

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

THM KIZILÖTESİ SEL TESİSİNDE LAZER TAŞINIM HATLARI TASARIMI

Begüm TEKİNER

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2013

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Begüm Tekiner tarafından hazırlanan “THM Kızılötesi SEL Tesisinde Lazer Taşınım Hatları Tasarımı” adlı tez çalışması 07 / 01 / 2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ömer YAVAŞ



Jüri Üyeleri:

Başkan :Doç. Dr. Hakan ALTAN
ODTÜ, Fizik Anabilim Dalı



Üye :Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye :Doç. Dr. Hüseyin SARI
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

THM KIZILÖTESİ SEL TESİSİNDE LAZER TAŞINIM HATLARI TASARIMI

Begüm TEKİNER

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Bu çalışmada, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında, Ankara Üniversitesi Gölbaşı Yerleşkesinde kurulumu devam etmekte olan THM IR SEL (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara, TARLA) tesisinde üretilecek 2 μm ile 250 μm aralığında kızılötesi bölgede ışınım yapan serbest elektron lazerinin deney istasyonlarına taşınım sistemi incelenmiştir.

Lazer demetinin taşınımı yapılırken, ışın ve Gaussiyen optiği yöntemlerinden yararlanılarak, optik demetin hat boyunca en az yayınımla iletimi sağlanmıştır. Yapılan analitik hesaplamalar ile aynalar arası uzaklıklar ve aynaların yarıçap değerleri belirlenmiştir. Hat boyunca kullanılacak olan parametrelere karar verirken diyagnostik masası üzerinde oluşan optik demet yarıçapının minimumda tutulması amaçlanmıştır. Tasarım işleminde kullanılmak üzere ZEMAX isimli simülasyon programı seçilmiş ve analizler aynı zamanda ELBE tarafından karşılanan GLAD optik tasarım programı ile de kontrol edilmiştir. TARLA tesisi U25 ve U90 SEL demet hatları için yapılan hesaplamaların doğruluğu ELBE U27 ve U100 taşınım hatlarının yeniden hesaplanması ile test edilmiştir.

Ocak 2013, 90 sayfa

Anahtar Kelimeler: Serbest Elektron Lazeri, Osilatör SEL, Kızılötesi SEL, SEL Taşınım Hatları, TARLA, ZEMAX, GLAD

ABSTRACT

Master Thesis

DESIGN OF LASER TRANSPORT LINES IN THM INFRARED FEL FACILITY

Begüm TEKİNER

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

In this study, design of laser transport lines from undulators to experimental stations of THM IR FEL (TARLA) facility which is under construction in Gölbaşı Campus area of Ankara University as a first facility of Turkish Accelerator Center (TAC) to obtain free electron laser in infrared region ($2 - 250 \mu\text{m}$) is studied.

The transportation of the laser beam with minimum dispersion is planned by using Gaussian and Ray Optics methods. The distance between mirrors and the radius of their curvature was estimated by performing analytical calculations. While deciding to use parameters through the optical line, the purpose is to transport the laser beam with minimum value of diameter to diagnostic table. The simulation program, ZEMAX, is used in design studies. In the same time, all of the calculations are checked with GLAD optical design program supplied by ELBE laboratory. Obtained results for TARLA U25 and U90 transfer lines are compared with ELBE U27 and U100 transfer lines calculations.

January 2013, 90 pages

Key Words: Free Electron Laser, Oscillator FEL, Infrared FEL, FEL Transport Lines, TARLA, ZEMAX, GLAD

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında, bilgi ve önerileri ile yön veren, çalışmalarında bilgi birikimlerini esirgemeyen danışmanım Sayın **Prof. Dr. Ömer YAVAŞ**'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) ve ayrıca proje konu koordinatörümüz **Prof. Dr. Ergün KASAP**'a (Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı), tüm hoşgörü ve iyi niyeti için, son olarak tez çalışmalarında hep yanımda olup, bilimsel ve manevi katkılarını esirgemeyen çalışma arkadaşım **Emre ERBAY**' a (Gazi Üniversitesi Yüksek Lisans Öğrencisi), her zaman yanımda olup manevi desteklerini esirgemeyen ailem ve arkadaşım **Buket TAŞDİZEN**'e teşekkürü bir borç bilirim.

Begüm TEKİNER

Ankara, Ocak, 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Lazerler	4
2.2 Serbest Elektron Lazerleri	5
2.2.1 SEL' in özellikleri.....	5
2.2.2 SEL karakteristiklerinin belirlenmesi	7
2.2.2.1 Undulatör magnet alanı.....	7
2.2.3 SEL çeşitleri.....	14
2.3 Osilatör SEL' in Çalışma Prensibi	15
2.4 Gaussiyen Demet Optiği	16
2.4.1 Demet beli çapı ve demet ıraksaması	17
2.4.2 Bir optik sistemin büyütme oranı	20
2.4.3 Gaussiyen demetin yönlendirilmesi ve odaklanması	24
2.5 Optik Demet Hattı Değerlerinin Hesaplanması	27
2.5.1 Optik demet hattı genel görünümü	27
2.6 Işın Matrisleri	29
2.6.1 Işın transfer matrisleri.....	30
2.6.2 Optik bileşenler matrisi	32
2.6.2.1 Boş bir uzay boyunca yönlendirme	32
2.6.2.2 Düzlem kenarda kırınım.....	32
2.6.2.3 Küresel kenarda kırınım	33
2.6.2.4 İnce mercek boyunca ışının hareketi.....	34
2.6.2.5 Düzlem aynadan yansıma.....	35

2.6.2.6 Küresel aynadan yansıma.....	35
2.6.3 Sıralı optik bileşen matrisi	36
2.6.4 Periyodik olarak dizilmiş optik sistemler	36
2.7 Aynalar.....	37
2.7.1 Düzlem aynalar	37
2.7.2 Küresel aynalar	37
2.7.3 Parabolik aynalar.....	38
2.7.4 Eliptik aynalar.....	39
2.8 Aynaların Kaplanması.....	39
2.8.1 Kaplama çeşitleri.....	40
2.9 Kızılötesi Geçirgen Pencereleler	41
2.9.1 Kızılötesi geçirgen pencere malzemeleri	41
2.9.2 Basınç ortamındaki optik pencere kalınlığının hesaplanması	45
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	46
3.1 Materyal	46
3.2 Yöntem	48
3.2.1 Optik demet hattı simülasyonu ve kullanılan programlar	48
3.2.1.1 ZEMAX optik tasarım programı.....	49
3.2.1.2 GLAD optik sistem tasarım programı	51
3.2.1.3 İnteraktif komut ekranı.....	51
3.2.1.4 Grafik görüntüleme ekranı	53
3.2.2 Takip ekranı	54
4. BULGULAR	55
4.1 ELBE IR SEL Laboratuvarları Optik Taşınım Hatları.....	55
4.1.1 ELBE U27 ve U100 taşınım hatları	55
4.2 TARLA Optik Demet Hatları	62
4.2.1 Demet hatlarında kullanılacak optik elemanların belirlenmesi	64
4.2.2 Hesaplama sonuçları ve parametrelerin optimizasyonu	66
4.2.2.1 TARLA U25 taşınım hattı	66
4.2.2.2 TARLA U90 taşınım hattı	69
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	74
KAYNAKLAR.....	78

EK 1 TARLA U25 Hattı GLAD Çıktı Ekranı ($D_h=2$ mm, $\lambda=20$ μm)	83
EK 2 TARLA U90 GLAD Programı Veri Giriş Ekranı ($D_h=6$ mm, $\lambda=100$ μm).....	85
EK 3 TARLA U90 Hattı GLAD Çıktı Ekranı ($D_h=6$ mm, $\lambda=100$ μm).....	86
EK 4 TARLA U90 Optik Demet Hattı ZEMAX Gaussian Paraksiyel Demet Parametreleri ($D_h=6$ mm, $\lambda=250$ μm)	88
ÖZGEÇMİŞ.....	90

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklamaları
ELBE	Electron Linear Accelerator of High Brilliance and Low Emittance
GLAD	General Laser Analysis and Design
IR-SEL	Kırmızıaltı Serbest Elektron Lazeri
SEL/ FEL	Serbest Elektron Lazeri
TAC	Turkish Accelerator Center
TARLA	Turkish Acceleration and Radiation Laboratory at Ankara
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
THM IR-SEL	Türk Hızlandırıcı Merkezi Kırmızıaltı Serbest Elektron Lazeri
UV	Ultraviyole
YUUP	Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje

Simgeler	Açıklamaları
λ	Dalgaboyu
λ_u	Undulatör Dalgaboyu
μ	Mikron
ps	Pikosaniye
w	Demet Çapı
w_0	Minimum Demet Çapı Genişliği
f	Odak uzaklığı
d	Aynalara Olan Uzaklıklar
R	Ayna Yarıçap Değeri
R(z)	Dalga Cephesi Yarıçapı
σ_r	Uzaysal Kaynak Boyu
k_u	Undulatör Dalga Sayısı
B_0	Manyetik Alan
B	Parlaklık
m_e	Elektron Kütlesi
c	Işık Hızı
Φ	Potansiyel
K	Undulatör Parametresi
Θ	Iraksama Açısı
Θ_B	Brewster Açısı
z_R	Rayleigh Uzaklığı

M	Büyütme Oranı
q	Kompleks Parametre
n	Ortam İndisi
g	Aralık (gap)
D _h	Optik Kovuk Açıklık Çapı
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Au	Altın
SiO	Silisyum Oksit
BaF ₂	Baryum Florür
CaF ₂	Kalsiyum Florür
ZnSe	Çinko Selenit
Ge	Germanyum

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Serbest Elektron Lazeri.....	5
Şekil 2.2	Undulator magnet alanı.....	7
Şekil 2.3	Undulator içerisinde radyasyon yayını.....	13
Şekil 2.4	Osilatör SEL	15
Şekil 2.5	TEM ₀₀ modu	16
Şekil 2.6	z eksenini boyunca demetin görünümü.....	17
Şekil 2.7	Ayna öncesi ve sonrasında oluşan demet belleri ve mesafeleri.....	19
Şekil 2.8	Görüntünün büyüklüğü ve konumu	20
Şekil 2.9	Aynalardan demet beline olan uzaklıklar	24
Şekil 2.10	İki demet belisi arasındaki uzaklıklar.....	24
Şekil 2.11	Optik demet hattı şematik gösterimi	27
Şekil 2.12	Işının demet belisi görüntüsü.....	27
Şekil 2.13	Mercek odak uzaklığı.....	28
Şekil 2.14	z eksenini üzerinde yerleştirilmiş mercekler ve ışın iletimi.....	30
Şekil 2.15	Sistem içerisindeki giriş ve çıkış açıları.....	31
Şekil 2.16	Boşlukta dalga ilerlemesi.....	32
Şekil 2.17	Küresel kenarda kırınım.....	33
Şekil 2.18	İçbükey ayna için $R > 1$ Dışbükey ayna için $R < 1$	33
Şekil 2.19	a. İnce lenste ışın bükülmesi, b. İnce lenste görüntü oluşumu.....	34
Şekil 2.20	İçbükey, $f > 0$; Dışbükey, $f < 0$	34
Şekil 2.21	Düzlem aynadan yansıma	35
Şekil 2.22	İçbükey $R < 0$; Dışbükey $R > 0$	35
Şekil 2.23	Sıralı optik sistem	36
Şekil 2.24	Düzlem aynadan yansıma	37
Şekil 2.25	Küresel aynadan yansıma	38
Şekil 2.26	Parabolik aynalardan yansıma	38
Şekil 2.27	Eliptik aynadan yansıma	39
Şekil 2.28	Altın, gümüş ve alüminyum için dalgaboylarına göre yansıtma oranları....	40
Şekil 2.29	IR pencerelerin geçirgenlik yüzdeleri.....	43
Şekil 3.1 a.	Aynaların yerel ya da uzaktan kontrol seçiminin yapıldığı mekanizma, b. Aynaların kontrolünün yapılabilmesi için yerleştirilen kamera ve lokal kontrol, c.Uzaktan kontrollerin yapıldığı kontrol ekranı (Görüntüler ELBE Laboratuvarından alınmıştır.).....	47
Şekil 3.2	ZEMAX mercek veri girişi ekranı	49
Şekil 3.3	ZEMAX genel parametre girişi ekranı	49
Şekil 3.4	ZEMAX “Paraxial Gaussian Beam” veri ekranı	50
Şekil 3.5	GLAD girdi ve çıktı ekranları.....	52
Şekil 3.6	GLAD programı ile grafik görüntüleme	54
Şekil 3.7	Değişkenlerin gösterildiği ekran	54
Şekil 4.1	ELBE U27 optik demet hattı	56
Şekil 4.2	1.5- 2.0- 3.0- 4.0 mm açıklık değeri için ELBE U27 hattı demet çapları ($Db = 2.85 \cdot w$)	58
Şekil 4.3	ELBE U100 optik iletim hattı	59
Şekil 4.4	2.0- 4.5- 7.0 mm açıklık değerleri için ELBE U100 hattı.....	61

Şekil 4.5	TARLA tesisi yerleşim planı	62
Şekil 4.6	TARLA optik demet hatları şematik görünümü	63
Şekil 4.7	Diagnostik masası şematik görünümü	64
Şekil 4.8	Brewster açısında yerleştirilen pencerelerde kutuplaşma	65
Şekil 4.9	Brewster açısında yerleştirilmiş optik pencereler	65
Şekil 4.10	TARLA U25 optik taşınım hattı	66
Şekil 4.11	$D_h=2$ mm rezonatör çıkışı için U25 optik demet hattı boyunca demet çapları	68
Şekil 4.12	TARLA U90 optik demet hattı görünümü	69
Şekil 4.13	TARLA U90 optik demet hattı büyütme oranları ve uzaklıklar	69
Şekil 4.14	$D_h=6.0$ mm için U90 SEL iletim hattı boyunca demet çapları	72
Şekil 4.15	$D_h=4,5$ mm için U90 SEL iletim hattı boyunca demet çapları	72
Şekil 4.16	TARLA U90 optik demet hattı zemax görüntüsü	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Kızılötesi geçirgen pencerelerin geçirgenlik aralıkları	42
Çizelge 2.2	IR Pencereler ve özellikleri.....	43
Çizelge 2.3	Kızılötesi geçirgen pencerelerin zorlanım katsayıları.....	45
Çizelge 3.1	Optik demet hattı boyunca kullanılacak aynalar.....	46
Çizelge 3.2	GLAD Komutları	52
Çizelge 4.1	U27 – U100 undulatör parametreleri	55
Çizelge 4.2	ELBE U27 hattı için optik demet hattı değerleri	56
Çizelge 4.3	U27 optik demet hattı GLAD programı komutları	57
Çizelge 4.4	ELBE U100 optik demet hattı ayna parametreleri.....	59
Çizelge 4.5	ELBE U100 optik demet hattı GLAD çıktı ekranı	60
Çizelge 4.6	TARLA U25-U90 undulatör parametreleri	63
Çizelge 4.7	TARLA U25 hattı için ayna değerleri	67
Çizelge 4.8	TARLA U25 hattı için ZEMAX ve hesap sonuçları ($D_h=2\text{mm}$, $\lambda=20\text{ }\mu\text{m}$).....	67
Çizelge 4.9	TARLA U90 optik demet hattı Excel analitik hesaplamaları.....	70
Çizelge 4.10	TARLA U90 taşınım hattı ayna değerleri.....	71
Çizelge 4.11	TARLA U90 optik demet parametreleri ($D_h=6\text{mm}$, $\lambda=250\text{ }\mu\text{m}$).....	71
Çizelge 5.1	TARLA U25 optik demet hattı demet beli değerleri ($D_h=2\text{mm}$, $\lambda=20\text{um}$)..	75
Çizelge 5.2	TARLA U90 optik demet hattı demet beli değerleri ($D_h= 6\text{mm}$, $\lambda=100\text{um}$)	76

