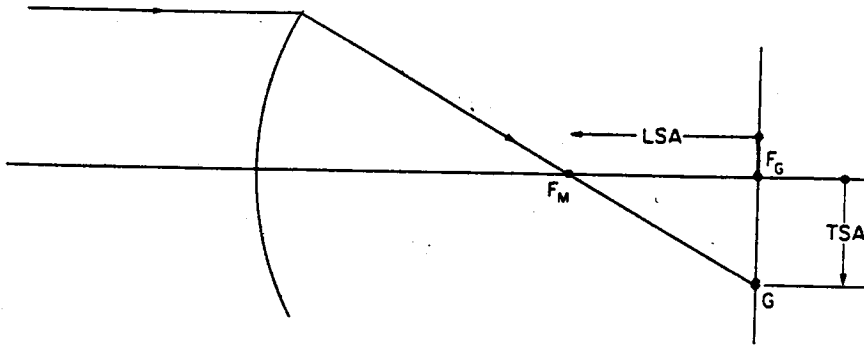
olur. Burada Δ kırılmadan önce ve sonraki ifadelerdeki değer farkıdır.

5.2. KÜRESEL ABERASYON (SPHERICAL ABERRATION)

Eksen üzerinde alınan cisimler için, hali hazırda en önemli aberasyon küresel aberasyondur ve aynı zamanda en iyi şekilde Denklem (20) den hesaplanır. Şekil-5.3 ve 5.4'de gösterildiği gibi, farklı geçiş yükseklikleri için meydana gelen odaklama konumlarının genel biçimi küresel aberasyon adını alır. Gauss odak F_G dir ve paraksial ışın izleme (tracing) denklemlerinden elde edilir.

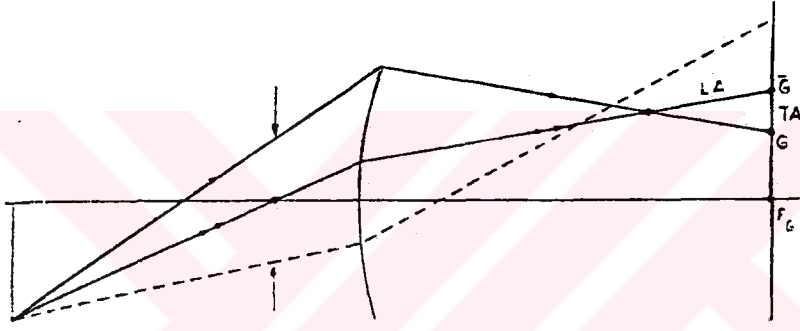


Şekil-5.3 : Küresel aberasyon

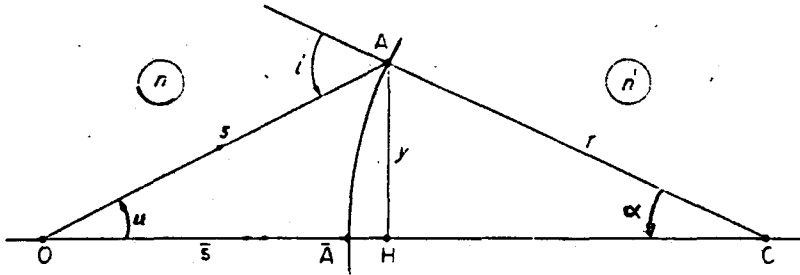


Şekil-5.4 : Boylamsal ve enlemsel küresel aberasyon

Marjinal odak, F_M ile Gauss odak F_G arasındaki eksen boyunca uzaklığa "boylamsal küresel bozulma" (longitudinal spherical aberration) (LSA) denir. F_G ile Gauss görüntü düzlemini G'de kesen marjinal ışın arasındaki mesafeye "enlemsel küresel bozulma" (transverse spherical aberration) (TSA) denir. Şekil-5.3'de görüldüğü gibi eksenel olmayan cisimler için de benzer sonuçlar elde edilir. Eksenel bir cisim için Şekil-5.2'yi tekrar çizelim (Şekil-5.6'da görüldüğü gibi). AA, merkezi C, yarıçapı r, kırılma indisleri n ve n' olan ortamları ayıran bir yüzey olsun. A ile A noktalarını merkeze birleştiren doğrular arasındaki açı α , eksenel cisim O'dan gelen marjinal ışın OA'nın geliş açısı (i) olsun.



Şekil-5.5 : Eksenel olmayan cisim için boylamsal ve enlemsel aberasyon.



Şekil-5.6 : Dalga aberasyonunun hesaplanması.

Bu durumda,

HA = y, $\bar{AO} = \bar{s}$ ve AO = s ile gösterilsin. 0 zaman Şekil-5.6'dan

$$\bar{AH} = r (1 - \cos \alpha)$$

$$OH = \bar{s} + r (1 - \cos \alpha) = s \cos u$$

$$\bar{AO} - AO = \bar{s} - s = s (\cos u - 1) + r (\cos \alpha - 1)$$

$$y = s \sin u = r \sin \alpha$$

$$\bar{s} - s = y \left[\frac{(\cos u - 1)}{\sin u} + \frac{(\cos \alpha - 1)}{\sin \alpha} \right]$$

$$= -y \left[\tan(u/2) + \tan(\alpha/2) \right]$$

$$= -y \left[\sin(u/2) \cos(\alpha/2) + \sin(\alpha/2) \cos(u/2) \right] \sec(\alpha/2) \sec(u/2)$$

$$= -y \sin\left(\frac{u + \alpha}{2}\right) \sec(\alpha/2) \sec(u/2)$$

yazılabilir. Böylece,

$$i = u + \alpha$$

olduğundan,

$$\bar{s} - s = -y \sin(i/2) \sec(\alpha/2) \sec(u/2)$$

$$= -\frac{1}{2} y (\sin i) \sec(\alpha/2) \sec(u/2) \sec(i/2)$$

elde edilir. Sekant terimlerini üçüncü dereceye kadar seri şeklinde yazmak suretiyle,

$$\bar{s} - s = -\frac{1}{2} y \sin i \left(1 + \frac{\alpha^2}{8}\right) \left(1 + \frac{u^2}{8}\right) \left(1 + \frac{i^2}{8}\right) + \dots$$

$$= -\frac{1}{2} y \sin i - \frac{1}{16} y \sin i (\alpha^2 + u^2 + i^2) + \dots$$

elde edilir ve denklem (20) den ,

$$W = -\frac{1}{2} \Delta (yn \sin i) - \frac{1}{16} \Delta (yn \sin i (\alpha^2 + u^2 + i^2) \dots) \quad (21)$$

bulunur. y , α ve $n \sin i$ bir yüzeye karşılık gelen sabitler olduğuna göre ,

$$\Delta (yn \sin i) = yn' \sin i' - yn \sin i = 0$$

ve α 'yı içeren terimler için de benzer şekilde, denklem (21) den,

$$\begin{aligned} W &= -\frac{1}{16} y (n \sin i) \Delta (u^2 + i^2) \\ &= -\frac{1}{16} y (n \sin i) \Delta [(i - u)^2 + 2ui] \\ &= -\frac{1}{16} y (n \sin i) \Delta (\alpha^2 + 2ui) \\ &= -\frac{1}{8} y (n \sin i) \Delta (ui) \\ &= -\frac{1}{8} y (n \sin i) \Delta \left[\frac{u}{n} (n \sin i) \frac{i}{\sin i} \right] \\ &= -\frac{1}{8} y (n \sin i)^2 \Delta \left(\frac{u}{n} \right) \left(1 + \frac{1}{6} \sin^2 i + \dots \right) \end{aligned}$$

elde edilir. Burada,

$$i = \text{Sini} + \frac{1}{6} (\text{Sin}^3 i) + \dots$$

eşitliği kullanıldı. Netice olarak i 'nin üçüncü dereceye genişletmek suretiyle w nin ilk terimi S_1 için,

$$S_1 = - \frac{1}{8} yA^2 \Delta (u/n) \quad (22)$$

bulunur. Burada, $A = ni$ Snell kırılma sabitliğinin paraksial değeridir. Kırılmanın neticesi olarak her bir yüzey S_1 'e eşit miktarda "dalga cephesi küresel bozulma" oluşturur (wavefront spherical aberration) ve yüzeylerin oluşturduğu bir sistem için, üçüncü dereceye kadar toplam aberasyon, transfer işlemi herhangi yeni bir aberasyon meydana getirmediğinden [4] her bir yüzeyde meydana gelenlerin toplamına eşittir.

Bilgisayar hesapları esnasında n , c , u ve y bilinen değerlerinden her bir yüzeydeki S_1 değeri belirlenir.

$$\Delta (u/n) = u'/n' - u/n$$

ve

$$A = ni = n(u + \alpha) = nu + nyc$$

olacaktır.

B Ö L Ü M - VI

6. EĞİLME (BENDING)

Bir tasarım yapıldıktan sonra aberasyon hesaplanır. Elbetteki dizayn işlemi aberasyonu en aza indirmek için tekrarlanabilir. Bunu yapmak için en basit yol, cam tiplerini ve sabit ayrılmaları (seperation) belirlemektir (ama sistematik bir yolla yüzey eğrilikleri değiştirilebilir). Çünkü aberasyon bu parametreye çok bağlıdır. Bunun da en kolay yolu, herbir eğriliğe sabit Δc miktarını ilave etmek ve aberasyonu tekrar hesaplamaktır. Δc kadar miktar eklendiğinde, eğriliği pozitif olan yüzeylerin eğriliği artacak, buna karşılık negatif eğriliği olan yüzeylerinki azalacaktır. Şayet bu şekilde yapılırsa odak uzaklığı değişir. Bundan sakınmak için izlenen yol (ilk olarak Hopkins [5] tarafından gösterildi) aşağıda anlatılacağı şekilde eğriliği değiştirmektir. α açısı, $\Delta\alpha$ sabit miktarıyla değiştirilir veya diğer bir deyişle her bir yüzeydeki Δc 'yi $\Delta\alpha = y \cdot \Delta c$ olacak şekilde y yüksekliğiyle ters orantılı olarak değiştirmektir.

Daha önceden gösterildiği gibi (Denklem (6)) herbir yüzeydeki kırılma için :

$$n'_s u'_s - n_s u_s = - (n'_s - n_s) \alpha_s$$

$$n'_1 u'_1 - n_1 u_1 = (n_1 - n'_1) \alpha_1$$

$$n_2' u_2' - n_2 u_2 = (n_2 - n_2') \alpha_2$$

$$n_J' u_J' - n_J u_J = (n_J - n_J') \alpha_J$$

yazılabilir.