1. GİRİŞ

Hızlandırıcılara dayalı ışınım kaynakları, elde edilen demet özelliklerine ve yapısına göre sınıflandırılmaktadır. Sadece eğici magnetler kullanılarak elde edilen parazitik ışımlar birinci nesil ışınım kaynakları, salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetler kullanılarak sinkrotron ışınımı üretmek amaçlı tasarlanmış olan kaynaklar ikinci nesil ışınım kaynakları, salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetlerin kullanıldığı halka tipli ve düşük emittanslı ışınım kaynakları üçüncü nesil, doğrusal hızlandırıcıda hızlandırılarak salındırıcı magnetlerden geçirilmesi yoluyla ışınım elde edilmesi olayı da dördüncü nesil ışınım kaynakları olarak adlandırılmaktadır (Bilderback 2005). Günümüzde yaygın olarak kullanılan dördüncü nesil ışınım kaynakları Serbest Elektron Lazerleri (SEL) olarak adlandırılmaktadır. Bu tip ışınım kaynaklarının düşüncesi ilk olarak 1971 yılında John Madey tarafından ortaya atılmıştır. Doğrusal bir hızlandırıcıda hızlandırılan rölativistik elektron demeti, rezonatör içerisine alındıktan sonra salındırıcı magnetten geçerken ivmeli hareketinden dolayı foton salmaktadır. Elektronlardan fotonların üretildiği yüksek kazanç mekanizması bulunmaktadır. Elektron tarafından kaybedilen enerjinin ayarlanabilir dalgaboylu, yüksek akı ve parlaklık değerlerine sahip monokromatik ışınımına dönüşmesi yoluyla düşük emittanslı ($\epsilon < 20 \text{ mm mrad}$) SEL demeti elde edilir.

Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde Kalkınma Bakanlığı desteği ile sürdürülen Üniversitelerarası Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje (YUUP) kapsamında kurulumu Ankara Üniversitesi Gölbaşı Kampüsü'nde sürmekte olan THM IR SEL (Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri) tesisinde iki serbest elektron lazeri üretim hattı inşa edilecektir. THM IR SEL tesisi uluslararası literatürde "Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara (TARLA)" olarak bilinmektedir ve bu tez çalışmasında TARLA tesisi olarak anılacaktır. Bu laboratuvar ile ülkemizde, yüzey fiziği, malzeme bilimi, nanoteknoloji, mikrospektroskopi, yarı iletken yapılar, lineer olmayan optik, gıda sterilizasyonu, biyomedikal ve mikroskopi gibi pek çok alanda araştırma için olanak sağlanacaktır.

TARLA tesisinde yer alacak olan iki lazer üretim hattından elde edilecek dalgaboyu ayarlanabilir, yüksek pik gücü ve ps zaman yapısı gibi özellikleri olan serbest elektron lazeri demetlerinin özellikleri korunarak kullanıcı istasyonlarına taşınması büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, TARLA Tesisi'nde 40 MeV' e kadar hızlandırılan elektronların 2.5 ve 9 cm periyot uzunluğuna sahip U25 ve U90 undulatörlerinden geçirilmesi ile elde edilen kızılötesi bölgede ışıyım yapan lazer demetinin salındırıcılardan deney istasyonlarına kadar taşınım hatlarının yapısı, optik ve mekanik elemanları ile teknolojisi incelenecektir.

Lazer öncelikle undulatörlerden diyagnostik masasına kadar U25 ve U90 optik demet hatları ile taşınarak, burada optik demetin güç, enerji ve spektral aralık gibi ölçümleri yapılacaktır. Bu ölçümler, deney istasyonlarında yapılan araştırmalarda kullanılacak olan demet özelliklerinin belirlenmesi bakımından önemli rol oynamaktadır. Optik kavite çıkışından diyagnostik masasına kadar lazer demetinin taşınımını yapacak olan U25 ve U90 optik demet hatları ve diyagnostik masasından deney laboratuvarlarına iletimi sağlayacak olan deney istasyonları taşınım hattı boyunca odaklayıcı ve düzlem aynalar kullanılacaktır. Bu aynaların alttaş ve kaplama malzemeleri, üretilen dalgaboyu aralığına en uygun olan malzemeler arasından seçilecektir. Optik demet hattı boyunca kaybın en aza indirgenmesi için vakum işlemi uygulanacaktır ve vakum kaybını önlemek için ise belirli bölgelerde ihtiyaca göre belirlenecek olan optik geçirgen pencereler kullanılacaktır.

Optik demet hattının analitik hesaplama bölümünde ise Gaussiyen ve ışın matris yöntemi adı verilen metotlardan yararlanılacaktır. Bu iki yöntem kullanılarak iletimi yapılacak olan optik demetin hat boyunca dağılımı, ayna yarıçap değerleri ve uzaklıklar da hesaba katılarak hesaplanabilmektedir. Yapılan hesaplamaların simülasyonu TARLA projesi tarafından sağlanan ZEMAX isimli optik dizayn programı ve ELBE (Almanya) GLAD optik tasarım programı kullanılarak yapılmıştır. ZEMAX daha kullanıcı dostu bir program olmasıyla birlikte, demet çapı, ıraksama açısı, Rayleigh uzunluğu ve demet beline olan uzaklıklar gibi ihtiyacımız olan bütün verileri elde etmemize olanak sağlamaktadır. GLAD programı ise bir script dosyasında tanımlanan komutlar yardımı ile karmaşık optik sistemlerin tasarımında kullanılan bir tasarım programıdır. ZEMAX

programından üstünlüğü ise GLAD programının lazerin enerji ve kazanç hesaplarında da kullanılabilmesidir.

Analitik ve simülasyon sonuçlarının doğruluğunun en iyi şekilde yapılabilmesi için dünyada kurulu bulunan tesislerden TARLA Tesisi'ne en çok benzeyen serbest elektron lazeri tesisi seçilmek istenmiştir. Bu nedenle literatür taraması sonucunda Dresden, Almanya'da kurulu olan ELBE kızılötesi SEL Tesisi hesaplamaların doğruluğunu teyit etmek açısından en uygun tesis olarak seçilmiştir. Bu tez çalışmasında, ELBE optik demet hattında kullanılan optik taşıyım hattının özellikleri ışığında, TARLA'da kurulacak optik taşıyım hatlarının tasarımı gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Lazerler

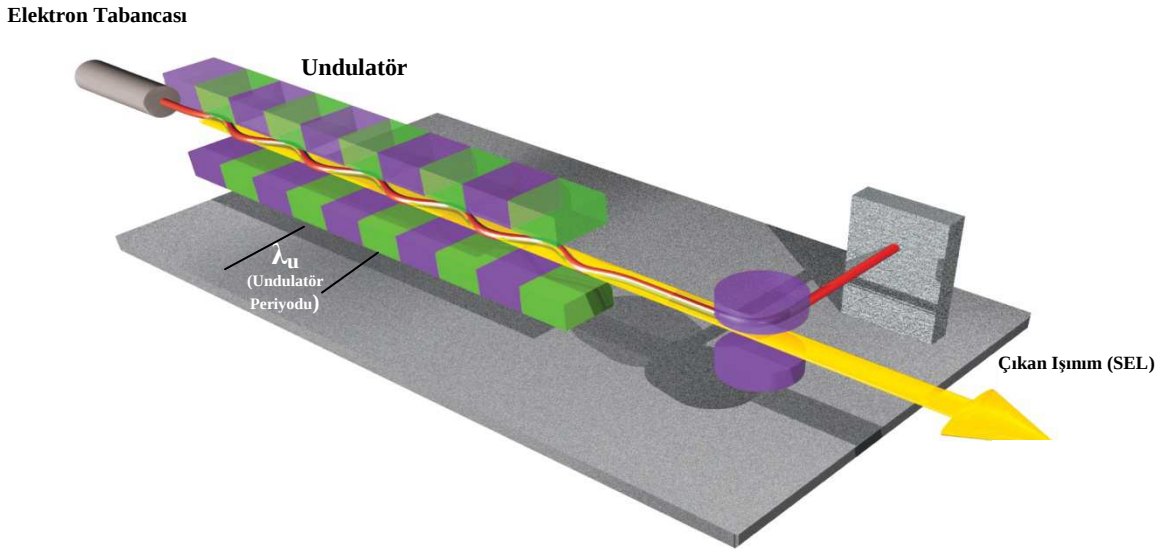
Lazer, en önemli özelliklerini niteleyecek şekilde kısaca “Uyarılmış Radyasyon Emisyonu ile Işık Yükseltgenmesi (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)” şeklinde tanımlanabilmektedir. Günümüzde birçok lazer çeşidi mevcuttur ve bunların benzer özelliği radyasyonun yükseltgenmesi için kullanılan belirli birer malzeme içeriyor olmalarıdır. Bu kullanılan malzeme kazanç ortamı (gain medium) olarak adlandırılmaktadır, çünkü radyasyon bu ortamdan her geçişinde enerji kazanmaktadır (Smith 2000).

Uyarılmış emisyon olarak adlandırılan yükseltgenmeyle ilgili fiziksel ilke 1916 yılında Albert Einstein tarafından ortaya atılmıştır. 1928 yılında uyarılmış emisyonun ve negatif soğurmanın varlığı Rudolph W. Landenburg tarafından doğrulanmıştır. Sonraki yıllarda Valentin A. Fabrikant, bazı kısa dalgaların yükseltgenmesi için uyarılmış emisyonun kullanımıyla ilgili bir öngöründe bulunmuştur. Bu fikirle yola çıkan James P. Gordon, Herbert J. Zeiger ve Charles H. Townes, 1953 yılında, ilk mikrodalga yükselteciyi üretmişler ve sonrasında Charles Hard Townes ve Arthur Leonard Schawlow infrared lazerler üzerine bir çalışmaya başlamışlardır. Lazer terimi ilk olarak Gordon Gould’un 1959 makalesinde “LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)” şeklinde isimlendirilerek halka tanıtılmıştır. İlk lazer çalışması ise 1960 yılında Hughes Araştırma Enstitüsü (Malibu/California) ’nde çalışan Theodore H. Maiman tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, Maimann ilk lazeri yakut kristali kullanarak çalıştırmıştır (Maimann 1960). Günümüzde birçok farklı kazanç ortamını kullanan lazer çeşitleri mevcuttur. Elektromanyetik spektrumun farklı dalgaboylarında çalışan bu lazer sistemlerinden, uzak kızılötesi bölgesinde çalışan lazer sistem çeşitleri oldukça azdır. Bu lazer çeşitleri arasında Serbest Elektron Lazerlerinin (SEL) yeri son derece önemlidir.

2.2 Serbest Elektron Lazerleri

Serbest Elektron Lazerleri (SEL) düşüncesi ilk olarak 1971 yılında Stanford Üniversitesi'nde John Madey tarafından ortaya atılmıştır. Madey ve çalışma arkadaşları tarafından etkin hale getirilen ilk SEL' den, kızılötesi bölgede 12 μm dalga boyuna sahip ışınım elde edilmekteydi (Mabe 1995). SEL' ler uzun yıllardır mikrodalga ve kızılötesi dalga boylarının haricindeki konvansiyonel lazerlerle kıyaslandığında çok önemli bir rol oynamaktadır (Schmüser 2008).

Doğrusal bir hızlandırıcıda hızlandırılan rölativistik elektron demeti, salındırıcı magnetten geçerken enerjisinin bir kısmını elektromanyetik ışıma olarak kaybeder (Şekil 2.1). Kaybedilen enerjinin ayarlanabilir dalgaboylu, yüksek akı ve parlaklık değerlerine sahip monokromatik ışınıma dönüşmesi yoluyla elde edilen ışınım "Serbest Elektron Lazeri (SEL)" olarak adlandırılır (Karşı 2006).



Şekil 2.1 Serbest Elektron Lazeri (Anonymous 2012.b)

2.2.1 SEL' in özellikleri

Parlaklık: Birim katı açı ve birim alan başına düşen güç değeridir. Parlaklık, demet taşınım sisteminde akı gibi (açısal akı yoğunluğu gibi değil) değişmeyen bir nicelik

olduğu için geometrik optik ile açıklanabiliyor. Parlaklık değeri bir kaynağın özelliklerinin doğru ölçümüdür ve yapılan kaynak kıyaslamalarına karşı çok hassastır (Allan vd. 2001).

Bir elektron kaynağı için faz uzayı alanı $2\pi\sigma_r\sigma_r'$ dır (σ_r uzaysal kaynak boyudur). Undulatör kaynağı optik rezonatörün temel moduna yakınsanırsa, faz uzayı alanı,

$$2\pi\sigma_r\sigma_r' = \lambda/2 \quad (2.1)$$

ve bununla beraber pik akı durumu,

$$\sigma_r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\lambda L} \quad (2.2)$$

$$\sigma_r' = \sqrt{\lambda/L} \quad (2.3)$$

olarak tanımlanır. Elektron demetini Gaussian dağılımı şeklinde incelediğimiz zaman σ_x ve σ_y , x ve y eksenindeki kaynak uzunlukları, $\sigma_{x'}$ ve $\sigma_{y'}$ ise faz uzayındaki uzaksama değerleridir. Kaynağın etkili yatay ve dikey boyları (x,y) ile uzaksamalarını (x',y') bu parametreler cinsinden yazmak mümkündür.

$$\sum x = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_x^2} \quad (2.4)$$

$$\sum y = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_y^2} \quad (2.5)$$

$$\sum x' = \sqrt{\sigma_{r'}^2 + \sigma_{x'}^2} \quad (2.6)$$

$$\sum y' = \sqrt{\sigma_{r'}^2 + \sigma_{y'}^2} \quad (2.7)$$

Undulatör parlaklığı, merkez konideki foton yoğunluğunun (N) faz uzayı hacmine ve etkili kaynak yönlerine bölümüyle ifade edilebilir (Sheffield 1987).

$$B = \frac{N}{4\pi \sum x \sum y \sum x' \sum y'} \quad (2.8)$$

Serbest elektron lazeri için parlaklık değeri ise 2.9 denkleminde hesaplanabilmektedir (Fraser 1987).

$$B_{SEL} = \frac{I_{SEL}}{(2\pi)^2 \sigma_x \sigma_y \sigma_{x'} \sigma_{y'}} \quad (2.9)$$

Yönlendirilebilirlik: Çoğu lazer radyasyonu, oldukça yönlü ve düşük genişleme açısıyla ayarlı olarak sağlar. Bu, lazer demeti tarafından taşınan enerjinin kolaylıkla toplanıp, küçük bir alana odaklanabilmesi anlamına geldiğinden oldukça önemlidir.

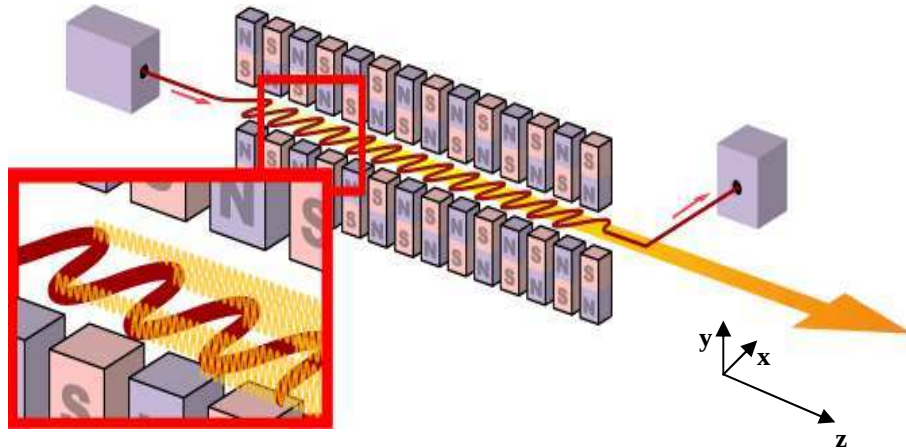
Dalgaboyu ayarlanabilirliği: Elektronun enerjisi ve salındırıcı magnet alan değişimiyle (magnet aralığı değişimiyle) ışınım dalga boyu ayarı yapılabilir.

Tek Renklilik: Elde edilen lazerin tek enerjili (dalgaboylu) olmasını anlatır.

Koherent olma koşulu: Optik demet, elektron demetine odaklanarak koherentlik (eş fazlılık) koşulu sağlanır. Elektronun salındırıcı magnet içerisindeki her salınımın, ışınım dalga boyunun tamsayı katına (harmonik sayı) eşit olma durumudur. Bu koşul Bölüm 2.3.2’de daha ayrıntılı anlatılacaktır.

2.2.2 SEL karakteristiklerinin belirlenmesi

2.2.2.1 Undulatör magnet alanı



Şekil 2.2 Undulatör magnet alanı (Tural 2008)

Elektronun undulator magnet içerisine girdikten sonraki hareketi şekil 2.2’de görülmektedir. Sistem içerisinde undulator eksenleri demetin ilerleme doğrultusu olan z yönünde bulunmaktadır, manyetik alan bileşenleri ise y yönünde dikey konumdadır. λ_u değeri magnetlerin sıralanma periyodunu göstermektedir. Kutuplar arası yatay genişliğinin λ_u ’ dan daha büyük olduğu farz edilirse, elektron demetine paralel çevredeki x eksenini görmezden gelinebilir.

Manyetik alan, dalga sayısı (Denklem 2.10) cinsinden yazılarak 2.11 denklemi elde edilebilmektedir.

$$k_u = \frac{2\pi}{\lambda_u} \quad (2.10)$$

$$B_y(0,0,z) = B_0 \cos(k_u z) \quad (2.11)$$

Elektron demetinin vakum içerisindeki bir hazne içerisinde, Maxwell denklemlerinden,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.12)$$

koşulunun sağlandığı bilinmektedir. Bu denklemde manyetik alan, skaler manyetik potansiyelin gradyanı cinsinden yazıldığı zaman denklem 2.13’e ve Laplace denklemine (Denklem 2.14) ulaşmak mümkün olabilmektedir.

$$\vec{B} = -\vec{\nabla} \phi_{\text{mag}} \quad (2.13)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.14)$$

Buradaki alan eksen üzerinde harmonik olduğu dikkate alınarak genel çözüme ulaşılabilir.

$$\phi_{\text{mag}(y,z)} = f_{(y)} \sin k_u z \quad (2.15)$$

$$\frac{d^2 f}{dy^2} - k_u^2 f = 0 \quad (2.16)$$

$$f_{(y)} = C_1 \sinh(k_u y) + C_2 \cosh(k_u y) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \phi_{\text{mag}}}{\partial y} = \frac{\partial f(y)}{\partial y} \sin k_u z = k_u [C_1 \cos(k_u y) - C_2 \sin(k_u y)] \sin k_u z \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} B_y(y, z) &= - \frac{\partial \phi_{\text{mag}}}{\partial y} = - \frac{\partial f(y)}{\partial y} \sin(k_u z) \\ &= -k_u [C_1 \cos(k_u y) - C_2 \sin(k_u y)] \sin(k_u z) \end{aligned} \quad (2.19)$$

B_y , $y=0$ düzlemi ile simetriktir ve bu durum dikkate alınarak $k_u C_1 = B_0$ olduğu kabul edilir ve $B_y(0, z) = -B_0 \sin(k_u z)$ olduğu söylenebilmektedir ve potansiyel değerine de buradan ulaşılabilir.

$$\phi_{\text{mag}(x,y,z)} = \frac{B_0}{k_u} \sinh(k_u y) \sin(k_u z) \quad (2.20)$$

$y \neq 0$ koşulu için bakıldığı zaman manyetik alanın bir de yatay bileşeni, B_z , olduğu görülebilmektedir. Bu durumda tüm bileşenler şöyle ifade edilir (Dattoli vd. 1993).

$$B_x = 0 \quad (2.21)$$

$$B_y = - B_0 \cosh(k_u y) \sin(k_u z) \quad (2.22)$$

$$B_z = - B_0 \sinh(k_u y) \cos(k_u z) \quad (2.23)$$

2.3.2.2 Elektronun undulatör içerisindeki hareketi

Elektronun undulatör içerisindeki hareketini açıklayabilmek için öncelikli olarak elektronun toplam enerjisini tanımlamak gerekmektedir.

$$W = W_{\text{kin}} + m_e c^2 = \gamma m_e c^2 \quad (2.24)$$

Lorentz kuvvetiyle enine hızlandırma denklemi ise eşitlik 2.25' te tanımlanmıştır.

$$\gamma m_e \vec{u} = - e \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.25)$$

Denklemde gösterilen $v = \dot{x}$ veya $v = \dot{z}$ şeklinde yazıldığı bilinmektedir. Bu durumda $\dot{u} = \ddot{x}$ veya $\dot{u} = \ddot{z}$ gibi yazıldığında 2.25 denklemi daha açık bir şekilde yazılabilir (Dattoli vd. 1993).

$$\vec{\ddot{x}} = \vec{\ddot{v}} = \frac{e \vec{v} \times \vec{B}}{\gamma m_e} \quad (2.26)$$

Hızlandırma denklemi bileşenlerine göre yazılmak istenirse,

$$\gamma m_e \vec{\ddot{v}}_x = -e \vec{v}_z \times \vec{B}_y \quad (2.27)$$

Bu durumda,

$$\ddot{x} = \frac{e}{\gamma m_e} B_y \dot{z} \quad (2.28)$$

ve buradan da,

$$\gamma m_e \vec{\ddot{v}}_z = -e \vec{v}_x \times \vec{B}_y \quad (2.29)$$

denklemine ulaşılır. Sonuç olarak,

$$\ddot{z} = - \frac{e}{\gamma m_e} B_y \dot{x} \quad (2.30)$$

z yönündeki ivmelenme hareketi tanımlanabilmektedir. Denklemlerde yer alan y yönündeki manyetik alanın $B_y = B_0 \sin k_u z$ olduğu daha öncesinde belirtilmişti. Bu denklemlerden yola çıkarak birinci dereceden çözümü belirlemek için; $v_z = \dot{z} \approx v = \beta c$ =sabit ve $v_x \ll v_z$, buradan da $\ddot{z} \approx 0$ ve çözümün $x(t)$ ve $z(t)$ için aşağıdaki denklemdeki gibi olduğu görülebilmektedir (Dattoli vd. 1993).

$$x(t) \approx \frac{e B_0}{\gamma m_e \beta c k_u^2} \sin(k_u \beta c t), \quad z(t) \approx \beta c t \quad (2.31)$$

$$\ddot{x} = \frac{e}{\gamma m_e} \dot{z} \iint B_y dt = \frac{e}{\gamma m_e} \dot{z} \iint B_0 (\sin k_u z) dt = \frac{e}{\gamma m_e} \frac{B_0 \sin k_u \beta c t}{\beta c k_u^2} \quad (2.32)$$

Başlangıç koşulları ($t=0$) dikkate alındığı zaman çözümlemeler sabit değerlere eşitlenebilir.

$$x(0) = \frac{e B_0}{\gamma m_e \beta c k_u} \sin(0) = 0 \quad (2.33)$$

ve

$$\dot{x}(0) = \frac{e B_0 \beta c k_u}{\gamma m_e \beta c k_u^2} \cos(0) = \frac{e B_0}{\gamma m_e k_u} \quad (2.34)$$

Elektron undulatör içerisinde salınımlı hareket etmektedir.

$$x(z) = \frac{K}{\beta \gamma k_u} \sin(k_u z) \quad (2.35)$$

Bu denklemde K değeri undulatör parametresi olarak adlandırılmaktadır.

$$K = \frac{e B_0}{m_e c k_u} = \frac{e B_0 \lambda_u}{2\pi m_e c} = 0.934 B_0(T) \lambda_u \text{ (cm)} \quad (2.36)$$

Ek olarak maksimum uzaksama açısı;

$$\theta_{\max} \approx \left[\frac{dx}{dz} \right]_{\max} = \frac{e B_0}{\gamma m_e \beta c k_u} = \frac{K}{\beta \gamma} \quad (2.37)$$

olarak tanımlanır (Cenger vd. 2007) ve undulatör radyasyonunun karakteristiği dikkate alındığı zaman aşağıdaki koşulları sağlaması seçilir (Mathias 1997).

$$\theta_{\max} \leq \frac{1}{\gamma} \quad \text{ve} \quad K \leq 1 \quad (2.38)$$

Eğer parçacık yörüngesi koni dışına doğru uzuyor ise böyle magnetlere zigzaglayıcı (wiggler) magnet denilmektedir ve undulatör parametresi $K \gg 1$ koşulunu sağlayacak şekilde seçilir (Dattoli vd. 1993).

Bu zamana kadar ki sonuçlar hızın z bileşeni dikkate alınarak elde edildi. Bu bölümde de z bileşeninin sinüsel yörünge için sabit olmadığı düşünülerek çözümleme yapılmaktadır. Burada,

$$u(z) = \sqrt{u^2 - u_x^2} \approx c \left[1 - \frac{1}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{\gamma^2 u_x^2}{c^2} \right) \right] \quad (2.39)$$

$$u(z) = u^2 - u_x^2 = u^2 - \frac{K^2}{\gamma^2} \cos^2 \left(\frac{2\pi z}{\lambda_u} \right) \quad (2.40)$$

Denklemde $\cos^2 A = (\cos 2A + 1)/2$ açılımı uygulanarak farklı bir çözüme ulaşılabilmektedir.

$$u(z)^2 = u^2 \left[1 - \frac{K^2}{u^2 \gamma^2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{4\pi z}{\lambda_u} \right) \right) \right] \quad (2.41)$$

2.41 denkleminde $(1 - x)^{1/2} \sim 1 - x/2$ yaklaşımını kullanarak,

$$\begin{aligned} u(z) &= u \left[1 - \frac{K^2}{2u^2 \gamma^2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{4\pi z}{\lambda_u} \right) \right) \right] \\ &= u \left[1 - \frac{1}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \right] c - \frac{cK^2}{4\gamma^2} \cos 2\omega_u \end{aligned} \quad (2.42)$$

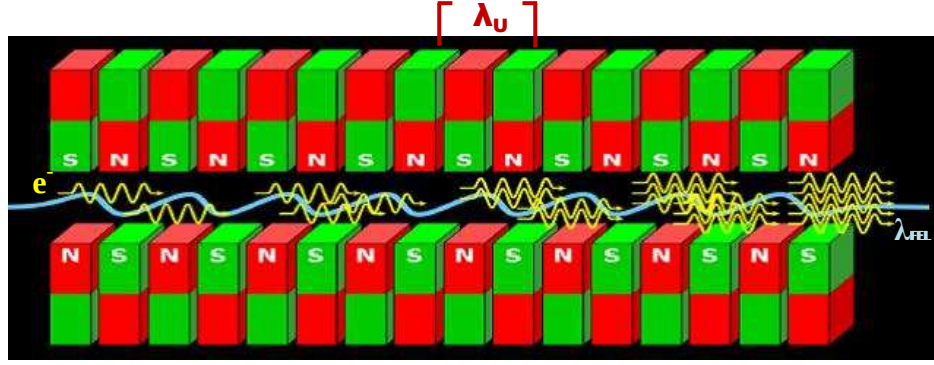
$$u(z) = \left[1 - \frac{1}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \right] c = \bar{\beta} c \quad (2.43)$$

Parçacık yörüngesi aşağıdaki denklemlerle açıklanabilmektedir ve önceden de gösterildiği gibi,

$$x(t) = \frac{K}{\gamma k_u} \sin \omega_u t \quad (2.44)$$

$$z(t) = \bar{u}_z t - \frac{K^2}{8\gamma^2 k_u} \sin(2\omega_u t) \quad (2.45)$$

2.3.2.3 Radyasyon yayını



Şekil 2.3 Undulator içerisinde radyasyon yayını (Clarke 2004)

Undulator içerisinde elde edilen elektromanyetik ışının yayını şekil 2.3'te gibidir. Elektronun bir tam periyodu tamamlayabilmesi için geçen zaman $\lambda_u / c\beta_z$ ve bu geçen zaman boyunca 1. Dalga cephesi (c hızında hareket ettiği düşünülürse) λ_u / β_z uzaklığına hareket eder. Dalga cephesinin θ açısıyla yayıldığı farz edilirse, iki dalga cephesi arası d uzaklığı belirlenebilmektedir.

$$d = \frac{\lambda_u}{\beta_z} - \lambda_u \cos \theta \quad (2.46)$$

Ayrıca bu uzaklık, yapıcı girişim için bütün dalga boylarına eşit olmalıdır.

$$n\lambda = \frac{\lambda_u}{\beta_z} - \lambda_u \cos \theta \quad (2.47)$$

Önceden bulunan β_z değeri yerine koyulduğu zaman 2.48 denklemi elde edilebilir.

$$n\lambda = \frac{\lambda_u}{\left(1 - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{K^2}{4\beta\gamma^2}\right)} - \lambda_u \cos \theta \quad (2.48)$$

$(1-x)^{-1} \sim 1+x$ yaklaşımını kullanarak buradan 2.49 ve 2.50 denklemlerine ulaşılabilir.

$$n\lambda \sim \lambda_u \left(1 + \frac{1}{2\gamma^2} + \frac{K^2}{4\beta\gamma^2}\right) - \lambda_u \cos \theta \quad (2.49)$$

$$n\lambda \sim \lambda_u \left(1 + \frac{1}{2\gamma^2} + \frac{K^2}{4\beta\gamma^2} - \cos \theta \right) = \lambda_u (1 - \cos \theta) + \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} + \frac{\lambda_u K^2}{4\beta\gamma^2} \quad (2.50)$$

Denklem 2.50’de $1 - \cos \theta = 2\sin^2(\theta/2)$ ’ ye eşittir ve çok küçük açı değerleri için $\sin \theta \sim \theta$ kullanarak,

$$n\lambda \sim \frac{\lambda_u \theta^2}{2} + \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} + \frac{\lambda_u K^2}{4\beta\gamma^2} \sim \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \theta^2 \gamma^2 \right) \quad (2.51)$$

Son olarak literatürde sık rastlanan undulator denklemi elde edilir. Bu denklemdeki n değeri undulator harmonik sayısını vermektedir (Özkorucuklu 2010).