Toplama şeklinde ifade edilebilmesi için şu gerçek göz önünde bulundurulur:

$$n_2 = n_1' \quad , \quad u_2 = u_1' \quad , \quad \dots$$

Sonuçta,

$$n_J' u_J' - n_1 u_1 = n_1 \alpha_1 - n_J' \alpha_J + \sum n_J (\alpha_J - \alpha_{J-1})$$

elde edilir.

Bir optik sistemde başlangıç ve son yüzey kırılma indisleri aynı olmaktadır. Yani (hava için),

$$n_J' = n_1 = 1.0$$

dır ve,

$$u_J' - u_1 = (\alpha_1 - \alpha_J) + \sum n_J (\alpha_J - \alpha_{J-1}) \quad (23)$$

bulunur.

Şayet denklem (23) teki α nın herbir değeri aynı $\Delta\alpha$ ile değiştirilirse, sağ taraf değişmeden sabit kalır. Böylece verilen herbir u_1 için son açı u_J' değiştirilemez ve denklem (11) den sistemin odak uzaklığı başlangıç değerinde kalır.

6.1. EĞİLME ETKİSİ

Eğilme etkisi, $\Delta\alpha$ nın parabolik bir fonksiyonu olarak S_1 in değişimini elde etmektir. Bu Şekil-8.3 de görölmektedir. Bu fonksiyon $\Delta\alpha$ ekseninden geçebilir veya geçmeyebilir. İlk durumda mercek şeklinin seçimi diğer aberasyonların olup olmadığına da bağlıdır (özellikle coma olarak bilinen asimetrik aberasyon. Bu genelde S_1 in dönme noktası değerine yakın bir yerde meydana gelir). ikinci durumda S_1 in nümerik olarak minimum değeri, dağılımları veya kırılma indislerini değiştirmek suretiyle sıfıra doğru yaklaştırılabilir. Ama bu her zaman sistematik bir manada yapılamaz.



B Ö L Ü M - VII

7. SONLU IŞIN İZLEME (FINITE RAY TRACING)

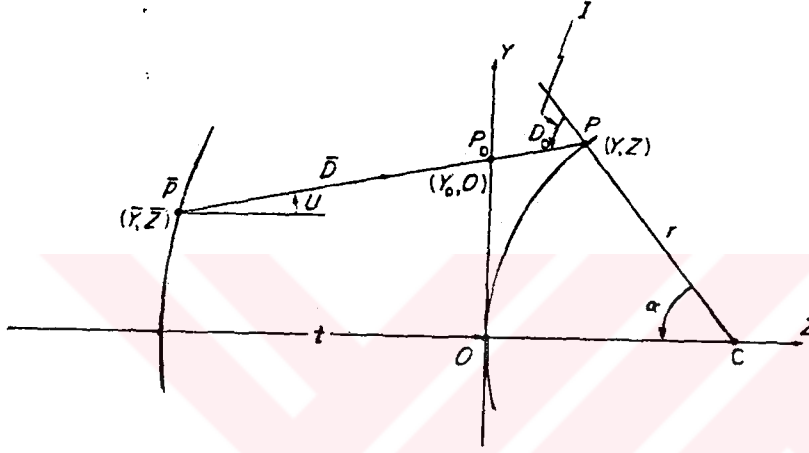
Şimdiye kadar sadece Gauss görüntü düzlemini, odak uzaklığını belirlememizi, dalga cephesi küresel aberasyonun ölçümünü ve bu aberasyonun mercek şekli ile değişimini elde etmemizi sağlayan paraksial yaklaşımı inceledik. Aberasyon yeterli derecede küçük olacak şekilde dizayn yapıldıktan sonra (ki bu minimum aberasyonu elde etmek için kırılma indislerinin ve eleman ayrılmalarında değişiklikler gerektirebilir) bazı belirli ışınların sistem boyunca yollarını izlemek ve bunların görüntü düzleminde nasıl bir dağılım gösterdiğini belirlemek gerekir. Işınların belirli yolları izlemesi, paraksial yaklaşımda y ve u olan yükseklik ve açının esas değerleri olan Y ve U değerlerini belirlememizi sağlayacaktır.

Sonlu ışın izleme olarak adlandırılan bu işlemde Snell kanunu ve koordinat geometrisi kullanılır.

7.1. İKİ BOYUTLU SONLU IŞIN İZLEME

OZ simetri eksenine sahip bir optik sistemi inceleyelim (OYZ düzlemi eksen üzerinde olmayan cisim noktasını ihtiva etsin). OYZ düzlemi Meridyen düzlem olarak adlandırılır. Snell kanununun ve aksenal simetrisinin bir sonucu olarak, bu düzlemde terk eden bir ışın yine bu düzlem içerisinde kalacaktır. Böyle bir ışını izleme işlemi sadece analiz işlemlerini

basitleştiren iki boyutlu geometriyi içerir. Şekil-6a'da bilinen (\bar{Y}, \bar{Z}) koordinatlarında \bar{P} yüzeyinden ayrılan bir \bar{PP} ışını göstermektedir. Işın eksen boyunca mesafedeki C merkezli, r yarıçaplı bir sonraki yüzeye doğru eksenle U açısı yaparak ilerler ve O orijinli eksene göre koordinatları (Y, Z) olan P noktasında bu yüzeyi keser. Işının düzlemin O 'daki teğetini P_0 'da kestiğini kabul edelim. Bu noktanın koordinatları $(Y_0, 0)$ olsun.



Şekil-7.1 : Sonlu bir ışın izleme için parametreler.

Aşağıdaki tanımlar yapılsın.

$$\bar{PP} = D \quad (24)$$

$$\bar{PP}_0 = \bar{D} \quad (25)$$

$$P_0P = D_0 \quad (26)$$

Belirlenecek büyüklükler (Y, Z) koordinatı ve \bar{PP} ışını ile PC arasındaki I açısıdır.

$$M = \sin U \quad (27)$$

$$N = \cos U \quad (28)$$

olmak üzere Şekil-7.1'den,

$$\bar{P}P_0 \sin U = \bar{D}M = Y_0 - \bar{Y} \quad (29)$$

$$\bar{P}P_0 \cos U = \bar{D}N = t - \bar{Z} \quad (30)$$

olduğu görülür. Bilinen ışın parametreleri ile Y_0 ve \bar{D} belirlenir.

$$\bar{D} = (t - \bar{Z})/N \quad (31)$$

$$Y_0 = \bar{Y} + (t - \bar{Z}) M/N \quad (32)$$

Burada Z ilk eğri yüzey üzerinde ve başlangıç koordinatlarına göre ölçülür. D_0 ve böylece (Y, Z) aşağıdaki yolla bulunur :

$$MD_0 = Y - Y_0 \quad (33)$$

$$ND_0 = Z \quad (34)$$

Üçüncü denklem OP yüzeyinin denkleminde elde edilir.

$$Y^2 + (Z - r)^2 = r^2$$

$C = 1/r$ koyarsak,

$$C (Y^2 + Z^2) - 2Z = 0 \quad (35)$$

ve (33), (34) denklemlerinin (35) de yerine konulmasıyla,

$$(M^2 + N^2) C D_0^2 - 2 (N - CM Y_0) D_0 + C Y_0^2 = 0$$

elde edilir.

$$M^2 + N^2 = 1$$

olduğundan, aynı zamanda,

$$cD_0^2 - 2(N - cMY_0)D_0 + cY_0^2 = 0$$

dir. Standart pratiğe [6] uygun olarak

$$F = c Y_0^2 \quad (36)$$

$$G = N - cMY_0 \quad (37)$$

gösterimi kullanılır. Bunlar bilinen büyüklüklerdir.

$$cD_0^2 - 2GD_0 + F = 0 \quad (38)$$

$$D_0 = (G - \sqrt{G^2 - cF})/c \quad (39)$$

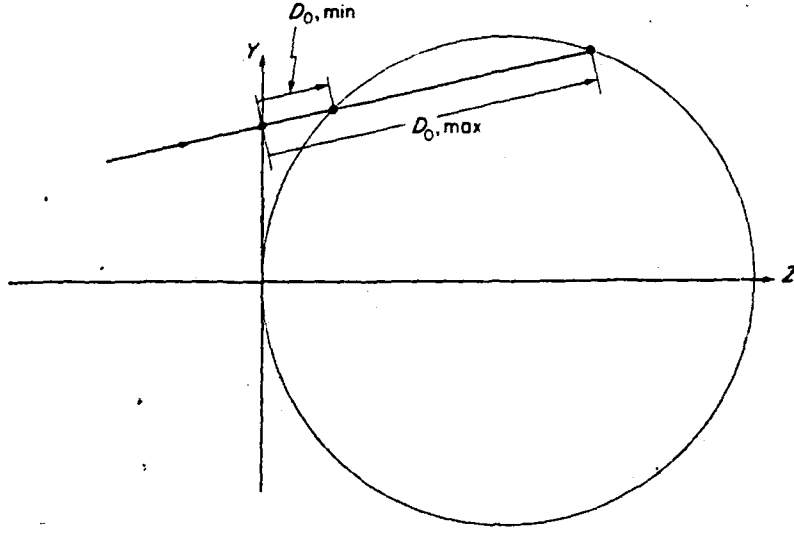
Burada negatif işaret alınmaktadır. Çünkü D_0 Şekil-7.2'de gösterildiği gibi mümkün olan iki değer en küçüğü olmak zorundadır. Denklem (39) un bilgisayarda hesaplanabilecek bir forma sahip olması gerekir (Çünkü $\lim_{c \rightarrow 0}$ iken bazı nümerik problemler çıkabilir). Böylece ;

$$D_0 = \frac{G - \sqrt{G^2 - cF}}{c} \frac{(G + \sqrt{G^2 - cF})}{(G + \sqrt{G^2 - cF})}$$

veya düzenlenerek,

$$D_0 = F/(G + \sqrt{G^2 - cF}) \quad (40)$$

olur.



Şekil-7.2 : D_0 in maksimum ve minimum değerleri.