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \theta^2 \gamma^2 \right) \quad (2.52)$$

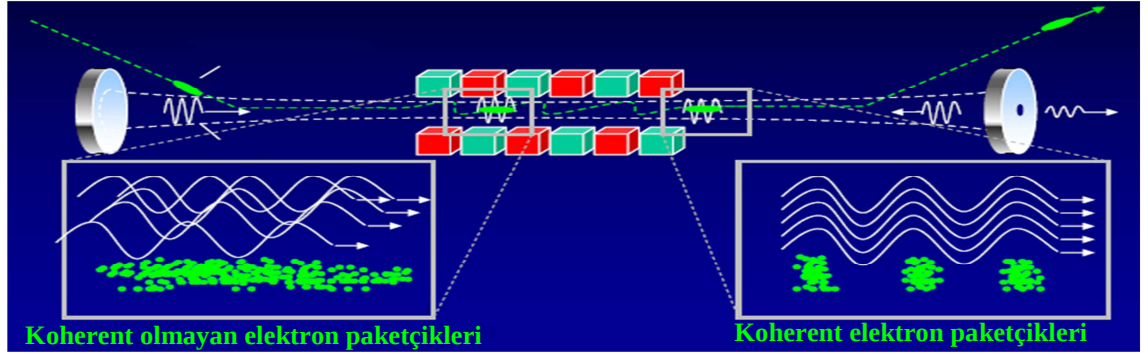
2.2.3 SEL çeşitleri

Osilatör SEL: Salındıracı ışınımının iki yana konulmuş aynalarla bir optik kavite içerisinde güçlendirilmesi ile Osilatör SEL demeti elde edilir.

SASE SEL: Kendiliğinden genlik artımlı (SASE- Self Amplified Simltaneous Emission), Serbest Elektron Lazeri (SEL) rölativistik bir elektron demetinin salındıracı (undulator) magnetten geçirilmesi ile elde edilmektedir. Elektron demetinin salındıracı içerisinden bir kez geçirilirken optimizasyonu, ışınım genlik olarak doyuma ulaşacak şekilde yapılır. Şiddetin artmasıyla güçlü emisyon veren paketler tek geçişte elde edilmiş olur (Altarelli vd. 2007).

Yükselteç SEL: Normal lazer ışınımının salındıracı ışınımı ile güçlendirilmesinden Yükselteç SEL elde edilir.

2.3 Osilatör SEL' in Çalışma Prensibi



Şekil 2.4 Osilatör SEL (Thompson 2010)

Elektronlar, undulatör magnet içerisinde ivmeli hareketinden dolayı elektromanyetik ışın salarlar. Optik kavite içerisinde lazer dalgası iki küresel ayna arasında pek çok kez yansıtılır ve bu şekilde lazer dalgası ile elektron demeti arasında enerji alışverişi gerçekleşir. Bu enerji alışverişi sistemin kazanç mekanizmasını oluşturur.

Undulatörler arası açıklık parametresi (g) ve undulatör periyodu (λ_u) cinsinden, undulatörün manyetik alan değeri hesaplanabilir (Buradaki katsayılar magnet yapısından kaynaklanmaktadır).

$$B_u[T] = 2,34 \exp\left(-3.24 \frac{g}{\lambda_u}\right) \quad (2.53)$$

Elektronun salındırıcı magnet alan içerisindeki her salınımına, ışınımın dalgaboyunun tamsayı (harmonik) katının eşit olması gerekmektedir.

$$\lambda_{\text{lazer}} = \frac{\lambda_u}{2\gamma_e^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma_e^2 \theta^2\right) \quad (2.54)$$

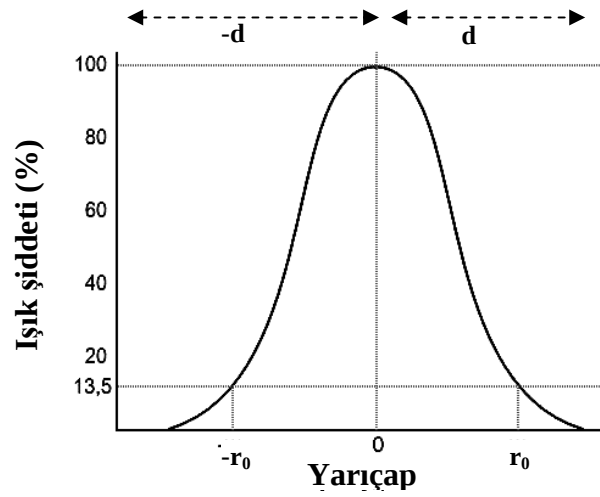
Koherent elektromanyetik ışınma yüksek enerjili elektronlar kullanılarak elde edilebilir. K salındırıcı magnet parametresi koherentlik şartını sağlayacak şekilde seçilir (Benson 1989).

$$K = \frac{eB_u\lambda_u}{2\pi m_e c} = 0.934 B_u[T]\lambda_u[\text{cm}] \quad (2.55)$$

Elektron demeti, salındırıcı magnetten ilk geçişinde, koherentlik şartı sağlandığı için salındırıcı magnet ışıması yayınlar. Bu ışımanın yoğunluğu aynalar arasında yansıtılarak artırılır. Aynalardan biri ya da ikisi de geçirgen yapılarak ya da ek saptırıcı ayna kullanılarak bu ışımanın bir kısmının dışarı çıkmasına izin verilir (Benson 1989).

2.4 Gaussiyen Demet Optiği

Birçok lazer uygulamalarında mercekler, aynalar veya diğer optik elemanlar kullanılarak optik demetin şeklini değiştirmek, odaklama yapmak, yönlendirmek mümkün olabilir. Lazer demetinin yönlendirilmesi genelde optik demetin TEM_{00} modunda ideal Gaussiyen yoğunluk profiline sahip olduğu düşünülerek, bir yaklaşım getirilir.



Şekil 2.5 TEM_{00} modu

Optik iletimini en iyi şekilde yapabilmek ve bu iletim için kullanılacak en iyi malzemeyi seçebilmek için Gaussiyen demet optiğinin genel prensiplerini anlamak çok önemlidir. Maalesef, gerçek hayattaki lazerlerden tam anlamıyla Gaussiyen demet elde etmek mümkün olmaz. Bu nedenle ideal Gaussiyen demet profil yoğunluğuna sahip olduğu düşünülerek ona göre hesaplama yapılır.

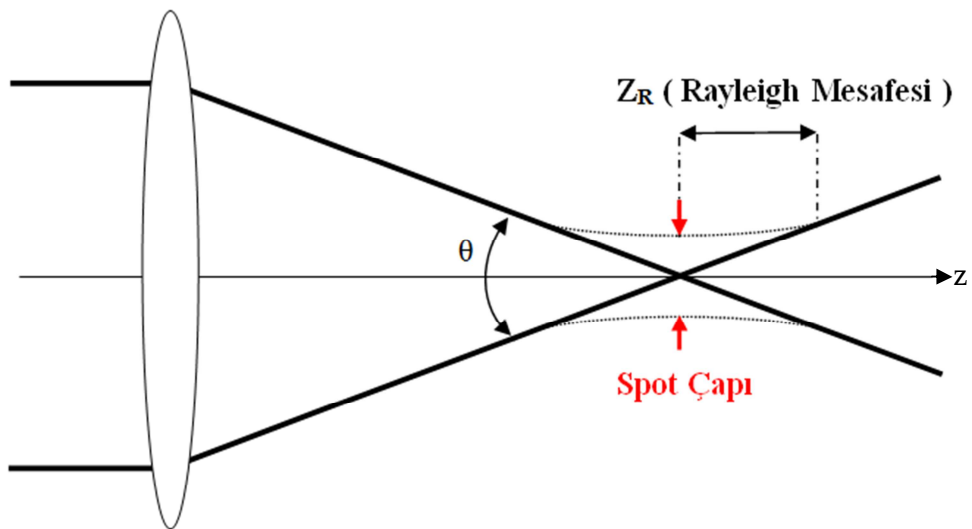
2.4.1 Demet beli çapı ve demet ıraksaması

TEM₀₀ veya temel moddaki bir lazerden elde edilen demet eksen üzerinde radyal olarak değişen enine Gaussiyen parlaklık profiline ve demet beli bölgesinde düzlem dalga cephesine sahiptir. Radyal olarak değişen parlaklık değeri (Denklem 2.56) ve demet çapına göre değişen parlaklık değeri (Denklem 2.57) aşağıdaki gibidir (Fisher 2008).

$$I_{(r)} = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (2.56)$$

$$I_{(d)} = I_0 \exp\left(-2 \frac{d^2}{d_0^2}\right) \quad (2.57)$$

Denklemlerde parlaklığın I_0 ($1/e^2$) olduğu yerde, I_0 demetin eksensel parlaklığını, r yarıçapı, d ise çap değerini göstermektedir. Lazer demeti yönlendirme karakteristiklerini belirleyebilmek için r_0 değeri, demetin radyal boyutunun tarifi olarak kabul edilebilir. Optik sistem üzerinde bulunan yarıklar ya da optik malzemeler, lazer demetinin ıraksama ve yakınsamasına neden olur. Lazer demeti yakınsadığı zaman demetin en çok daraldığı noktaya ışın demet beli adı verilir. Bu noktadan θ açısı ile ıraksar ve aynı açıyla yakınsar.



Şekil 2.6 z eksenı boyunca demetin görünümü

Demet belinin oluşturduğu bölgede dalga cephesi düzdür ve demetin iki tarafında ani bir şekilde eğrilme meydana gelir. Gaussiyen demetin iletimi açısından başlangıç demet belinin çapının hesaplanması gerekmektedir.

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi \tan(\theta)} \quad (2.58)$$

Dalgaboyu λ ve ıraksama θ (radyan biriminde) dikkate alınarak demet belinin yukarıdaki şekilde hesaplanabilir. Burada bahsedilen ω_0 değeri $z=0$ noktasındaki başlangıç demet belinin genişliğini ifade etmektedir. Herhangi bir z uzaklığında oluşan yarıçap değeri

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2} \quad (2.59)$$

formülünden bulunabilmektedir. Dalga cephesinin yarıçapı demet belinin olduğu noktada sonsuzdur. Eğer dalga cephesi herhangi bir sonlu değer olan z uzaklığında düşünülürse dalgaboyu eğrilik yarıçapı değerini z cinsinden yazmak mümkün olabilmektedir.

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (2.60)$$

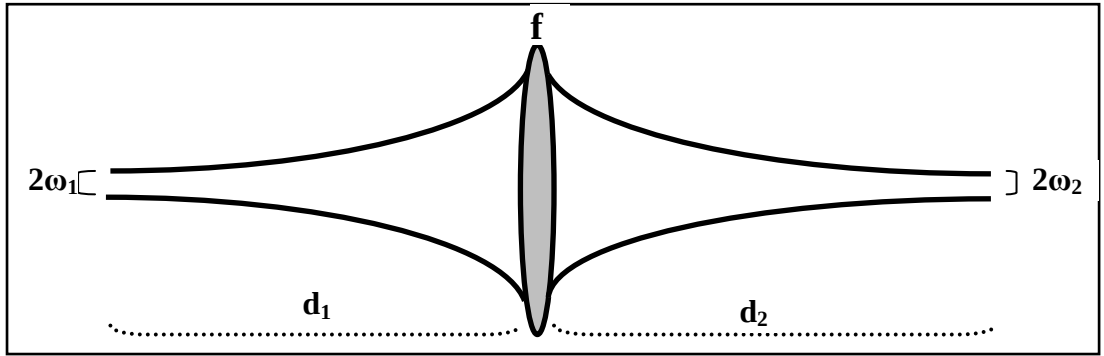
Demet çapının $\sqrt{2} d_0$ kadar genişlediği yer olan Rayleigh uzunluğunda dalga cephesi yarıçapı en küçük değerini alır. Rayleigh uzunluğu çoğu zaman odaklama sayısı derinliği olarak adlandırılır.

$$z_R = \frac{\omega_0}{\tan(\theta)} = \frac{\lambda}{\pi \tan^2(\theta)} \quad (2.61)$$

Lazer radyasyonunun dalga boyu, demet belinin yarıçapı, ıraksama ve Rayleigh uzunluğundan Gaussian demeti tam olarak tanımlamak mümkün olabilmektedir (Smith 2000).

z koordinatı üzerinde demet belinin oluştuğu yer baz alınrsa, sol taraftan olan uzaklık negatif, sağ taraftan olan uzaklık pozitif alınır. şekil 2.6'daki parametreler dikkate alınarak 2.60 ve 2.61 denklemleri birleştirilerek 2.62 denklemi elde edilir.

$$z = \frac{R(z)}{1 + \left(\frac{\lambda r}{\pi \omega^2}\right)^2} \quad (2.62)$$



Şekil 2.7 Ayna öncesi ve sonrasında oluşan demet belleri ve mesafeleri

Odak uzaklığı f olan bir mercek boyuncasıyla ilerleyen Gaussiyen demetin iletimini incelendiğinde Şekil 2.7'de gösterildiği gibi d1'de yerleşik bulunan $\omega_{1,0}$ minimum demet çapı ve d2'de minimum demet çapı elde edilir. Lens boyunca ince lens yaklaşımında demet çapı eşit kaldığı için yukarıda bahsedilen denklemlerden yola çıkılarak aşağıdaki eşitliklere ulaşılabilmektedir.

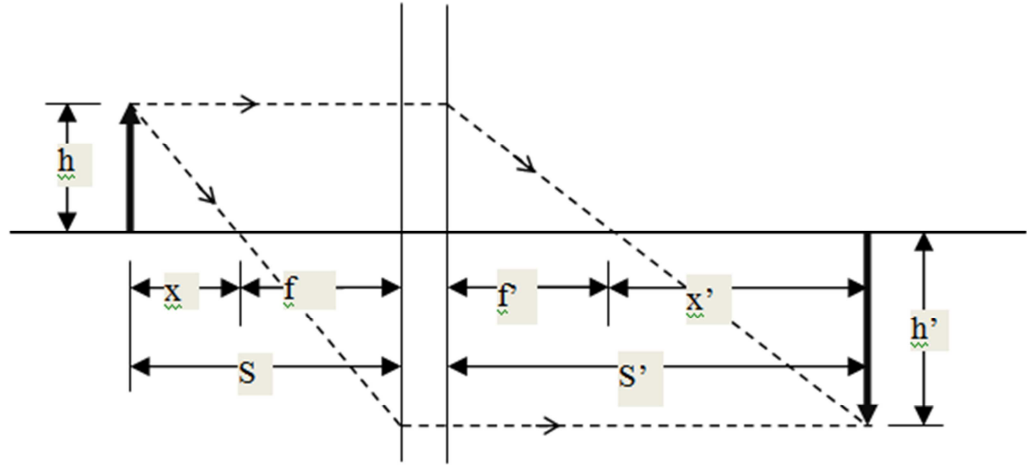
$$\omega_{1(z)} = \omega_{1,0} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d_1}{\pi \omega_{1,0}^2}\right)^2} \quad (2.63)$$

$$\omega_{2(z)} = \omega_{2,0} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d_2}{\pi \omega_{2,0}^2}\right)^2} \quad (2.64)$$

Lens üzerinde sabit bir demet çapı olarak $\omega_{1(z)} = \omega_{2(z)}$ yazmak mümkündür.

$$\omega_{1,0} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d_1}{\pi \omega_{1,0}^2} \right)^2} = \omega_{2,0} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d_2}{\pi \omega_{2,0}^2} \right)^2} \quad (2.65)$$

2.4.2 Bir optik sistemin büyütme oranı



Şekil 2.8 Görüntünün büyüklüğü ve konumu

Görüntü Konumu: Şekil 2.8’de görüldüğü gibi belirli büyüklükler belirli harflerle adlandırılacak olursa, h ve h' nesne ve görüntünün büyüklüğünü, f ve f' odak uzaklıklarının, s ve s' nesne ve görüntünün düzleme olan uzaklığını, x ve x' ise odak uzaklığından görüntü ve nesneye olan uzaklığı göstermektedir. Burada üslü ifadelerin görüntüyle, üssüz ifadelerin ise nesne ile ilgili oldukları açıktır. Şekle göre hareket edilirse h , f , f' , x' , s' ‘in pozitif, x , s , h' değerlerinin de negatif olduğu görülmektedir (Malacara 1994).

Eğer üçgenlerin benzerlik özelliği kullanılırsa, aşağıdaki denklemler yazılabilmektedir. Merkezde bulunan optik bileşenin sol tarafında üçgenlerin benzerliği özelliği kullanılarak 2.66 denkleminde ulaşılır.

$$\frac{h}{-h'} = \frac{-x}{f} \quad (2.66)$$

Sağ tarafı dikkate alındığında ise,

$$\frac{h}{-h'} = \frac{f'}{x} \quad (2.67)$$

eşitliği elde edilir. Bu denklemlerin sağ tarafları birbirine eşitlenerek,

$$\frac{f'}{x'} = \frac{-x}{f} \rightarrow f f' = -x \cdot x' \quad (2.68)$$

denkleminin elde edildiği görülebilir. Eğer bu optik sistemin hava ortamında olduğu düşünülürse f ve f' birbirine eşit olur ve Newton denkleminde ulaşılır.

$$x' = \frac{-f^2}{x} \quad (2.69)$$

Eğer odak uzaklıkları biliniyorsa, bu formül nesne ve görüntü uzaklıklarını hesaplamayı kolaylaştırır. Denklemden $x = s + f$ ve $x' = s' + f$ eşitlikleri yerine koyulduğu zaman, görüntü pozisyonuyla ilgili Gaussian formunda yeni bir denklem elde edilebilmektedir.

$$f^2 = -x \cdot x' = -(s + f)(s' - f) \quad (2.70)$$

$$f^2 = -s \cdot s' + sf - s'f + f^2 \quad (2.71)$$

$$s \cdot s' + s'f = sf \quad (2.72)$$

Her iki tarafta $s \cdot s'f$ ile bölünerek odak uzaklığının pozisyonlara bağlı formülüne ulaşılmaktadır.

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{s} \quad (2.73)$$

$$s' = \frac{sf}{(s + f)} \quad \text{veya} \quad f = \frac{s s'}{(s - s')} \quad (2.74)$$

Görüntü boyutu: Bir optik sistemin enine büyütme oranı (M) hesaplanmak istenirse nesne boyutunun imaj boyutuna oranına bakılır. Yukarıdaki denklemler de dikkate

alınarak büyütme oranı, odak uzaklığı f veya nesne ve görüntünün odak uzaklığına olan uzaklıkları hesaba katarak hesaplanabilmektedir.

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{f}{x} = \frac{-x'}{f} \quad (2.75)$$

$x = s + f$ 'i eşitlikte yerine konularak

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{f}{s + f} = \frac{-(s' + f)}{f} \quad (2.76)$$

büyütme oranının odak uzaklığına bağlı denklemini elde edilir.

$$\frac{1}{s'} = \frac{f + s}{fs} \rightarrow \frac{s}{s'} = \frac{f + s}{f} \quad (2.77)$$

Elde edilen bu eşitlik denklem 2.78'de yerine konularak uzaklıklara ve büyüklere bağlı büyütme oranı eşitliği elde edilir.

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{s'}{s} \quad (2.78)$$

Bu şekilde nesne ve görüntünün düzleme olan uzaklıklarına göre sistemin büyütme oranının hesaplanabileceği görülmüş oldu.

$$M = \frac{f}{s + f} = \frac{-(s' + f)}{f} \quad (2.79)$$

$$Ms = f(1 - M) \rightarrow s = f\left(\frac{1}{M} - 1\right) \quad (2.80)$$

$$Ms = s' \rightarrow s' = f(1 - M) \quad (2.81)$$

$$Mf = -(s' + f) \rightarrow s' = f(1 - M) \quad (2.82)$$

$$Ms = f (1 - M) \rightarrow s = f \left(\frac{1}{M} - 1 \right) \quad (2.83)$$

Sistemin optik eksen boyunca büyütme oranı M' de asal eksen boyunca büyümeyi göstermektedir. Eğer s_1' ve s_2'' de imajın köşelerini gösterdiği düşünölsün.

$$M' = \frac{s_2' - s_1'}{s_2 - s_1} \quad (2.84)$$

Yukarıdaki eşitlikte, Denklem 2.74 kullanıldığında, $s_2' \rightarrow s$, $s_1' \rightarrow s'$ dönüşümü ile

$$s_2' - s_1' = \frac{s_2' s_1'}{f} \quad (2.85)$$

Sonucu elde edilir.

$s_2 \rightarrow s_2'$, $s_1 \rightarrow s'$ olursa;

$$\frac{1}{s_2 - s_1} = \frac{f}{s_2 s_1} \quad (2.86)$$

Sonuç olarak büyütme oranı şu şekilde yazmak mümkün olur.

$$M' = \frac{s_2' s_1'}{f} \frac{f}{s_2 s_1} = \frac{s_2' s_1'}{s_2 s_1} \quad (2.87)$$

$$M' = \frac{s_1' s_2'}{s_1 s_2} = M_1 \cdot M_2 \quad (2.88)$$

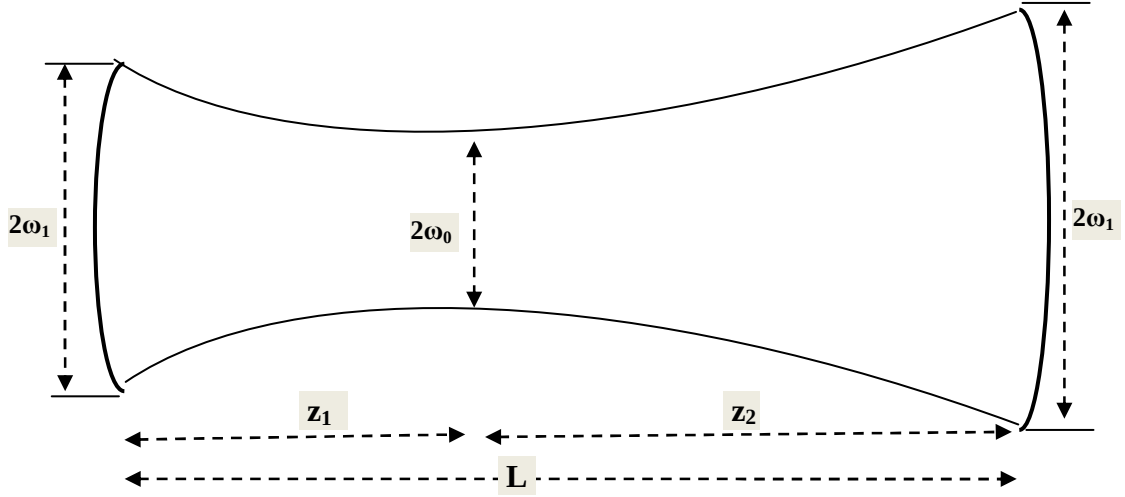
$s_2 - s_1$ ve $s_2' - s_1'$ çok küçük değerler için M_1, M_2 yakınsar.

Bu formöl gösteriyor ki, boyuna büyüme oranı her zaman pozitifdir. Eğer optik sistem hava ortamında değölse, n ortamın indisi olarak kabul edilir

$$\frac{f}{n} = \frac{f'}{n'} \quad (2.89)$$

$$\frac{n'}{s'} = \frac{n}{s} + \frac{n}{f} = \frac{n}{s} + \frac{n'}{f'} \quad (2.90)$$

2.4.3 Gaussiyen demetin yönlendirilmesi ve odaklanması

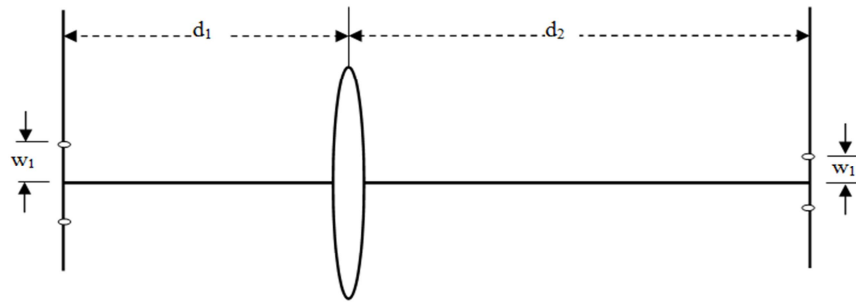


Şekil 2.9 Aynalardan demet beline olan uzaklıklar

İnce lens yaklaşımında, dalga cephesinin yarıçap değişimi ile odak uzaklığının tersi birbiri ile orantılıdır. Dalga cephesi formülünde, z yerine d_1 ve d_2 uzaklıkları (Şekil 2.9) konularak odak uzaklığına bağlı yeni bir denklem elde edilebilmektedir (Smith 2000).

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f} \quad (2.91)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_1 \left[1 + \left(\frac{\pi w_{1,0}^2}{\lambda d_1} \right)^2 \right]} + \frac{1}{d_2 \left[1 + \left(\frac{\pi w_{2,0}^2}{\lambda d_2} \right)^2 \right]} \quad (2.92)$$



Şekil 2.10 İki demet belı arasındaki uzaklıklar

2.92 denkleminde eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terim, demet belinin sol tarafı (d_2) dikkate alarak hesaplandığı için pozitif olur (Milonni 2010).

$$z_2 = z_1 + z_R \quad (2.93)$$

Bu denklemde z_1 birinci yüzeydeki demet parametresi, z_2 ikinci yüzeydeki demet parametresini göstermektedir. Demet belı üzerinde sanal demet parametresi 2.94 denkleminde tanımlanmıştır.

$$q_0 = j \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} + z_R \quad (2.94)$$

ve

$$\left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2 = \left(\pi \frac{\omega_0^2}{\lambda} \right) + z^2 \rightarrow \omega^2 - \omega_0^2 = \frac{\lambda z_R^2}{\pi} \quad (2.95)$$

Gerçek demet parametresi $R(z)$, kompleks parametre q ve demet belı genişliği dikkate alınarak yazılabilir (Milonni 2010).

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} + j \frac{\lambda}{\pi \omega^2} \quad (2.96)$$

Denklem daha ayrıntılı yazılmak istenirse,

$$\frac{\lambda}{\pi \omega^2} + i \frac{1}{r} = \frac{1}{\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} + iz} \quad (2.97)$$

ve

$$z_2 = \frac{\left(1 - \frac{d_2}{f}\right) z_1 + \left(d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f}\right)}{-\left(\frac{z_1}{f}\right) + \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)} \quad (2.98)$$

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi lensten d_1 ve d_2 uzaklığında iki demet belisi oluşuyor olsun. Demet belisi üzerinde karmaşık sayılı demet parametreleri tamamıyla sanaldır (Milonni 2010).

$$z_1 = j \frac{\pi \omega_1^2}{\lambda} \quad z_2 = j \frac{\pi \omega_2^2}{\lambda} \quad (2.99)$$

Aşağıdaki demet belisi genişliklerine ve uzaklıklarına bağlı formüller birleştirilerek demet çapı denklemlerine ulaşılır.

$$\omega_{1,0}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d_1}{\pi \omega_{1,0}^2} \right)^2} = \omega_{2,0}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d_2}{\pi \omega_{2,0}^2} \right)^2} \quad (2.100)$$

$$\frac{1}{d_1 \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_1^2}{\lambda d_1} \right)^2 \right]} + \frac{1}{d_2 \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_2^2}{\lambda d_2} \right)^2 \right]} = \frac{1}{f} \quad (2.101)$$

Sonuçta elde edilen formül karışık optik sistemlerin hesaplanmasında fazlasıyla kolaylık sağlamaktadır.

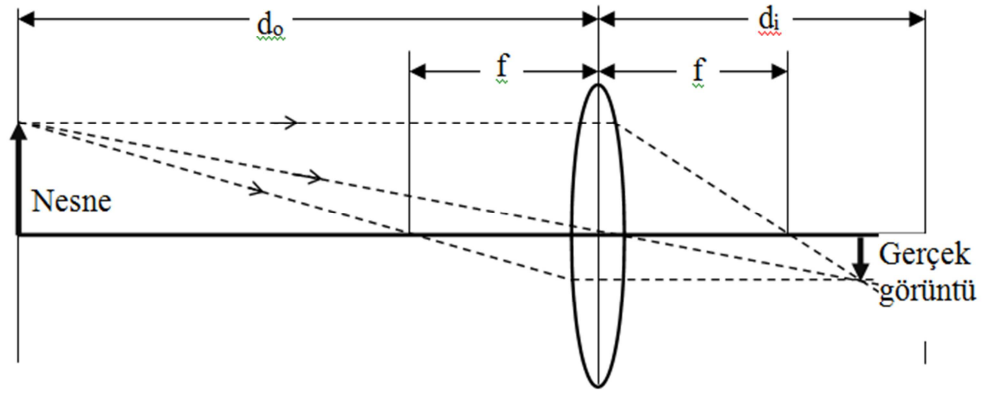
$$\frac{d_2}{f} - 1 = \frac{\frac{d_1}{f} - 1}{\left(\frac{d_1}{f} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\pi \omega_{1,0}^2}{\lambda f} \right)^2} \quad (2.102)$$

Bu denklemlerle ışının odaklandıktan sonraki oluşan demet belinin yerini belirlemek ya da tam tersi şekilde mercekten sonra demetin konumu bilinen bir sistemdeki merceğin odak uzaklığını bulmak oldukça kolaylaşır.