Aynı zamanda (Şekil-7.1) den

$$I = U + \alpha$$

olduğundan,

$$\cos I = \cos U \cos \alpha - \sin U \sin \alpha$$

veya

$$\cos I = N \cos \alpha - M \sin \alpha$$

elde edilir. Yine Şekil-7.1'den,

$$\cos \alpha = (r - Z)/r = 1 - cZ \quad (41)$$

$$\sin \alpha = Y/r = cY \quad (42)$$

yazılır. Böylece (33) ve (34) denklemini kullanarak,

$$\begin{aligned}\text{CosI} &= N - NcZ - McY \\ &= N - cN (ND_0) - cM (Y_0 + MD_0)\end{aligned}$$

elde edilir. Bundan dolayı (39) denklemini kullanmak suretiyle ;

$$\begin{aligned}\text{CosI} &= (N - cMY_0) - cD_0 \\ &= G - cD_0 \\ &= \sqrt{G^2 - cF}\end{aligned}\quad (43)$$

yazılır. Denklem (33) ve (34) den faydalanarak D_0 , CosI , Y ve Z 'yi buluruz. Böylece bir yüzeyden diğer yüzeye geçişin tanımı tamamlanmış olur. Şimdi kırılan ışını belirlememiz gerekmektedir. Kırılmadan önce ve sonra,

$$I = U + \alpha$$

$$I' = U' + \alpha$$

yazılır. Böylece

$$\text{SinU} = \text{SinI} \cos \alpha - \text{CosI} \sin \alpha$$

$$\text{SinU}' = \text{SinI}' \cos \alpha - \text{CosI}' \sin \alpha$$

olur. Bundan dolayı Snell kanunu ve denklem (42) den faydalanarak,

$$\begin{aligned}n' \text{SinU}' - n \text{SinU} &= (n' \text{SinI}' - n \text{SinI}) \cos \alpha - (n' \text{CosI}' - n \text{CosI}) \sin \alpha \\ &= - (n' \text{CosI}' - n \text{CosI}) cY\end{aligned}$$

elde edilir. Yani,

$$n'\sin U' = n\sin U - YK \quad (44)$$

dır. Burada K,

$$K = (n'\cos I' - n\cos I) c \quad (45)$$

ile verilmektedir. $n'\cos I'$, $\cos I$ (denklem (32)) nın bilinen değerinden ve Snell kanunundan belirlenir. Benzer şekilde incelemeye,

$$\cos U = \cos I \cos \alpha + \sin I \sin \alpha$$

yazılır.

$$n'\cos U' = n\cos U - ZK + (n'\cos I' - n\cos I) \quad (46)$$

olduğu gösterilebilir. M ve N cinsinden (44) ve (46) denklemleri,

$$n'M' = nM - YK \quad (47)$$

$$n'N' = nN - ZK + (n'\cos I' - n\cos I) \quad (48)$$

olarak yazılabilir. Alternatif olarak (iki boyutta) $M'^2 + N'^2 = 1$ gerçeği kullanılarak M den N' belirlenebilir. Aynı zamanda bu M' ve N' değerlerinin bir kontrolü olarak kullanılabilir.

Bir optik sistem boyunca gitmekte olan sonlu ışın için ihtiyaç duyulan denklemlerin elde edilmesi tamamlanmış oldu. Bununla birlikte (33) ve (29) denklemleri,

$$\begin{aligned} Y &= Y_0 + MD_0 = \bar{Y} + \bar{M}\bar{D} + MD_0 = \bar{Y} + MD \\ &= \bar{Y} + D\sin U \end{aligned}$$

olarak birleştirilebilir. Bunu da paraksial Denklem (8) e benzeterek,

$$y_t = y + d' u'$$

şeklinde yazabiliriz.

y ve u küçük oldukları zaman (44) denklemi benzer şekilde karşılık gelen paraksial denklemi (6) ya indirgenir, yani

$$n' u' = nu - Ky$$

olarak bulunur.



B Ö L Ü M - VIII

8. BİLGİSAYAR PROGRAMLARI

EK-1 ve EK-2'de, iki bilgisayar programının tipik çıkışları verilmektedir. S1BEND programı, dalga cephesi küresel aberasyon S1'i ve S1'in $\Delta\alpha$ ile değişimini hesaplamaktadır. RAYTRC programı ise Gauss görüntü düzlemindeki enlemsel aberasyon (tranverse aberration) u hesaplamaktadır.

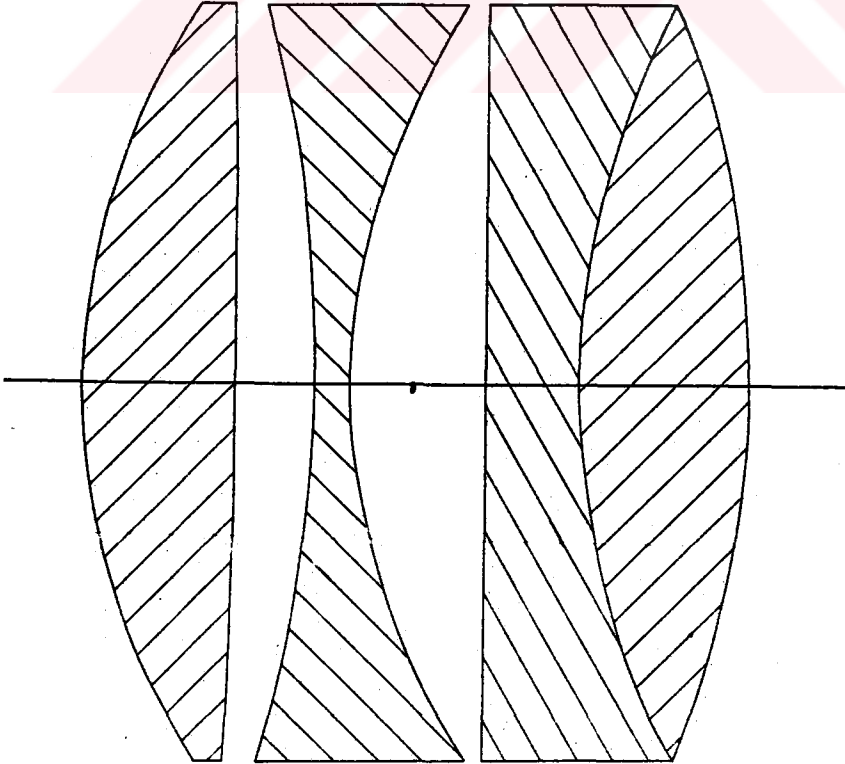
Programdaki ifadeler kendi kendilerini açıklayacak şekilde yapılmıştır. Her iki programda da sonlu ve sonsuzdaki cisimler arasındaki fark lojikal değişken FINITE vasıtasıyla yapılır. S1BEND de bir sonlu cismin pozisyonu, ilk yüzeye geliş yüksekliği Y(1) ve geliş açısı U(1) olan bir gelen ışınla özelleştirildiği kabul edildi. RAYTRC'de bunların her ikisine de her iki durumda da (finite, infinite) ihtiyaç duyulur. Bunlarla birlikte görüntü yüksekliği hesaplanmalı (aynı zamanda başlangıç geliş açısı değişir) dir. Bu yüzden bir sonlu cismi denklem (10) da görüldüğü gibi uzaklık ve yükseklikle özelleştirmek daha uygundur. Programlar için gereken veri ifadelerde belirtilmiştir. Tipik optik bir sistem için bazı özel veriler Bölüm-8.1'de incelenecektir. S1BEND programı aynı zamanda eğilme parametresini sıfıra eşitlemek suretiyle S1'in U(1) açısı ve Y(1) geliş yüksekliğiyle değişimini göstermek için kullanılabilir.

8.1. ÖRNEK VERİ

Programları denemek için uygun bir optik sistem TESSAR tipi fotografik merceklerle sağlanabilir (bunlardan biri O'Neill [7] tarafından özelleştirilmiştir). Bunun diyagramı Şekil 8.1'de gösterilmiş ve veri Tablo-1'de verilmiştir.

Merceğin odak uzaklığı yaklaşık 50 mm olarak verilmiş olup daha fazla detaya girilmemiştir. Bu yüzden 35 mm'lik filmi kaplayacağını ve f/2.8 lik (yani odak uzaklığı/açıklık = 2.8) bir maksimum relatif açıklıkta çalışacağını kabul edeceğiz. Bu şekilleri kullanarak merceğe giren ışıkların maksimum yarı giriş açısı (semi-angle) yaklaşık olarak $\tan^{-1}(17.5/50)$, diğer bir deyişle 20° dir (açıklık 50/2.8 veya yaklaşık 18 mm olarak verilirken bu durum söz konusudur. Bundan dolayı yarı açıklık (semi-aperture) 9 mm dir). Bir sonsuz cisim için başlangıç veri böylece,

lojik parametre	FINITE = FALSE
geliş yüksekliği	Y(1) = 0.9 cm
alan açısı	U(1) = -20°



Şekil-8.1 : TESSAR mercek diyagramı

Tablo-1 : TESSAR mercek için veri

n	c (cm ⁻¹)	d (cm)
1.0	0.61425	
1.6116	-0.036271	0.357
1.0	-0.28927	0.189
1.6053	0.63221	0.081
1.0	0	0.325
1.5123	0.52083	0.217
1.6116	-0.41667	0.396
1.0		

8.2. S1BEND İN SONUÇLARI

Bölüm-8.1'de verilen başlangıç verileri kullanarak ve eğilmeyi sıfır kabul ederek (DALPHO = 0.0, NALPHO = 0) S1BEND aberasyon programından aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$$\begin{aligned} \text{odak uzaklığı} & \quad f' = 5.08 \text{ cm} \\ \text{Küresel aberasyon} & \quad S1 = - 3.76 \times 10^{-3} \text{ cm} \end{aligned}$$

odak uzaklığı belirtilen 5.0 cm'lik değerle uyuyor ama bizim şimdi incelemek zorunda olduğumuz S1 değeridir.

Hatırlanması gereken ilk önemli nokta esas ışın ve marjinal ışın (20° ve 0.9 cm) arasındaki optik yol farkı olduğudur ve yine ideal optik bir sistemde bunun sıfır olduğu hatırlanmalıdır. Şimdi S1 oldukça küçük ve gerçekte sadece odak uzaklığının yaklaşık % 0.075 dir (S1'in negatif degerde olması, marjindeki dalganın, çıkış aralığının merkezi boyunca ilerlemekte olan ideal küresel dalganın, gerisinde olduğunu gösterir). Bununla birlikte idealliğe yakınlık odak uzaklığı ile karşılaştırmak suretiyle kesin olarak ölçülemeyebilir, ama ışığın dalga boyu ile kıyaslamak suretiyle daha iyi sonuçlar alınabilir.

Lord Rayleigh [8] optik görüntü oluşumu üzerine aberasyon etkisini inceleyen ilklere aittir. Lord Rayleigh, görüntü bölgesine ulaşan ışınların optik yolları şayet dalga boyunun dörtte birinden daha az olacak şekilde farklı ise, o zaman görüntüde önemsiz bir bozulma meydana geldiğini gösterdi. Bu sonuç Rayleigh sınırı olarak adlandırılır ve sık sık oldukça iyi bir şekilde kullanılır. Sonraki bir çalışma bu limitin genişletilebileceğini ve 0.95λ lık bir dalga boyu hatasının ve küresel aberasyon için tolere edilebileceğini gösterdi Gauss görüntüden daha keskin ışınların konsantrasyonuna sahip olan en az bozulma (least confusion) dairesi Şekil-5.3'de gösterilmiştir. Gauss görüntüden daha uzak bir yerde daha iyi bir görüntü bulunabileceği ve tam odaklanma ile ilgili yeni bir bilgi verilip ilave olarak daha yüksek dereceli küresel aberasyon terimleri incelendiğinde (bunlar Bölüm-5.2'de ihmal edildi) limit yaklaşık olarak 6λ ya kadar genişletilebilir [9] .

Bu ifadeler dikkate alınarak tekrar S_1 in büyüklüğüne bakılabilir. 590 mm bir dalga boyu için S_1 oldukça büyük bir değer olan 64λ ya kadar yüksektir. Bununla birlikte biraz hafifletilerek söylenilebilir ki, S_1 in bu değeri en büyük açıklıkla ve tesir alanınının sınır noktasıyla uyudur.

Aberasyonun daha uygun değeri, $U(1)$ ve $Y(1)$ in diğer değerleri için tekrar hesaplamak suretiyle elde edilir.

Tablo-2 : Açıklık ve alan açısından dalga cephesi küresel aberasyon S_1 'in değişimi.

Y(1)	U(1)		
	-20°	-10°	0°
0.9	-37.6	-11.6	9.49
0.75	-20.8	-8.31	4.57
0.625	-9.65	-5.57	2.21
0.5	-1.11	-3.17	0.90
0.375	+4.78	-1.30	0.28
0.25	+8.10	-0.07	0.056
0.125	+9.04	+0.51	0.003
0	+7.84	+0.49	0
-0.125	+4.84	+0.03	0.003
-0.25	+0.48	-0.64	0.056
-0.375	-4.75	-1.20	0.28
-0.5	-10.2	-1.25	0.90
-0.625	-15.3	-0.30	2.21
-0.75	-19.2	+2.22	4.57
-0.9	-21.1	+8.26	9.49

$\times 10^{-4}$ cm

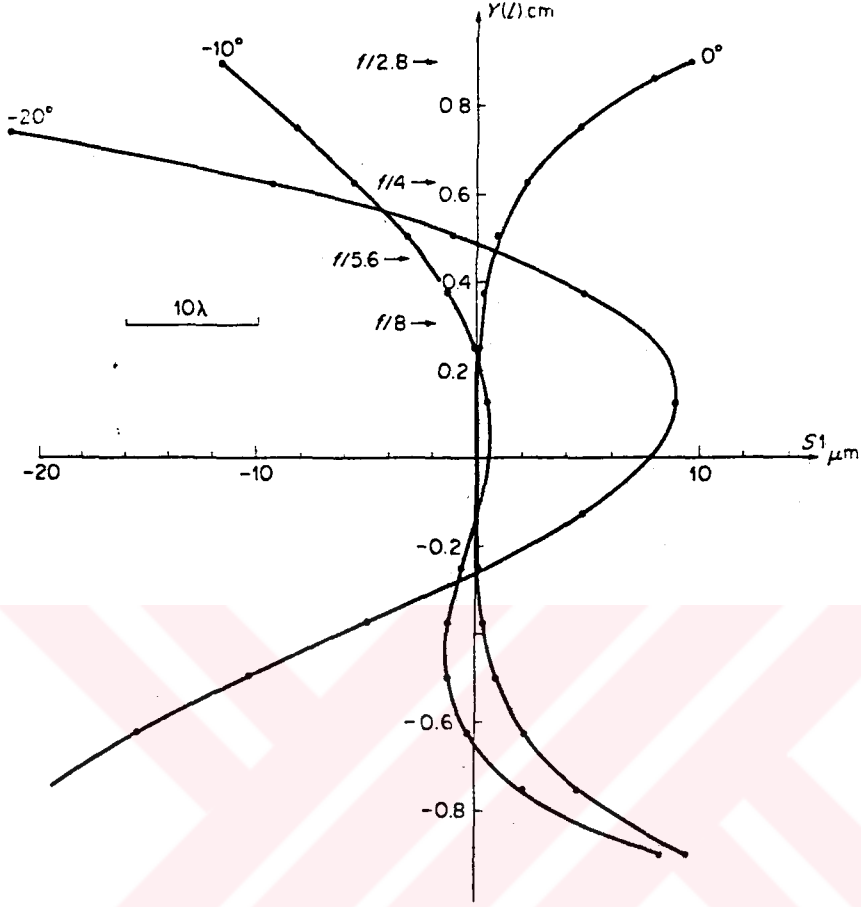
Tablo-2'de -20° , -10° , 0° geliş açılarında değişik geliş yükseklikleri için eğilme parametresi NALPHA'yı sifıra eşit kabul ederek, S1BEND'le elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Sonuçlar Şekil-8.1 de grafik olarak gösterilmiştir. Bu şekilden aberasyonun geliş yüksekliği ile birlikte hızlı bir şekilde azaldığı, $0.625 (f/4)$ den daha küçük açıklıklar için yeterli derecede küçük değere yaklaştığı görülmektedir (özellikle 0° ve 10° arasındaki açıklıklar için). Bu eğriler açıklığın bir fonksiyonu olarak dalga cephesinin şeklini gösterir. Şu ilginçtirki (-20° , $0,75$) için elde edilen küresel aberasyon tam olarak $16 \times (-10^{\circ}, 0,375)$ için elde edilen küresel aberasyondur. Herbir yüzeyde $S1$, y , A^2 ve u ile orantılıdır. Gerçekte verilen aksenal kesme noktası için (1) $u \propto y$ (2) $A = ni = n(u + yc) \propto y$ dir. Her bir yüzey için,

$$S1 \propto y^4$$

olduğunu görürüz. Bununla birlikte ilk mercek yüzeyinde u ve y bağımsız olarak seçilebildiğinden orantı doğru olmaz. 4 ncü dereceden bağımlılığı göstermek için geliş başlangıç açısının ve geliş yüksekliğinin her ikisini de bilmemiz gerekir. $U(1) = 0^{\circ}$ için elde edilen eğri tam olarak döndürücü dereceden bir eğridir

Tablo-3'de merceğin eğilme etkisini gösteren tipik sonuçlar verilmekte ve grafiği Şekil-8.2 de görülmektedir. Eğrilerin kabaca parabolik oldukları görülmüştür. Bunlar genelde böyledir. Yine görülmektedir ki $S1$, $U(1)$ ve $Y(1)$ in bazı değerleri için tam olarak sıfırdır ; ama bunlar, eğilme parametrelerinin aynı değerlerinde meydana gelmezler. Şekil-8.1 deki eğrilerin incelenmesinden TESSAR merceğin küresel aberasyon için oldukça iyi bir şekilde özel olarak düzenlendiği görülmektedir.

Şimdiye kadar sadece küresel aberasyonun etkisi incelendi. Diğer sonuçları dikkate almamak akıllıca bir iş olmaz. Oysa diğer aberasyonlar (özellikle coma ve astigmatizm) daha büyük açısal alanlara doğru gidildikçe, çok daha önemli hale gelirler. Coma, genellikle $S1$ parabolünün dönme noktası yakınında bir minimumdur. Gerçekte TESSAR için $\Delta\alpha = 0$, $U(1) = -20^{\circ}$, $Y(1) = 0.9$ da sifıra yakın olduğu gösterilebilir.



Şekil-8.1 : Değişik $U(1)$ açıları için $Y(1)$ açıklığıyla S_1 'in değişimi

8.3. RAYTRC DEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

S_1 için elde edilen eğrilerin, merceğin dalga cephesi hataları ile ilgili bir fikir vermesine rağmen, bu görüntü düzleminde bir ışık numunesidir. Düşünülen mükemmel görüntüden sapmaların büyüklüğü, görüntü düzlemindeki kesişimlerinin birbirinden ne kadar farklı olduğuna ve ışınların ideal görüntü noktasından ne kadar saptıklarını görmek suretiyle belirlenebilir.

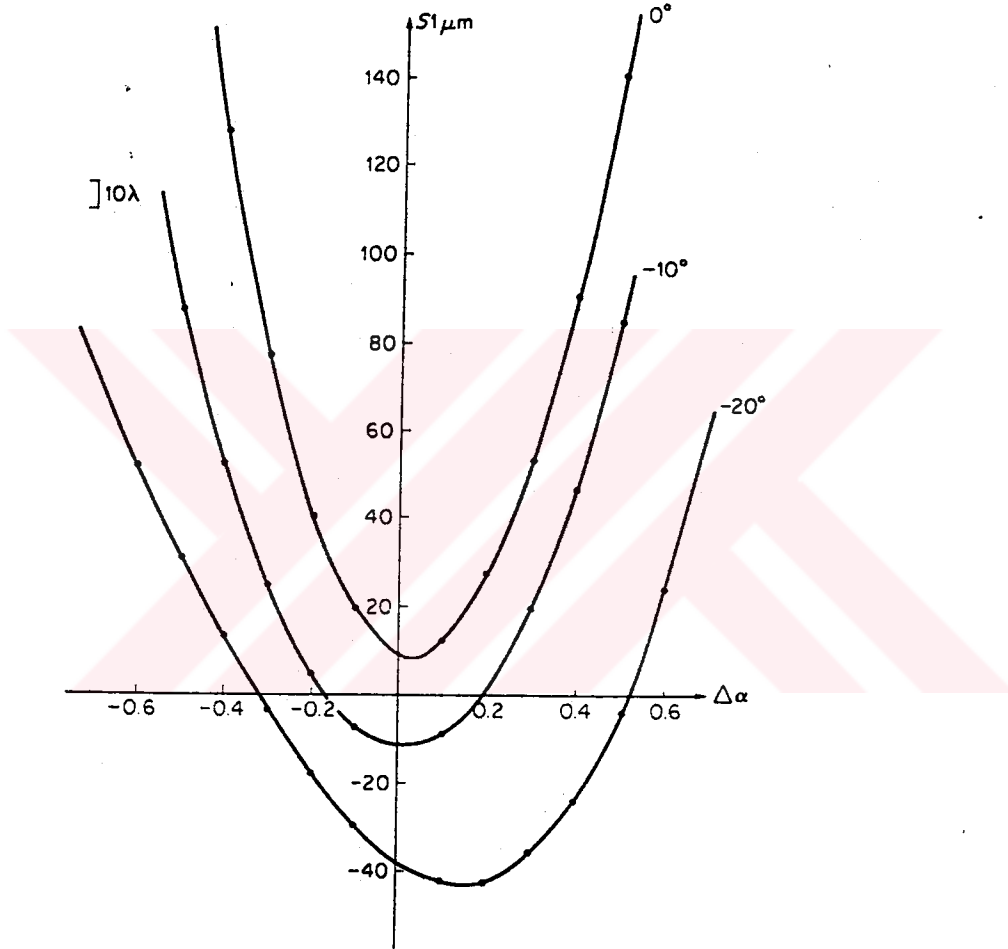
RAYTRC program çıktıları ($Y(1)$ geliş yüksekliğinin fonksiyonu olarak) enlemsel aberasyon TA ve TAPR dir.