Optik demet transfer hattı tasarımı için başlangıç değerleri hesaplandıktan sonra, ışığın transferi odaklayıcı aynalar veya lensler yardımı ile yapılmaktadır. Bu sayede ışın odaklanarak, demet dağılmadan istenilen noktaya iletimi sağlanmaktadır. Odaklayıcı aynaların odak uzaklıklarının hesaplanabilmesi ve uygun verilerin seçilebilmesi için sistemin büyütme oranının hesaplanması gerekmektedir.

$$M = -\frac{d_i}{d_o} \quad (2.103)$$

Bu denklem ile aynaların görüntüye ve cisme olan uzaklıklarından birini hesaplamak mümkün olabilir. Aynaların uzaklık değerlerinden odak uzaklıkları hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.13 Mercek odak uzaklığı

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \quad (2.104)$$

Aynı şekilde ikinci bir ayna daha yerleştirilirse, ikinci aynanın odak uzaklığı da bulunabilir.

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{L - d_{i1}} + \frac{1}{d_{i2}} \quad (2.105)$$

Bu sayede aynaların odak uzaklıkları bulunduktan sonra, odak uzaklıklarına göre oluşacak demet beli değerleri de bulunabilmektedir. Optik demet hattı boyunca belirli dalga boyuna “ ω_0 ” başlangıç demet bel genişliğine sahip bir lazer demetinin herhangi

bir “d” uzaklığındaki demet çapı:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_0}\right)^2 d^2} \quad (2.106)$$

denklemini ile hesaplanır.

Hat boyunca ilerleyen demet için ayna ya da mercekten sonra oluşan demet bel çapını veya pozisyonu da aşağıdaki formülden hesaplanabilmektedir (Alda, 2003).

$$\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{1}{\left(\frac{d_0}{f} - 1\right)^2 + \left(\frac{\pi \omega_1^2}{\pi f}\right)^2} \quad (2.107)$$

Bu denklemde “ ω_1 ” değeri yerine başlangıç demet bel değeri koyularak, aynaların odaklama oranlarını içeren bu formül ile ikinci demet bel genişliği bulunabilmektedir. Bu demet bel genişliğinin hangi bölgede oluştuğunu hesaplamak için ise, 2.102 denkleminde d_2 çekilerek, ikinci demet belinin birinci ayna ya da merceğe olan uzaklığı hesaplanabilmektedir.

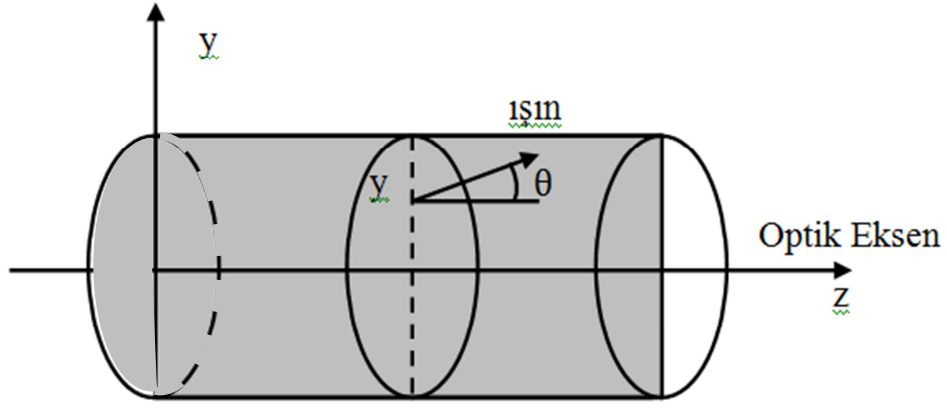
$$\frac{d_2}{f} - 1 = \frac{\frac{d_0}{f} - 1}{\left(\frac{d_0}{f} - 1\right)^2 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda f}\right)^2} \quad (2.108)$$

Bu denklemleri sıralı bir şekilde diğer aynalara da uygulayarak, aynaların üzerindeki demet çaplarını ve oluşacak demet bel kalınlıklarını analiz etmek mümkün olabilmektedir. Bu şekilde demet hattında ışığın hedeflenen noktaya en az kayıpla iletilmesi sağlanır.

2.6 Işın Matrisleri

Matris tekniği paraksial bir ışının izini sürmenin en iyi yoludur. Işın öncelikle optik eksene olan açısı ve optik eksen üzerindeki pozisyonuyla tanımlanır. Bu değişkenler sistem içindeki ışının hareket ettiği yol boyunca değişirler. Paraksial yaklaşımda, optik

sistemin giriş ve çıkış düzlemlerindeki açı ve pozisyon değerleri iki lineer cebirsel işlemle alakalıdır. Sonuç olarak, optik sistemi 2x2 matrisi yani ışın transfer matrisiyle tam olarak tanımlayabilmek mümkündür.



Şekil 2.14 z ekseninde yerleştirilmiş mercekler ve ışın iletimi

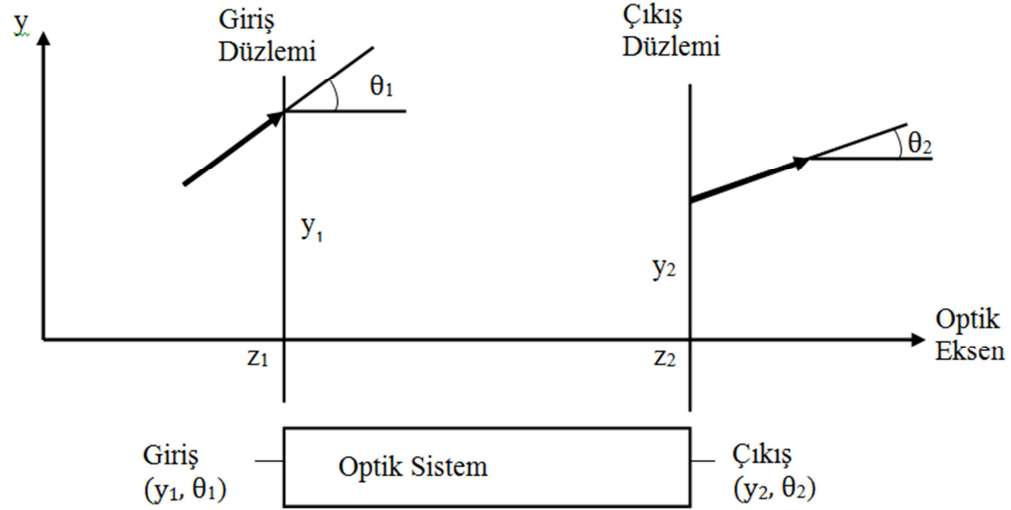
Transfer matrislerini kullanmanın kolaylığı, aslında ardı ardına yerleştirilmiş optik bileşenlerin ya da sistemlerin ışın transfer matrisinin, ferdi optik sistemlerin ışın transfer matrislerinin çarpımına eşit olmasıdır. Bunların yanında matris optiği, paraksiyel ($\sin\theta \sim \theta$) yaklaşımdaki karmaşık optik sistemlerin açıklanması için biçimsel bir düzenek sağlar.

2.6.1 Işın transfer matrisleri

Aynı eksen üzerinde bütün yüzeyi yansıma ya da kırınım yapabilen dairesel simetrik optik malzemelerden oluşmuş bir sistem düşünölsün. Optik eksen, z eksenı boyunca uzanıyor olsun ve alınacak noktalar ışının hareket ettiğı genel doğrultuda olsun. Düzlem üzerinde ışının y ve z optik eksenleri olduğı farz edilir. Işının gidiş yolunu takip etmek için sistem boyuna ilerliyormuş gibi, yani farklı bir eksensel yolda yatay bir düzlemde üst üste geliyormuş gibi işlemi ilerletilsin. z ekseninde yatay olarak üst üste gelen ışın, açı değeri θ ve üst üste gelme noktası olan y koordinatı ile açıklanabilmektedir.

Optik sistem, iki enine düzlem olan z_1 ve z_2 arasında yerleştirilmiş olan optik bileşenler serisinden oluşuyor olsun (burada z_1 giriş, z_2 çıkış düzlemleri olsun). Sistem tam olarak

giren ışının pozisyonu y_1 ve yönelimi θ_1 ile tanımlanabilmektedir. Yönlendirilen ışın çıkış pozisyonu y_2 ve yönelimi θ_2 ile yeni şeklini almaktadır.



Şekil 2.15 Sistem içerisindeki giriş ve çıkış açıları

Paraksiyel yaklaşım, eğer açı değerinin çok küçük değerler için $\sin\theta \sim \theta$ olduğu düşünülürse (y_1, θ_1) ve (y_2, θ_2) değerleri ilişkilendirilebilmektedir.

$$y_2 = Ay_1 + B\theta_1 \quad (2.109)$$

$$\theta_2 = Cy_1 + D\theta_1 \quad (2.110)$$

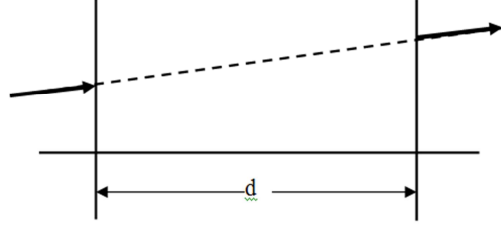
Denklemdeki A, B, C, D gerçel sayılardır. Bu durumda yukarıdaki denklemler matris formatında yazılabilmektedir.

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (2.111)$$

Herhangi bir (y_1, θ_1) değerinden (y_2, θ_2) değerlerinin belirlenmesine izin verdiği için A, B, C, D öğelerini içeren M matrisi, bir optik sistemi tam olarak tanımlayabilmektedir (Fisher 2008).

2.6.2 Optik bileşenler matrisi

2.6.2.1 Boş bir uzay boyunca yönlendirme



Şekil 2.16 Boşlukta dalga ilerlemesi

Işın boş bir uzay boyunca düz bir doğrultuda hareket ettiği için, d uzaklığı boyunca uzanan ışın $y_2 = y_1 + \theta_1 d$ ve $\theta_2 = \theta_1$ şeklinde değişir. Bu koşulda ışın transfer matrisi de uzaklığa bağlı olarak tanımlanabilir.

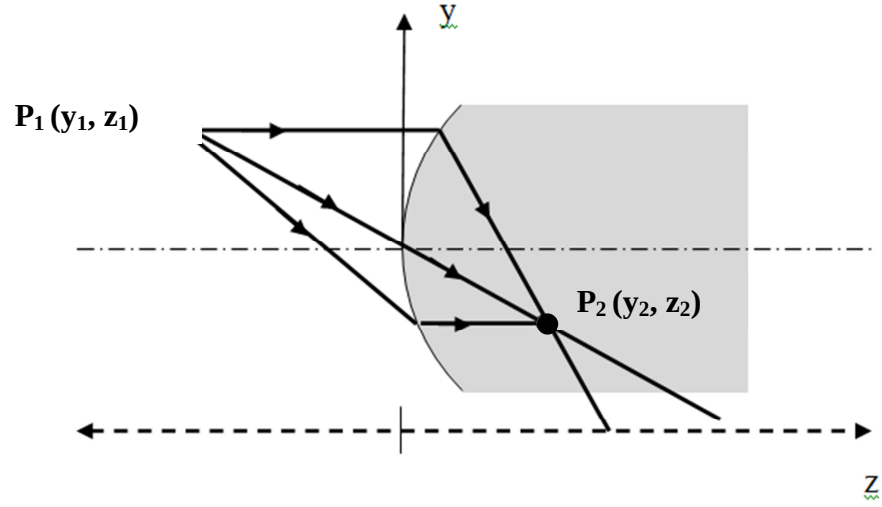
$$M = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.112)$$

2.6.2.2 Düzlem kenarda kırınım

n_1 , n_2 kırınım indisine sahip iki ortam arasındaki düzlem sınırında ışın açısı “Snell Kanunu”na göre değişmektedir. Paraksiyel yaklaşımda $n_1\theta_1 \sim n_2\theta_2$ olur. Işının pozisyonu bu durum için değişmemektedir, $y_2 = y_1$.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \quad (2.113)$$

2.6.2.3 Küresel kenarda kırınım

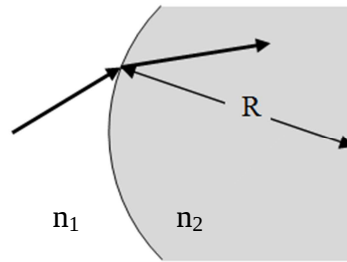


Şekil 2.17 Küresel kenarda kırınım

θ açısı ile z eksenine boyunca ilerleyen bir ışın y doğrultusunda bir sınırla karşılaşır, kırınım yapar ve yönünü değiştirir. Böylece ışın z eksenine boyunca θ_2 açısı yapar. İki ortam arasında ilerleyen ışın aşağıdaki şekilde değişim gösterir.

$$\theta_2 \approx \frac{n_1}{n_2} \theta_1 - \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} y \quad (2.114)$$

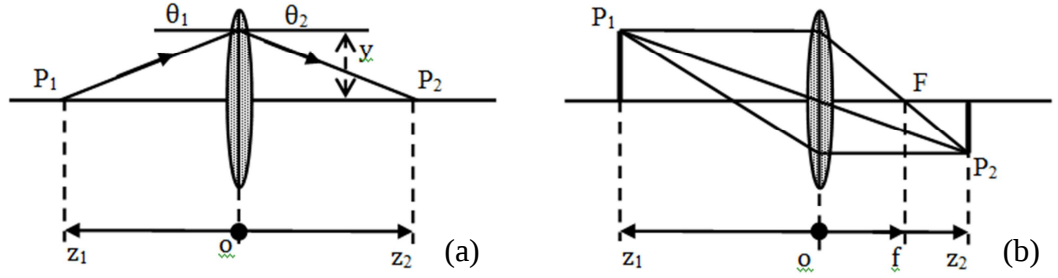
Bu durumda ışın uzunluğu değişmez, $y_1 \approx y_2$.



Şekil 2.18 İçbükey ayna için $R > 1$ Dışbükey ayna için $R < 1$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_1 - n_2}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \quad (2.115)$$

2.6.2.4 İnce mercek boyunca ışının hareketi



Şekil 2.19 a. İnce lenste ışın bükülmesi, b. İnce lenste görüntü oluşumu

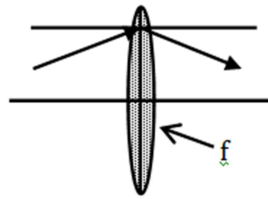
İnce mercek, odak uzaklığı “f” boyunca hareket eden paraksiyel ışın için θ_1 ve θ_2 açıları arasındaki ilişki:

$$\theta_2 = \theta_1 - \frac{y}{f} \quad (2.116)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki odak uzaklığı ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.117)$$

İnce mercekli bir sistemde uzunluk değişmemektedir, $y_1 = y_2$. Buna göre yazılacak olan ışın matrisi ise denklem 2.118’ de tanımlanmıştır.