Şekil-8.4'den

$$TA = YGIP - YPXL$$

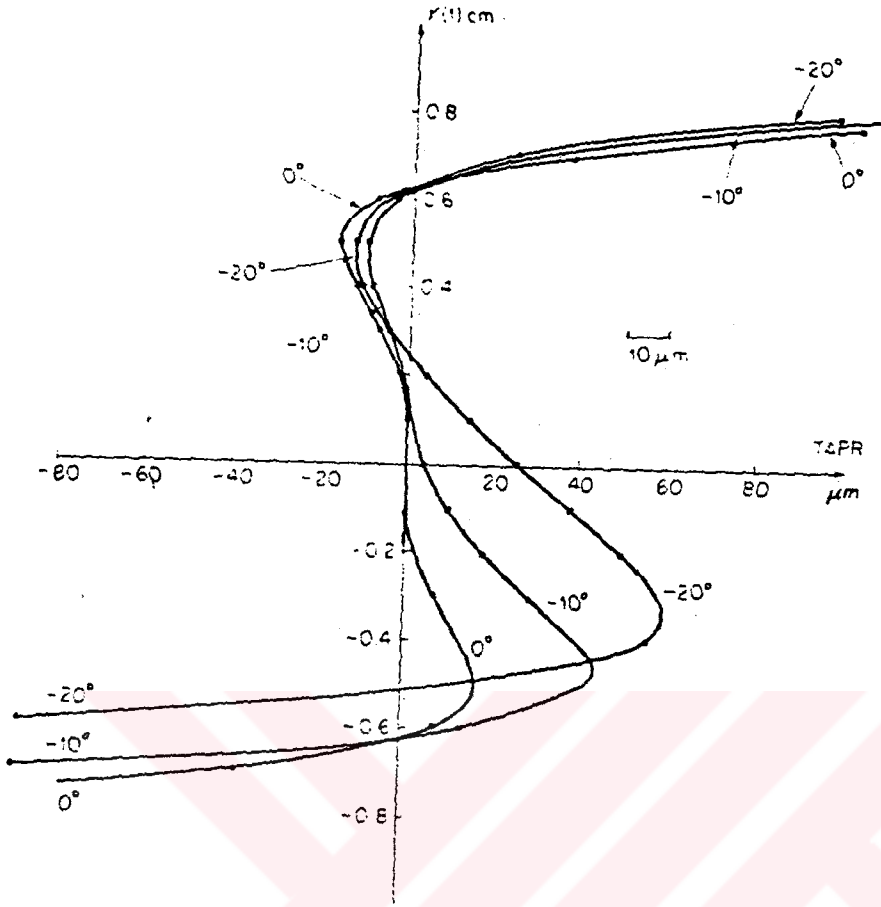
$$TAPR = YGIP - YGIPPR$$

dir.

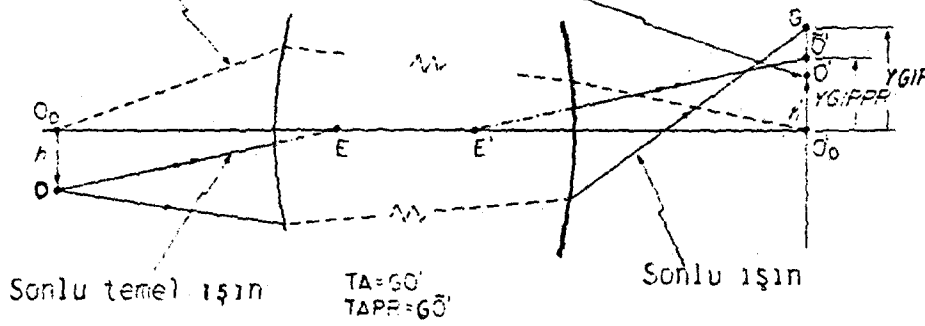


Şekil-8.2 : Eğilme parametresi $\Delta\alpha$ ile $S1$ 'in değişimi

YGIP, Gauss görüntü düzleminde ışının ulaştığı yerdir. TA, YPXL yüksekliğindeki (YPXL = h' denklem (15)) Gauss görüntüye göre enlemsel aberasyondur. TAPR, YGIPPR de Gauss görüntü düzlemiyle kesişen sonlu temel ışın (finite principal ray) a göre enlemsel aberasyondur. Sonlu esas ışın paraksial görüntü noktasında görüntü düzlemiyle kesişmezse sistem



Şekil-8.3 : Y(1) açıklıklı enlemsel aberasyonun değişimi
paraksial ışın Gauss Görüntü



Şekil-8.4 : Enlemsel aberasyon büyüklüklerinin tanımı

distorsiyonuna maruz kalır. Değişkenler, Şekil-8.4'de gösterilmiştir. O_0O h yüksekliğinde bir cisim, $O'O'$ h' yüksekliğinde paraksial görüntü, O' sonlu temel ışın kesişimi ve G de sonlu ışın kesişimidir.

Tipik bir çıkış son tarafta verilmektedir ve sonuçlar Şekil-8.3'de çizilmiştir.

Tablo-3 : Bir mercek eğilmesinden elde edilen tipik sonuçlar

YUZEY SAYISI	7			
YUZEY EGRİLİKRI				
.61425E+00	-.36271E-01	-.28927E+00	.63221E+00	.00000E+00
.52083E+00	-.41667E+00			
KIRILMA İNDİSLERİ				
1.00000	1.61160	1.00000	1.60530	1.00000
1.51230	1.61160	1.00000		
YUZEY SEPERASYONLARI				
.35700	.18900	.08100	.32500	.21700
.39600				
DERCE OLARAK ALAN AÇISI	-20.0000			
GELİŞ YUKSEKLİĞİ	.9000			
ALPHA ARALIKLAR	.1000			
ALPHA DEĞERLERİNİN SAYISI	13			
DALPHA=	-.6000			
ODAK UZUNLUĞU	5.07986			
GERİ ODAK UZUNLUĞU	5.72729			
, 1= -.524167E-01	, 2= -.694984E+00	, 3= -.976356E+00		
, 4= -.151390E+00	, 5= -.692690E+00	, 6= -.213362E+00		
, 7= -.911932E+00				
KURESEL ABERASYON	.51850E-02			

temel ışına göre olan enlemsel aberasyon (TAPR) ile Gauss görüntüye göre olan enlemsel aberasyon (TA) karşılaştırılırsa, bunların 0.63/17.5 veya % 3.5 lik bir distorsiyona sebep olacak, aralarında 630 μ m lik bir fark bulunduğu görülür.

TAPR değerinin -10^0 lik alan için $Y(1) = -0.5$ ve $Y(1) = 0.65$ arasında küçük olmasına rağmen, -20^0 lik alan için sadece $Y(1) = 0$ ve $Y(1) = 0.65$ arasında küçüktür. Gerçekten göz, 100 μ m lik büyüklükteki mesafeleri fark edebileceği için, 100 μ m lik veya daha az ışın sapmaları görüntüde

kabul edilebilir. Bundan dolayı, merceğin alt kısmından giriş yapan -20° lik alan ışınlarının yeter derecede azaltılması ve muhtemelen 4 nolu yüzeye yakın bir yerde bir durdurucunun tanımlanması şartıyla $f/4$ açıklığı için sistemde en düşük aberasyon oluşur.



B Ö L Ü M - IX

9. SONUÇ

Bu çalışmada ilk önce odak uzaklığını, Gauss görüntü düzlemini ve dalga cephesi küresel aberasyonu belirleme imkanı sağlayan paraksiyal yaklaşım hakkında bilgi verilerek, bu aberasyonun mercek şekliyle değişimi incelendi. Daha sonra bir dizaynda, aberasyonun, ışın izleme işlemi sayesinde bazı parametrelerin uygun değerlerini elde etmek suretiyle minimuma indirgenebileceği görüldü.

Bu indirgeme de, elemanların kırılma indisleri ile eğriliklerini değiştirmek suretiyle minimum aberasyon için uygun değerleri bulmayı gerektirir. Sonlu ışın izleme işlemi, bilgisayar programı şeklinde yazılarak uygun değerlerin daha kısa zaman içinde bulunması sağlanmıştır.

TESSAR mercek, kapasite ve sınırlamalarını gerçekleştirmek için iyi bir analize gerek duyan, oldukça karmaşık bir sistemdir. Bununla birlikte S1BEND ve RAYTRC kullanılarak daha basit sistemlerin incelenmesi için bilgi verici mahiyettedir.

S1BEND programı Bölüm-8.2'de bahsedildiği gibi sadece küresel aberasyon S1'i hesaplar. Ama daha başka aberasyonlarda vardır. En önemlileri Coma(S2) ve astigmatizm (S3) dür. Şekil-5.3'de gösterildiği gibi, Coma temel ışının altında ve üstündeki ışınlar için odaklama konumlarında bir farklılık olarak ortaya çıkar. Oysa astigmatizm meridyen ve meridyene dik düzlemdeki

ışınlar için odaklamada oluşan farklılıktır. Her iki aberasyon, şayet paraksial temel ışın için gerekli olan parametreler bilinirse, (paraksial marginal ışın için A'ya karşılık gelir) dalga cephesi Coma (S2) ve astigmatizm (S3) için ifadeler,

$$S2 = \frac{1}{2} A\bar{A} y \Delta(u/n)$$

$$S3 = \frac{1}{2} \bar{A}^2 y \Delta(u/n)$$

dir. Bu ifadelerin temeli Welford [10] tarafından verilmiştir. İfadeler, temel ışın büyüklükleri \bar{y} ve \bar{u} 'yu ana programa ve alt program PARAXL'a katmak suretiyle program şekline dönüştürülerek her bir yüzeyde,

$$\bar{A} = n\bar{u} + n\bar{y}c$$

\bar{A} , S2, S3 hesaplanır. RAYTRC'de yapıldığı gibi, herhangi bir cisim için $\bar{y}(1)$ in başlangıç değeri giriş aralığında sıfırdır. Bir sonlu cisim için $\bar{u}(1) = -YOBJ/DOBJ$, sonsuz cisim için $\bar{u}(1) = u(1)$ dir.