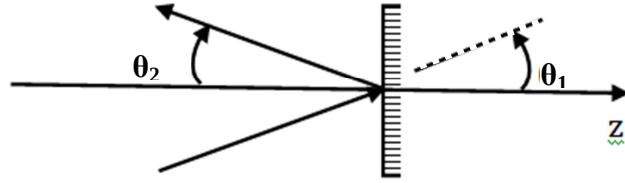


Şekil 2.20 İçbükey, $f > 0$; Dışbükey, $f < 0$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.118)$$

2.6.2.5 Düzlem aynadan yansıma

Eğer düzlem aynalı bir sisteme bakılacak olursa, düzlem aynadan yansıyan ışının hareket boyunca ışın pozisyonunun değişmediği görülür, $y_1 = y_2$. Işının hareket ettiği genel doğrultu boyunca, aynadan önceki ışın ve yansıyan ışına bakılacak olursa $\theta_1 = \theta_2$ olmaktadır.

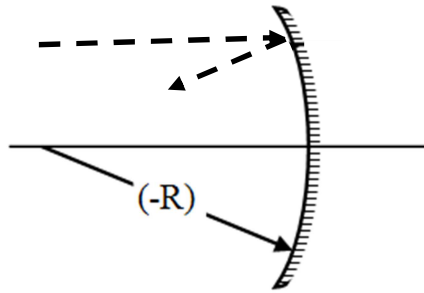


Şekil 2.21 Düzlem aynadan yansıma

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.119)$$

2.6.2.6 Küresel aynadan yansıma

Küresel aynanın odak uzaklığının $f = R/2$ olduğunu bilinmektedir. Bu durumda z eksenı boyunca hareket eden bir ışının ışın transfer matrisini yazmak da gayet kolaydır.

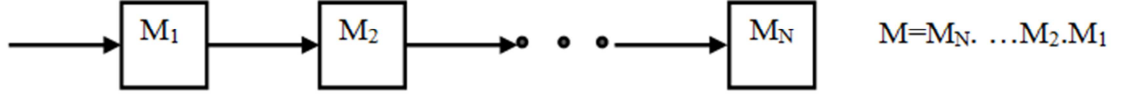


Şekil 2.22 İçbükey $R < 0$; Dışbükey $R > 0$

Aşağıdaki denkleme bakıldığında küresel aynalardan yansıma ile ince merceklerde olan kırınımın benzerliği açıkça görülmektedir.

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.120)$$

2.6.3 Sıralı optik bileşen matrisi



Şekil 2.23 Sıralı optik sistem

Işın transfer matrisleri $M_1, M_2, M_3, \dots, M_N$ olan sıralı optik sistemleri tek bir sistem olarak düşünmek mümkündür. Bu durumda genel matris formu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$M = M_N \dots M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 \quad (2.121)$$

Burada başlangıç ışınının en sona yazılması çok önemlidir, ancak bu şekilde hesaplama yöntemiyle başlangıç ışınının sütun matrisi başa gelebilir.

2.6.4 Periyodik olarak dizilmiş optik sistemler

Periyodik optik sistem olarak adlandırılan sistem, belirli birim sistem bileşenlerinin ardı ardına sıralanmasından oluşur. Bu duruma bir örnek olarak, ışığın eşit boşluklarla arka arkaya sıralanmış lens sistemindeki hareketi ya da iki paralel ayna arasında yansıtılan ışın olarak gösterilebilir.

Bu sistemi matris sistemi için yorumlanmak istenirse, sisteme giren ışının başlangıç pozisyonu y_0 ve θ_0 olsun. Çıkıştaki ışının pozisyon değeri y_m ve açısı θ_m ’yi belirlemek için ABCD matrisi “m” kere uygulanmaktadır ve bu durum için genel bir formül yazılabilmektedir.

$$\begin{pmatrix} y_m \\ \theta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^m \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad (2.122)$$

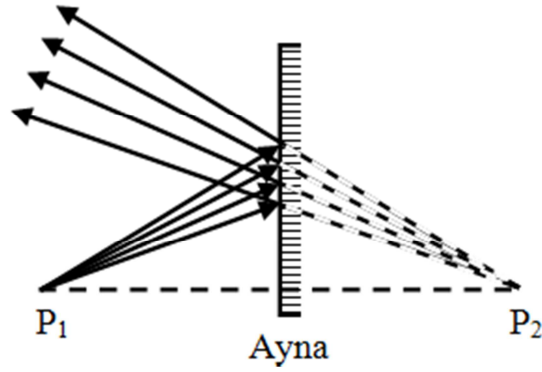
$$y_{m+1} = A y_m + B \theta_m \quad (2.123)$$

$$\theta_{m+1} = C y_m + D \theta_m \quad (2.124)$$

Mesela y_1 ve θ_1 ' i belirlemek için (y_0, θ_0) kullanılabilir. Aynı şekilde (y_1, θ_1) 'den (y_2, θ_2) de elde edebilmektedir (Malacara 1994).

2.7 Aynalar

2.7.1 Düzlem aynalar

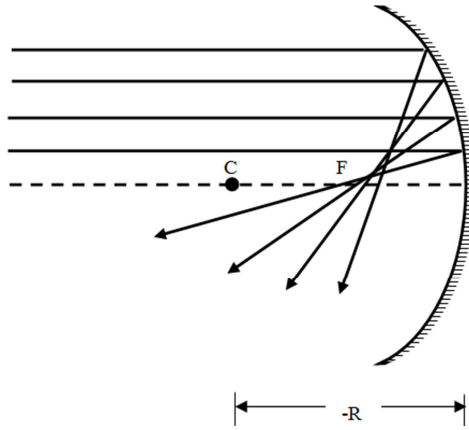


Şekil 2.24 Düzlem aynadan yansıma

Aynaya gelen ışın aynı şekilde yansır, P_2 noktasında cismin görüntüsü oluşur.

2.7.2 Küresel aynalar

Küresel aynaları üretmek, parabolik ve eliptik aynalara nazaran daha kolaydır. Fakat, bu aynalar ne parabolik aynaların odaklama özelliğine, ne de eliptik aynaların görüntüleme özelliğine sahiptirler.

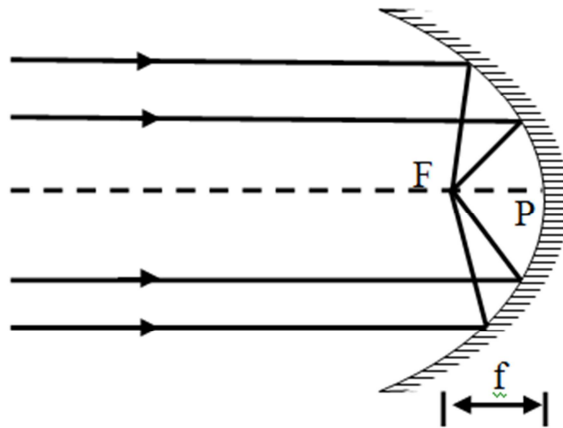


Şekil 2.25 Küresel aynadan yansıma

Şekilde görüldüğü gibi paralel ışık, eksenle farklı noktalarda buluşur. Burada ışının optik eksene olan uzaklığına bağlı olarak odaklanan ışın f noktasından kayarak aberasyonlara neden olur. Paralel ışık eksene yaklaşarak tek bir F noktasında, yani ayna merkezinden $-R/2$ uzaklıkta odaklanır. Buradaki R değeri içbükey aynalar için negatif, dışbükey aynalar için ise pozitif değer almaktadır.

2.7.3 Parabolik aynalar

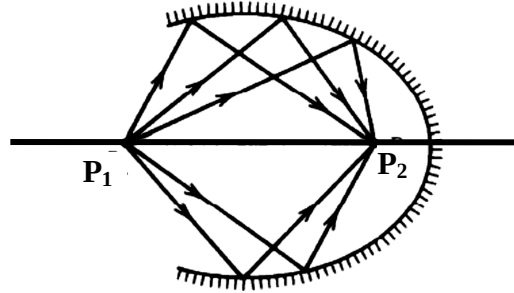
Bu tür aynaların yüzeyleri parabolik şekildedir. Bu durum gelen ışını odaklamak için oldukça kullanışlıdır. Odaklanan nokta odak, $PF = f$ uzaklığı ise odak uzaklığı olarak adlandırılır (Saleh 1991).



Şekil 2.26 Parabolik aynalardan yansıma

2.7.4 Eliptik aynalar

Bu tür aynalarda ışın, iki odak noktasından (P_1 ve P_2) yayılır. P_1 ' den P_2 ' ye olan bütün uzaklıklar birbirine eşittir, buna Hero ilkesi denmektedir (Saleh 1991).



Şekil 2.27 Eliptik aynadan yansıma

2.8 Aynaların Kaplanması

Foton demet hattı tasarımında kullanılan optik materyaller demetin kayıp olmadan taşınabilmesi ve doğru bir şekilde yönlendirilmesi için çok önemlidir. Bu optik materyaller arasında önemli bir role sahip olan aynaların kaplamaları da yansıtıcılık ve geçirgenlik özellikleri bakımından bir o kadar önemlidir. Bunun için kullanılacak kaplamalar, oluşturulan lazer demetinin dalga boyu ile uyumlu ve o dalga boyunda yansıtıcılık özelliği yüksek malzemelerden seçilmelidir.

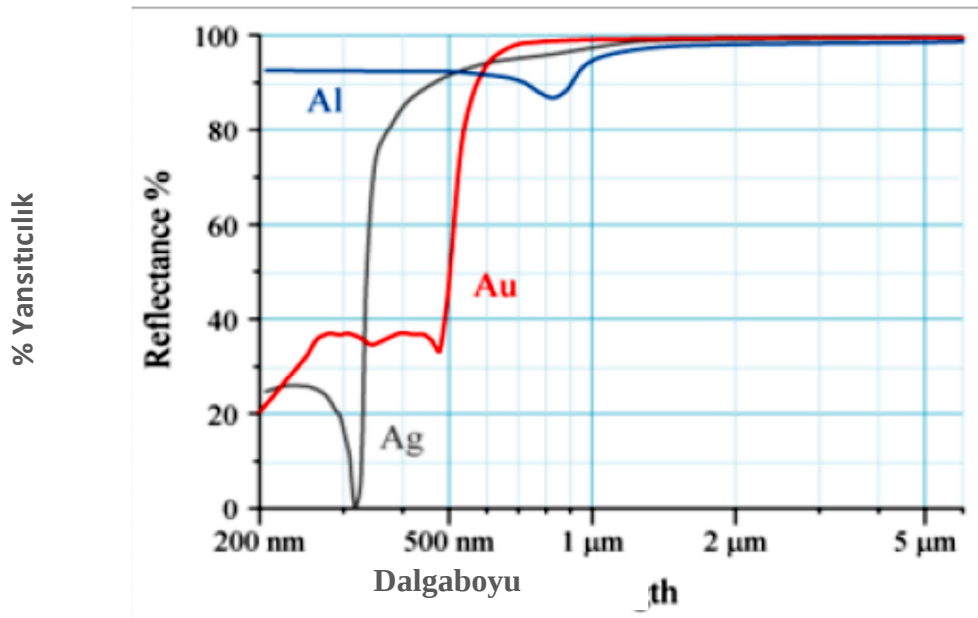
Işık, bir ortamdan diğerine geçerken bir kısmı yansır, bir kısmı ise geçer. Yansıyan ve geçen ışığın şiddetindeki oran, iki ortam arasındaki kırınım indisi değişiminin fonksiyonunu ve ara yüzeydeki ışığın başlangıç açısını verir ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, Snell yasası). Yüzeyi kaplanmamış olan cam alttaşların çoğuna gelen ışın yüzeyden %4-5 oranında yansımaya sahiptir. Ayrıca çok aynalı sistem tasarımında bu geçirgenlikteki kayıp seviyesi ışığın doğru bir şekilde iletilmesi için çok önemlidir.

Aynaların kaplamaları, çeşitli materyallerin ince film ile yüzeyde ince bir katman oluşturulmasıyla yapılmaktadır. Günümüzde yapılan çok katmanlı dielektrik kaplamalar diğer kaplamalara göre oldukça sert ve daha dayanıklı olabilmektedirler.

Optiksel kaplamaların bir çeşidi olan yansım engelleyici kaplamalar, yüzeyden gelen istenmeyen yansımaları en aza indirir. Diğer bir kaplama çeşidi olan yüksek yansıtıcı kaplamanın ise ayna üzerine düşen ışığı %99.99'dan daha fazla yansıtması mümkün olabilir (Cushing 2011).

2.8.1 Kaplama çeşitleri

En kolay optik kaplama çeşidi, ayna gümüşleme olarak bilinen süreçtir. Bu teknik, yüzeyleri ayna yapmak için cam alttaş üstüne metallerin ince kaplamasıdır. Kullanılan metal, aynanın yansım karakteristiklerini belirler. Örneğin Alüminyum en ucuz ve en çok kullanılan kaplamadır, görünür bölgede %88-%92 kadar yansım yapabilmektedir. Alüminyuma göre daha pahalı bir kaplama olan gümüşün yansıtma oranı uzak kızılötesi bölgede %95-%99 arasında değişmektedir, fakat mor ötesi bölgede yansıtma oranı %90'ın altına düşebilmektedir. En pahalı kaplama ise altındır. Bu kaplamalar kızılötesi bölgede %98-%99 yansıtıcılığa sahiptir, 55 nm' den daha düşük dalga boylarında yansım sınırlanmaktadır (Cushing 2011).



Şekil 2.28 Altın, gümüş ve alüminyum için dalga boylarına göre yansıtma oranları (Bass 1994)

Metal kaplamaların genişliği ve yoğunluğunu kontrol ederek ayna üzerindeki yansımayı düşürmek, geçirgenliği ise arttırmak yarı gümüşleme metodu ile mümkündür.

Diğer bir optiksel kaplama çeşidi ise dielektrik kaplamadır. Görünür bölgede, optiksel alttaş üzerine yerleştirilen magnezyum florür, kalsiyum florür ve bunun gibi değişik metal oksitlerin ince katmanlarından oluşmaktadır. Dielektrik kaplamalarla, yansıtma önleyici (AR) kaplama üretimiyle %0.2' den daha düşük, yüksek yansıtıcı (HG) kaplama üretimiyle ise %99.99' dan daha fazla yansıtma özelliği kazandırılabilir (Griot vd. 2013). Bu tür kaplamalar termal ısınmalara dayanıksızdır, yani ısı değişiminde ayna karakteristikleri de değişeceği için ışıktaki güç kaybı olacaktır, bu yüzden metal kaplamalara göre daha az tercih edilmektedir.

Ayrıca dielektrik ve metal kaplamaların birleştirilmesiyle, mükemmel aynalar oluşturulabilir. Bu aynalar hem yüksek yansıtmaya, hem de ısıya karşı daha az hassasiyete sahiptirler.

2.9 Kızılötesi Geçirgen Pencereler

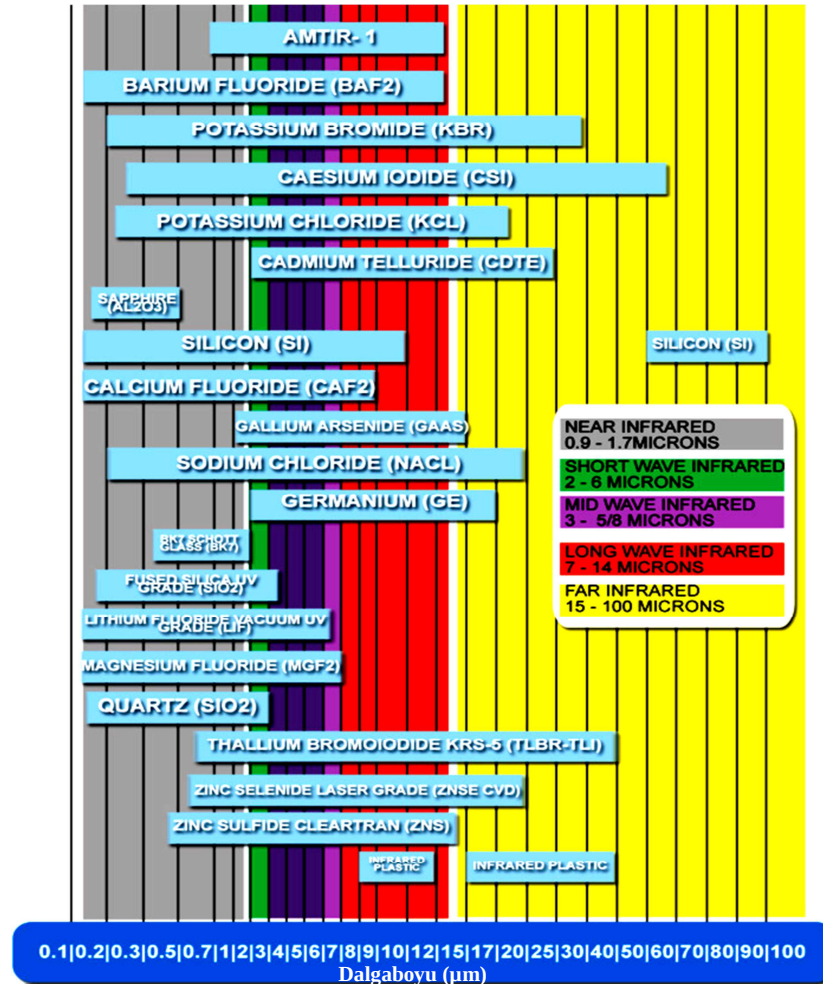
ELBE ve TARLA optik demet hatlarında kullanılacak kızılötesi geçirgen pencereler, farklı basınç ve sıcaklığa sahip iki ortamı birbirinden ayırmak ve belirli bir dalgaboyu aralığındaki ışının bu iki ortam arasındaki geçişini sağlamak için kullanılır.

Kızılötesi geçirgen pencereler, kızılötesi ışınının dışarı ortama iletimini sağlamak için tasarlanan kontrol noktasının genel bir terimidir. Uzun dalgaboylarında bazı belirtilen pencere malzemesinin geçirgen olması beklenilmektedir, bunlar daha sonra detaylı olarak anlatılacaktır. Ayrıca bu pencereler, termal kameralar için veri toplanma noktası olacaktır ve kurulacak merkezdeki ışını incelemek için kullanılacaktır.

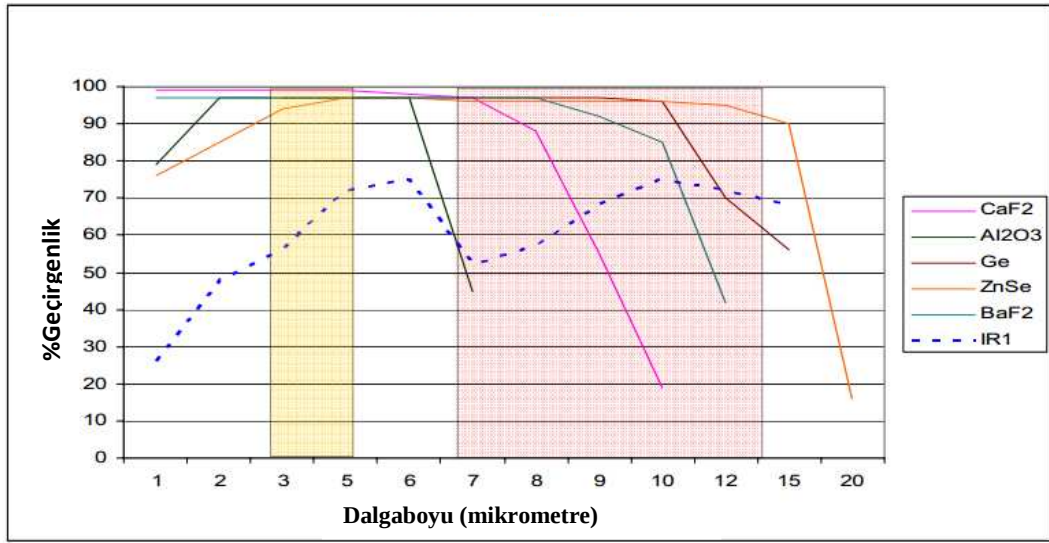
2.9.1 Kızılötesi geçirgen pencere malzemeleri

Kızılötesi geçirgen pencerelerde kullanılan birçok lens malzemesi çeşidi bulunmaktadır. Dalgaboyu, ortam ve maliyet hesabı pencerelerin seçimini etkilemektedir.

Çizelge 2.1 Kızılötesi geçirgen pencerelerin geçirgenlik aralıkları (Anonymous 2012.c)



Yukarıdaki tabloda (Çizelge 2.1) en çok tercih edilen IR optik pencerelerin hangi dalgaboyu aralığında geçirgen olduğu gösterilmiştir. Ayrıca bu pencerelerin belli dalgaboyu aralığında ne kadar geçirgen olduğu da aşağıdaki şekilden görülmektedir.



Şekil 2.29 IR pencerelerin geçirgenlik yüzdeleri (Robinson 2006)

Optik taşıyım hatlarında kullanılacak malzemelerin seçimi, deneylerde kullanılacak enerji ihtiyacı, ortam koşulları ve malzeme özellikleri dikkate alınarak yapılır. Aşağıdaki tabloda malzemeler ve özellikleri ile bilgi verilmiştir (Anonymous 1988).

Çizelge 2.2 IR Pencereler ve özellikleri

Malzeme	Dalgaboyu aralığı (µm)	Kırınım İndisi (2 mikrometrede)	Özellikler
AgBr	0.454 – 34.965	2.30	Yumuşak bir kristaldir ve suda çözünmez. Ultraviyole ışınımında kararır yapar ve aniden soğur.
AgCl	1.0 - 27.8	2.07	Yumuşak bir kristaldir ve suda çözünmez. Ultraviyole ışınımında kararır yapar ve aniden soğur.
Al ₂ O ₃	0.2 – 6.060	1.70	Oldukça sert bir malzemedir. UV, NIR ve IR uygulamalarında kullanılmaktadır.

Çizelge 2.2 IR Pencereleer ve özellikleri (devam)

AMTIR (GeAsSe Cam)	0.909 – 16.0	2.5	Suda çözünemeyen ve paslanmaya dayanıklı bir malzemedir.
BaF₂	0.149 – 13.513	1.46	Sert ve hassas bir kristaldir, su da çözünemez.
CaF₂	0.129 – 9009.1	1.42	Birçok asit ve alkalilere dirençli, güçlü bir kristaldir. Yüksek basınçlara dayanıklı ve suda çözünemeyen bir malzemedir.
Elmas	0.4 – 303.0	2.37	Yüksek basınçlarda, aşındırıcı çalışmalar için ve ayrıca geniş dalgaboyu aralığından dolayı oldukça kullanışlıdır.
GaAs	1,43 - 15,38	3.33	Amorfıtan yapılmış sert bir kristaldir.
Ge	1.818 – 16,67	4.00	Sert, hassas ve suda çözünemeyen bir malzemedir.
KBr	0.25 - 25	1.53	Çok yumuşak ve suda çözünen bir malzemedir. Düşük maliyetli ve geçirme aralığı bakımından gayet iyi bir malzemedir.
KRS-5 (Talyum- Bromiyodit)	0.5 – 40	2.37	Basınç altında deforme olabilen yumuşak bir kristaldir. Bazlarda çözünebilir, asitlerde çözünemeyen bir malzemedir. Zehirlidir.
LiF	0.11 – 5.9	1.4	En iyi vakum ultraviyole geçirici malzemedir.
NaCl	0.25 – 16	1.52	Oldukça yumuşak ve suda çözünebilir bir kristaldir. Düşük maliyetli ve iyi bir geçirgen olması açısından avantajlıdır.
Pyrex (Borcam)	0.33 – 2.5	1.473	Laboratuvar camlarıdır.

Çizelge 2.2 IR Pencereleer ve özellikleri (devam)

Si	0.12 – 15.2 33.3 – 10000	3.4	Sert ve hassas bir kristaldir. Uzak IR için ideal bir malzemedir.
SiO₂ (Kuartz)	0.15 – 3.7	1.4	Sert bir kristaldir.
ZnS	0.59 – 12.0	2.2	ZnS'nin susuz formudur ve su da çözünmez.
ZnSe	0.59 – 13.9	2.2	Sert ve hassas kristaldir.

2.9.2 Basınç ortamındaki optik pencere kalınlığının hesaplanması

Optik pencerelerin incelik hesabında, malzemenin kırılma koeffisiyentini hesabının yapılması gerekmektedir. Yarıçapın kalınlığa olan oranı kırılma koeffisiyentini vermektedir. Aynı şekilde eğer kalınlık sabit kalırsa, yarıçap değişir ve bununla orantılı olarak da kırılma koeffisiyentini değişmektedir (Anonymous 2009).

$$T_h = \sqrt{\frac{1.1(P)(\text{ÇAP})^2}{MR}} \quad (2.125)$$

Denklemde T_h değeri kalınlığı (inç cinsinden), ÇAP desteklenmeyen çap değerini, P değeri basınç farkı (bar cinsinden), MR ise kırılmaya zorlanım katsayısını (bar cinsinden) vermektedir (1 atm = 14.7 bar = 101.324 kPa). Genel olarak kullanılan kızılötesi geçirgen kristallerin kırılmaya zorlanım katsayıları Çizelge 2.3'teki gibidir.

Çizelge 2.3 Kızılötesi geçirgen pencerelerin zorlanım katsayıları (Anonymous 2009)

BaF ₂	3,90
CaF ₂	5,30
ZnSe	8,00
Ge	10,50
Safir	65,00

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Kızılötesi bölgede ışıyım yapan Serbest Elektron Lazerinin taşıyım hattı tasarımı adlı çalışmada. Bu tez çalışmasında SEL hızlandırıcılara dayalı ışıyım kaynakları ve optik kitaplarından yararlanılmıştır. Bunlara ek olarak, dünyadaki IR-SEL merkezlerinin optik demet hattı tasarımları üzerine yayınlamış olduğu makaleler ve internet sitelerindeki bilgiler kullanılmıştır.

Dünyadaki SEL merkezlerindeki bilgiler ve kaynaklarda geçen hesaplamalar kullanılarak ZEMAX programı üzerinden optimizasyonu yapılan hattın TARLA optik demet hattının çizimleri elde edilmiştir. Ayrıca bu program üzerinden adı geçen hattın ayrıntılı parametreleri de elde edilmiştir.

TARLA Tesisi'nde elde edilen lazerin paslanmaz çelik bir boru içerisinde iletimi sağlanacaktır. Lazer iletimi yapılacak borunun çapı 10 cm, uzunluğu ise yaklaşık olarak 33 metredir. Hat boyunca iki ayrı vakumlama işlemi yapılması planlanmaktadır (undulatörler ve deney istasyonları). Hattın 10^{-3} torr vakuma alınması mekanik pompa ile sağlanacak ve ortamın nemi ise kuru azot kullanılarak giderilecektir.

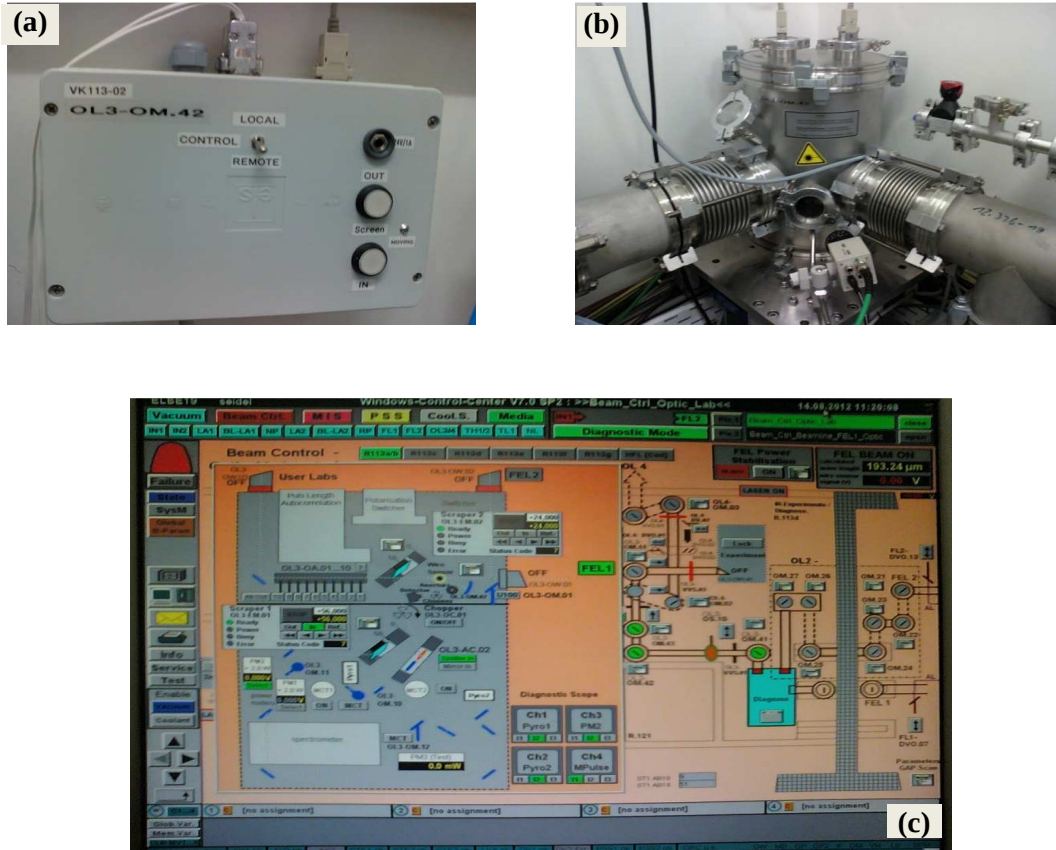
Çizelge 3.1 Optik demet hattı boyunca kullanılacak aynalar

Aynalar