1. M. İdemen, Yüksek Lisans Kırınım Ders Notları (İ.T.Ü., İstanbul), (1987).
2. H.A. Buchdahl, An Introduction to Hamiltonian Optics (University Press, Cambridge), 3 (1970).
3. M. Born and E. Wolf, Principle of Optics, 3rd ed. (Pergamon Press, Oxford), 147 (1965).
4. W.T. Welford, Aberrations of the Symmetrical Optical System (Academic Press, London), 111 (1974).
5. H.H. Hopkins, Wave Theory of Aberrations (Clarendon Press, Oxford), (1950).
6. W.T. Welford, Aberrations of the Symmetrical Optical System (Academic Press, London), 49 (1974).
7. E. L. O'Neill, Introduction to Statistical Optics (Addison - Wesley, Mass.) 43, (1963).
8. Lord Rayleigh, Phil. Mag. 8, 403 (1879).
9. J. M. Palmer, Lens Aberration Data (Hilger, Bristol), 56 et seq. (1971).
10. W. T. Welford, Aberrations of the Symmetrical Optical System (Academic Press, London), Ch.7, (1974).

EK-1 : KÜRESEL ABERASYONU HESAPLAYAN PROGRAM

```

C BU PROGRAM, BİR OPTİK SİSTEMDEKİ BASLANGIÇ DALGA CEPHESİ KÜRESEL ABERASYONU VE
C ODAK UZUNLUĞUNU HESAPLAR. AYNI ZAMANDA ALT PROGRAM SUBROUTINE ALPHA0 VASITASI
C İLE ALPHA (ALPHA=N*I) NİN BASLANGIÇ DEĞERLERİNİ BELİRLER, VE SONRA ALPHA YI +
C VEYA -N*ALPHA*DALPH0 SEKLİNDE DEĞİSTİREK ABERASYONU TEKRAR HESAPLAR.
C BİR ALTERNATİF OLARAK NALPHA=0 İSE O ZAMAN GELİŞ YÜKSEKLİĞİ Y(1) İLE
C Sİ İN DEĞİSİMİ Y(1) İN ÇESİTLİ DEĞERLERİ İÇİN BELİRLENİR. BU Y(1) LER
C BİRBİRİNDEN DEĞİŞİMLİ BÜYÜKLÜĞÜ KADAR FARKLIDIR. BURADA DEĞİŞİMLİ DALPH0 NİN DEĞERİNE
C ESİTTİR.
C DATA ASAGIDAKI SIRAYA GÖRE OKUTTURULMALIDIR:
C FINITE (BİR SONLU CİSİM İÇİN FINITE, TRUE İLE
C SONSUZ CİSİM İÇİN FALSE İLE GÖSTERİLİR.)
C NS (YÜZEYLERİN SAYISI)
C C(J) J=1, NS (YÜZEY EĞRİLİKLERİ)
C N(J) J=1, NS+1 (KIRILMA İNDİSLERİ)
C D(J) J=2, NS (YÜZEY SEPERASYONLARI)
C Y(1) (BASLANGIÇ GELİŞ YÜKSEKLİĞİ)
C U(1) (BASLANGIÇ GELİŞ ACISI, DERECE OLARAK,
C SONLU CİSİM İÇİN U(1) POZİTİF
C SONSUZ CİSİM İÇİN U(1) NEGATİF TİR)
C DALPH0, NALPHA (DALPH0, ALPHA DEĞERLERİNİN TOPLAM SAYISI 2*NALPHA+1
C İLE ALPHA DEĞERLERİ ARASINDAKİ FARKTIR)
C PROGRAMDA ASAGIDAKI SUBROUTİNLER VARDIR.
C ALPHA ALPHA NİN BASLANGIÇ DEĞERLERİNİ HESAPLAR.
C FOCUS C(J) NİN YENİ DEĞERLERİNİ VE ODAK UZUNLUĞUNU HE-
C SAPLAR.
C ABERRN DALGA CEPHESİ KÜRESEL ABERASYONU HESAPLAR.

```

```

LOGICAL FINITE
REAL N
COMMON NS, N, C, D, U, Y, DALPHA, NALPHA, ALPHA
DIMENSION N(20), C(20), D(20), U(20), Y(20), ALPHA(20)
WRITE (2, 303)
READ (1, *) FINITE
READ (1, *) NS
WRITE (2, 201) NS
NSP=NS+1

```

```

C SİSTEM PAREMETRELERİ OKUNUR VE YAZILIR

```

```

READ (1, *) (C(J), J=1, NS)
WRITE (2, 209)
WRITE (2, 202) (C(J), J=1, NS)
READ (1, *) (N(J), J=1, NSP)
WRITE (2, 210)
WRITE (2, 205) (N(J), J=1, NSP)
READ (1, *) (D(J), J=2, NS)
WRITE (2, 211)
WRITE (2, 205) (D(J), J=2, NS)
WRITE (2, 301)

```

```

C İSİN PAREMETRELERİ OKUNUR VE YAZILIR

```

```

READ (1, *) Y(1)
READ (1, *) U(1)
IF (.NOT. FINITE) GOTO 2
WRITE (2, 204) U(1), Y(1)
GOTO 5
2 CONTINUE
WRITE (2, 200) U(1), Y(1)
5 CONTINUE
IF (ABS(Y(1)).LE.0.0001) Y(1)=0.0001
PI=3.1415926536
U(1)=U(1)*PI/180.0

```

```

C BASLANGIC NOKTASININ HER IKI YANINDAKI DEGISIMLERIN NALPHA
C SAYISINI VE DALPHO DEGISIM MIKTARI OKUNUR VE YAZILIR
  READ (1,*) DALPHO,NALPHA
  IF(NALPHA.EQ.0) GOTO 23
  NALPH2=2*NALPHA+1
  WRITE (2,207) DALPHO,NALPH2
  CALL ALPHA0
  DO 20 NP=1,NALPH2
  NPM=NP-NALPHA-1
  DALPHA=DALPHO*FLOAT(NPM)
  WRITE (2,208) DALPHA
C SIMDI ALPHANIN BUTUN DEGERLERI DEGISTIRILIR
  DO 21 J=1,NS
  ALPHA(J)=ALPHA(J)+DALPHA
21 CONTINUE
  CALL FOCUS
  CALL ABERRN
C SIMDI ALPHANIN DEGERLERI GERIYE DOGRU TEKRAR DEGISTIRILIR
  DO 22 J=1, NS
  ALPHA(J)=ALPHA(J)-DALPHA
22 CONTINUE
20 CONTINUE
  GOTO 29
C NALPHA=0 ISE Y(1) ILE S1 IN DEGISIMI HESAPLANIR
23 IF(Y(1).LT.0.0) Y(1)=-Y(1)
C Y(1) IN BASLANGIC DEGERI SAKLANIR
  Y1=Y(1)
  CALL FOCUS
  WRITE (2,206)
  DELY=DALPHO
  Y(1)=Y(1)+DELY
24 Y(1)=Y(1)-DELY
  IF(ABS(Y(1)).LT.0.0001) GOTO 25
  IF(Y(1).LT.0.0) GOTO 27
  CALL ABERRN
  GOTO 24
25 Y(1)=0.0
  CALL ABERRN
26 Y(1)=Y(1)-DELY
  CALL ABERRN
  IF(ABS(Y(1)+Y1).LT.0.0001) GOTO 29
  GOTO 26
27 Y(1)=Y(1)+DELY
  Y(1)=-Y(1)
  CALL ABERRN
28 Y(1)=Y(1)-DELY
  CALL ABERRN
  IF(ABS(Y(1)+Y1).LT.0.0001) GOTO 29
  GOTO 28
29 CONTINUE
  STOP
100 FORMAT(L5)
101 FORMAT(I2)
102 FORMAT(5F10.0)
103 FORMAT(F8.0,I2)
200 FORMAT(24H DERCE OLARAK ALAN ACISI,F16.4/1X,16HGELIS YUKSEKLIGI,F22
  S.4//)
201 FORMAT(1X,13H YUZEY SAYISI,8X,I2/)
202 FORMAT(E16.5,4E14.5)
204 FORMAT(27H DERECE OLARAK GELIS ACISI,F12.4/17H GELIS YUKSEKLIGI

```



```

      S,F22.4/)
205  FORMAT (F12.5,4F14.5)
206  FORMAT(6X,5HGELIS,8X,7HKURESEL/6X,12H YUKSEKLIGI ,10H ABERASYON
      S/)
207  FORMAT(16H ALPHA ARALIKLAR,F20.4/26H ALPHA DEGERLERININ SAYISI,
      $I8///)
208  FORMAT(8X,7HDALPHA=.F8.4/)
209  FORMAT(1X,16H YUZEY EGRILIKRI)
210  FORMAT(1X,18H KIRILMA INDISLERI)
211  FORMAT(1X,21H YUZEY SEPERASYONLARI)
301  FORMAT(1X/)
303  FORMAT(1X///)
      END
      SUBROUTINE ALPHAO
C BU ALT PROGRAM ALPHANIN BASLANGIC DEGERLERINI OLUSTURUR
      REAL K,N
      COMMON NS,N,C,D,U,Y,DALPHA,NALPHA,ALPHA
      DIMENSION N(20),C(20),D(20),U(20),Y(20),ALPHA(20),UF(20),YF(20)
      UF(1)=0.0
      YF(1)=Y(1)
      J=1
30  ALPHA(J)=YF(J)*C(J)
      IF (J.EQ.NS) GOTO 31
      K=(N(J+1)-N(J))*C(J)
      UF(J+1)=(N(J)*UF(J)-YF(J)*K)/N(J+1)
      YF(J+1)=YF(J)+D(J+1)*UF(J+1)
      J=J+1
      IF (J.LE.NS) GOTO 30
31  CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE FOCUS
C BU ALT PROGRAM ODAK UZUNLUGU FL
C C(J) NIN YENI DEGERLERINI BELIRLER
      REAL K,N
      COMMON NS,N,C,D,U,Y,DALPHA,NALPHA,ALPHA
      DIMENSION N(20),C(20),D(20),U(20),Y(20),ALPHA(20)
      IF(NALPHA.EQ.0) GOTO 41
      C(1)=ALPHA(1)/Y(1)
41  K=(N(2)-N(1))*C(1)
      U(2)=-Y(1)*K/N(2)
      DO 40 J=2,NS
      Y(J)=Y(J-1)+D(J)*U(J)
      IF(NALPHA.NE.0) C(J)=ALPHA(J)/Y(J)
      K=(N(J+1)-N(J))*C(J)
      U(J+1)=(N(J)*U(J)-Y(J)*K)/N(J+1)
40  CONTINUE
      FL=-Y(1)/U(NS+1)
      BFL=-Y(NS)/U(NS+1)
      WRITE(2,400) FL
      WRITE(2,401) BFL
400  FORMAT(3X,14H ODAK UZUNLUGU,F22.5)
401  FORMAT(3X,19H GERI ODAK UZUNLUGU,F17.5/)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE ABERRN
C BU ALT PROGRAM PARAXIAL ISIN IZLEME ISLEMINI YAPAR
C VE DALGA CEPHESI KURESEL ABERASYONU HESAPLAR
      REAL K,N,NNP
      COMMON NS,N,C,D,U,Y,DALPHA,NALPHA,ALPHA

```

```

        DIMENSION N(20),C(20),D(20),U(20),Y(20),ALPHA(20)

        S1=0.0
        J=1
C KIRILMA TANIMLANIR
        50 CONTINUE
            K=(N(J+1)-N(J))*C(J)
            U(J+1)=(N(J)*U(J)-Y(J)*K)/N(J+1)
C ABERASYON HESAPLANIR
            A=N(J)*Y(J)*C(J)+N(J)*U(J)
            NNP=N(J+1)*N(J)
            DELUN=(N(J)*U(J+1)-N(J+1)*U(J))/NNP
            S1=S1-0.125*A*A*Y(J)*DELUN
            IF(J.EQ.NS) GOTO 55
C BIR SONRAKI YUZEYE GECIS BELIRLENIR
            Y(J+1)=Y(J)+D(J+1)*U(J+1)
            J=J+1
            IF(J.LE.NS) GOTO 50
55 CONTINUE
            IF(NALPHA.EQ.0) GOTO 57
            WRITE(2,500) (CC,J,C(J),J=1,NS)
            WRITE(2,501)
            GOTO 58
57 WRITE(2,503) Y(1),S1
            GOTO 59
58 WRITE(2,502) S1
59 CONTINUE
            RETURN
500 FORMAT(3(1H,A1,I2,1H=,E13.6,2X))
501 FORMAT(1H /)
502 FORMAT(3X,18H KURESEL ABERASYON,E18.5///)
503 FORMAT(F13.4,E20.5)
        END

```

YUZEY SAYISI	7			
YUZEY EGRILIKRI				
.61425E+00	-.36271E-01	-.28927E+00	.63221E+00	.00000E+00
.52083E+00	-.41667E+00			
KIRILMA INDISLERI				
1.00000	1.61160	1.00000	1.60530	1.00000
1.51230	1.61160	1.00000		
YUZEY SEPERASYONLARI				
.35700	.18900	.08100	.32500	.21700
.39600				

DERECE OLARAK GELIS ACISI,	.0000
GELIS YUKSEKLIĞI	.9000

ODAK UZUNLUGU	5.07986
GERI ODAK UZUNLUGU	4.40716

GELIS YUKSEKLIĞI	KURESEL ABERASYON
.9000	.94889E-03
.8000	.59238E-03
.7000	.34724E-03
.6000	.18743E-03
.5000	.90391E-04
.4000	.37024E-04
.3000	.11715E-04
.2000	.23140E-05
.1000	.14462E-06
.0000	.00000E+00
-.1000	.14462E-06
-.2000	.23140E-05
-.3000	.11715E-04
-.4000	.37024E-04
-.5000	.90391E-04
-.6000	.18743E-03
-.7000	.34724E-03
-.8000	.59238E-03
-.9000	.94888E-03

EK-2 : İŞİN İZLEME İŞLEME YAPAN VE ENLEMSEL ABERASYONU HESAPLAYAN PROGRAM

```

C BU PROGRAM,BİR OPTİK SİSTEM BOYUNCA İLERLEMekte OLAN SONLU BİR MERİDYEN .
C İSİNİ İZLEME İŞLEMİNİ YAPAR VE BUNUN GAUSSIAN GORUNTU DÜZLEMİNDEKİ ENLEMSEL
C ABERASYONUNU HESAPLAR.HESAPLAMA İŞLEMİ FARKLI İKİ ŞEKİLDE YAPILIR.
C   1) TA   GAUSSIAN GORUNTUYE GÖRE
C   2) TAPR TEMEL İSİNE GÖRE
C BU PROGRAMDA AŞAĞIDAKİ ALT PROGRAMLAR VARDIR.
C FOCUS   ODAK UZUNLUĞU FL VE GERİ ODAK UZUNLUĞU BFL Yİ HESAPLAR.
C PARAXL  BİR SONLU CİSİM İÇİN GAUSSIAN GORUNTU DÜZLEMİ GİP VE PARAXIAL
C          GORUNTU BÜYÜKLÜĞÜ YPXL Yİ BULUR.
C          (SONSUZ CİSİM İÇİN GİP=BFL VE
C                               YPXL=FL* ALAN ACISI)
C PUPIL   İLK YÜZEYİN SAGINA OLAN ÇIKIŞ ARALIĞI MESAFESİ EXPP Yİ VE
C          TEMEL İSİNİN İLK YÜZEYE GELİŞ YÜKSEKLİĞİNİ HESAPLAR.
C TRACE  SONLU İSİNLERİNİZLEME İŞLEMİNİ YAPAR
C DATA AŞAĞIDAKİ SİRAYA GÖRE OKUTTURULMALIDIR.
C FINITE  (SONLU CİSİM İÇİN FINITE,TRUE
C          SONSUZ CİSİM İÇİN FALSE OLARAK OKUTTURULMALIDIR)
C NS      (YÜZEY SAYISI)
C C(J) J=1,NS (YÜZEY EĞRİLİKLERİ)
C N(J) J=1NS+1 (KIRILMA İNDİSLERİ)
C D(J) J=2,NS (YÜZEY SEPERASYONLARI)
C Y(1)    (İLK YÜZEYE MAX. GELİŞ YÜKSEKLİĞİ)
C U(1)    (ALAN ACISI,DERECE OLARAK,SONSUZ CİSİM İÇİN VARDIR
C          SONLU CİSİM İÇİN YOKTUR)
C YOBJ,DOBJ (CİSİM YÜKSEKLİĞİ VE CİSMİN,İLK YÜZEYİN SOLUNA OLAN
C          UZAKLIĞI - SONSUZ CİSİM İÇİN ÇIKARTILACAKTIR.)
C NR       (İZLENİLECEK İSİNLERİN SAYISI)
C DAP,JP   (JP SAYILI YÜZEYİN SAG TARAFI İLE ARALIK DURDURUCU
C          ARASINDAKİ MESAFE DAP DIR.)

REAL N,K
COMMON NS,N,C,D,U,Y,FL,BFL,GIP,YGIP,YPXL,YOBJ,DOBJ,EXPP
DIMENSION N(21),C(20),D(19),U(21),Y(20)
LOGICAL FINITE
PI=3.1415926536
READ(1,*) FINITE
READ(1,*) NS
WRITE(2,201) NS
C SİSTEM PAREMETRELERİ OKUNUR VE YAZILIR
NSP=NS+1
READ(1,*) (C(J),J=1,NS)
READ(1,*) (N(J),J=1,NSP)
READ(1,*) (D(J),J=2,NS)
WRITE(2,202) (C(J),J=1,NS)
WRITE(2,203) (N(J),J=1,NSP)
WRITE(2,204) (D(J),J=2,NS)
C İLK YÜZEYİN TEGET DÜZLEMİNDEKİ MAXIMUM
C GELİŞ YÜKSEKLİĞİ OKUNUR
READ(1,*) Y(1)
IF(FINITE) GOTO 10
C SONSUZ CİSİM İÇİN ALAN ACISI U(1) DERECE OLARAK OKUNUR VE YAZILIR
READ(1,*) U(1)
WRITE(2,206) U(1)
U(1)=U(1)*PI/180.0
GOTO 20
C SONLU BİR CİSİM İÇİN CİSİM YÜKSEKLİĞİ YOBJ VE BUNUN
C İLK YÜZEYE OLAN MESAFESİ DOBJ OKUNUR VE YAZILIR
10 READ(1,*) YOBJ,DOBJ
WRITE(2,205) YOBJ,DOBJ
C İZLENİLECEK İSİNLERİN SAYISI NR OKUNUR
20 READ(1,*) NR

```

```

      NRM=NR-1
      DELY=2.0*Y(1)/FLOAT(NRM)
C   ODAK UZUNLUGU HESAPLANIR
      CALL FOCUS
      GIP=BFL
      IF(.NOT.FINITE) YPXL=FL*U(1)
      IF(FINITE) CALL PRAXL
C   ILK YUZEYDEKI TEMEL ISIN YUKSEKLIGI BULUNUR
C   ILK OLARAK Y(1) IN BASLANGIC DEGERI YO OLARAK SAKLANIR
      YO=Y(1)
      CALL PUPIL
      Y(1)=-EXPP*U(1)
      IF(FINITE) Y(1)=YOBJ*EXPP/(DOBJ+EXPP)
      IF(FINITE) U(1)=-YOBJ/(DOBJ+EXPP)
C   TEMEL ISINI IZLENIR
      CALL TRACE
      YGIPPR=YGIP
C   ENLEMSEL ABERASYON TA VE TAPR .Y(1) IN DEGERLERI ICIN
C   HESAPLANIR-(Y(1) IN BASLANGIC DEGERINDEN BASLANIR VE NR ADIMI
C   ILE ACIKLIK TARANIR)-
C   ILK OLARAK Y(1) IN BASLANGIC DEGERI YO DAN BASLANIR
      Y(1)=YO
      WRITE(2,301)
      Y(1)=Y(1)+DELY
      DO 25 I=1,NR
      Y(1)=Y(1)-DELY
      IF(FINITE) U(1)=ATAN((Y(1)-YOBJ)/DOBJ)*PI/180.0
      CALL TRACE
      TA=YGIP-YPXL
      TAPR=YGIP-YGIPPR
      WRITE(2,207) Y(1),TA,TAPR
25   CONTINUE
      STOP
100  FORMAT(L5)
101  FORMAT(I2)
102  FORMAT(5F10.0)
201  FORMAT(1H/ /6X,12HYUZEY SAYISI.15/)
202  FORMAT(11X,17HYUZEY EGRILIKLERI/5(5F12.5/))
203  FORMAT(11X,17HKIRILMA INDISLERI/5(5F12.5/))
204  FORMAT(11X,20HYUZEY SEPERASYONLARI/5(5F12.5/))
205  FORMAT(1H /6X,14HCISIM YUK.LIGI,F20.3/6X,15HCISIM MESAFESI,F18.3/)
206  FORMAT(1H /6X,10HALAN ACISI,F22.3,9H DERECE/)
207  FORMAT(1X,F14.4,E19.4,E18.4)
301  FORMAT(1H /8X,5HGELIS,8X,8HENLEMSEL.8X,15HTEMEL ISIN ICIN/8X,
      *11H YUKSEKLIGI,8X,9HABERASYON,6X,13HEN. ABERASYON/)
      END
      SUBROUTINE PRAXL
C   SONLU CISIMDEN EKSENEL BIR NOKTADA GELMEKTE OLAN
C   PARAXIAL ISINI IZLEME ISLEMINI YAPAR VE GAUSSIAN GORUNTUNUN
C   POZISYONU GIP ILE BUYUKLUGU YPXL YI HESAPLAR.
      REAL K,N
      COMMON NS,N,C,D,U,Y,FL,BFL,GIP,YGIP,YPXL,YOBJ,DOBJ
      DIMENSION N(21),C(20),D(19),U(21),Y(20)
      U(1)=Y(1)/DOBJ
      DO 30 J=1,NS
      K=(N(J+1)-N(J))*C(J)
      U(J+1)=(N(J)*U(J)-Y(J)*K)/N(J+1)
      IF (J.EQ.NS) GOTO 35
      Y(J+1)=Y(J)+D(J+1)*U(J+1)
30   CONTINUE

```

```

35 GIP=-Y(NS)/U(NS+1)
   YPXL=-(GIP-BFL)*YOBJ/FL
   RETURN
   END
   SUBROUTINE FOCUS
C BU ALT PROGRAM ODAK UZUNLUGU FL
C VE GERI ODAK UZUNLUGU BFL   YI HESAPLAR
   REAL K,N
   COMMON NS,N,C,D,U,Y,FL,BFL
   DIMENSION C(20),N(21),D(19),U(21),Y(20)
   K=(N(2)-N(1))*C(1)
   IF(Y(1).EQ.0.0) Y(1)=1.0
   U(2)=-Y(1)*K/N(2)
   DO 40 J=2,NS
   Y(J)=Y(J-1)+D(J)*U(J)
   K=(N(J+1)-N(J))*C(J)
   U(J+1)=(N(J)*U(J)-Y(J)*K)/N(J+1)
40 CONTINUE
   FL=-Y(1)/U(NS+1)
   BFL=-Y(NS)/U(NS+1)
   WRITE(2,401) FL
   WRITE(2,402) BFL
401 FORMAT(1H0,5X,13HODAK UZUNLUGU,F22.4)
402 FORMAT(6X,18HGERI ODAK UZUNLUGU,F17.4/)
   RETURN
   END
   SUBROUTINE PUPIL
C BU ALT PROGRAM ARALIK DURDURUCUNUN BILINEN POZISYONUNDAN
C YARARLANARAK CIKIS ARALIGININ POZISYONUNU BELIRLER
   REAL KP,NP,N
   COMMON NS,N,C,D,U,Y,FL,BFL,GIP,YGIP,YPXL,YOBJ,DOBJ,EXPP
   DIMENSION C(20),N(21),D(19),U(21),Y(20),CP(20),NP(21),DP(20),
   *UP(21),YP(20)
C ARALIK DURDURUCUNUN,JP SAYILI YUZEYIN SAG TARAFINA OLAN
C UZAKLIGI(DAP) OKUNUR VE YAZILIR
   READ(1,*) DAP,JP
   WRITE(2,209) DAP,JP
C DURDURUCUDAN ITIBAREN TERS ISIN IZLEME ICIN
C DEGISKENLERIN OLUSTURULMASI
   M=0
50 M=M+1
   JP2M=JP+2-M
   NP(M)=N(JP2M)
   IF(M.EQ.JP+1) GOTO 55
   JP1M=JP+1-M
   CP(M)=-C(JP1M)
   IF(M.EQ.JP) GOTO 50
   DP(M+1)=D(JP1M)
   GOTO 50
55 CONTINUE
C CIKIS ARALIGINI BULMAK ICIN PARAXIAL ISIN IZLEME ISLEMININ YAPILMASI
   IF (ABS(DAP).GE.1.0E-4) GOTO 60
   UP(1)=0.1
   YP(1)=0.0
   GOTO 65
60 YP(1)=0.1
   UP(1)=YP(1)/DAP
65 CONTINUE
   DO 70 J=1,JP
   KP=(NP(J+1)-NP(J))*CP(J)

```

```

      UP(J+1)=(NP(J)*UP(J)-YP(J)*KP)/NP(J+1)
      IF(J.EQ.JP) GOTO 75
      YP(J+1)=YP(J)+DP(J+1)*UP(J+1)
70  CONTINUE
75  EXPP=YP(JP)/UP(JP+1)
C  EXPP,CIKIS ARALIGI DUZLEMIDIR
103 FORMAT(F8.0,I2)
209 FORMAT(6X,29HARALIK DURDURUCUNUN MESAFESI,F8.4,15H DIKKATE ALINAN
      *,16HYUZEYIN NUMARASI,I2/)
      RETURN
      END
      , SUBROUTINE TRACE
      REAL N,K
      COMMON NS,N,C,D,U,Y,FL,BFL,GIP,YGIP,YPXL,YOBJ,DOBJ
      DIMENSION N(21),C(20),D(19),U(21),Y(20)
C  ILK YUZEYDE BASLANGIC DEGERLERININ OLUSTURULMASI
      DD=0.0
      Z=0.0
      UU=U(1)
      YY=Y(1)
C  DCM VE DCN NIN YONLERININ BELIRLENMESI
      DCM=SIN(UU)
      DCN=COS(UU)
      J=1
C  DONGU ICIN MANKEN DEGISKENLERININ OLUSTURULMASI
85  CC=C(J)
      RN=N(J)
      RNP=N(J+1)
C      KIRILMA ISLEMI
      YY=YY+(DD-Z)*DCM/DCN
      F=CC*YY*YY
      G=DCN-CC*YY*DCM
      COSISQ=G*G-CC*F
      IF(ABS(Y(1)).LE.1.0E-8.AND.ABS(DCM).LE.1.0E-8) GOTO 86
      IF(COSISQ.GE.0.0.AND.COSISQ.LE.1.0) GOTO 87
      YPXL=0.0
      YGIP=9999.0
      WRITE(2,220) J,Y(1)
      GOTO 80
86  YPXL=0.0
      YGIP=0.0
      GOTO 80
87  COSI=SQRT(COSISQ)
      IF(F.EQ.0.0) D0=0.0
      IF(F.EQ.0.0) GOTO 88
      D0=F/(G+COSI)
88  YY=YY+D0*DCM
      Z=D0*DCN
C      REFRACT
      SINI=SQRT(1.0-COSI*COSI)
      SINIP=RN*SINI/RNP
      IF(SINIP.LE.1.0) GOTO 90
      YPXL=0.0
      YGIP=9999.0
      WRITE(2,221) J,Y(1)
      GOTO 80
90  COSIP=SQRT(1.0-SINIP*SINIP)
      K=RNP*COSIP-RN*COSI
      DCM=(RN*DCM-YY*K*CC)/RNP
      DCN=(RN*DCN-Z*K*CC+K)/RNP

```

```
IF(J.EQ.NS) GOTO 95
J=J+1
DD=D(J)
GOTO 85
95 YGIP=YY+(GIP-Z)*DCM/DCN
80 RETURN
220 FORMAT(/1X,39HCOSISQ IN SINIRI ASTIGI YUZEY. NUMARASI,I2,4X,5HY(1)=
*,F8.4)
221 FORMAT(/1X,39HKRITIK ACININ ASILDIGI YUZEYIN NUMARASI,I2,4X,5HY(1)=
*,F8.4)
END
```



YUZEY SAYISI 7

YUZEY EGRILIKLERI				
.61425	-.03627	-.28927	.63221	.00000
.52083	-.41667			
KIRILMA INDISLERI				
1.00000	1.61160	1.00000	1.60530	1.00000
1.51230	1.61160	1.00000		
YUZEY SEPERASYONLARI				
.35700	.18900	.08100	.32500	.21700
.39600				

0 ALAN ACISI -20.000 DERECE/
ODAK UZUNLUGU 5.0799
GERI ODAK UZUNLUGU 4.4072

ARALIK DURDURUCUNUN MESAFESI .1000 DIKKATE ALINANYUZEYIN NUMARASI 4

GELIS YUKSEKLIĞI	ENLEMSEL ABERASYON	TEMEL ISIN ICIN EN. ABERASYON
.9000	-.3759E-01	.2549E-01
.7941	-.5403E-01	.9055E-02
.6882	-.6118E-01	.1903E-02
.5824	-.6386E-01	-.7788E-03
.4765	-.6443E-01	-.1347E-02
.3706	-.6404E-01	-.9624E-03
.2647	-.6325E-01	-.1678E-03
.1588	-.6226E-01	.8167E-03
.0529	-.6114E-01	.1938E-02
-.0529	-.5989E-01	.3195E-02
-.1588	-.5855E-01	.4530E-02
-.2647	-.5739E-01	.5690E-02
-.3706	-.5713E-01	.5955E-02
-.4765	-.5953E-01	.3547E-02
-.5824	-.6894E-01	-.5859E-02
-.6882	-.9661E-01	-.3353E-01
-.7941	-.1764E+00	-.1133E+00

KRITIK ACININ ASILDIGI YUZEYIN NUMARASI 4 Y(1), -.9000
-.9000 .9999E+04 .1000E+05

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkez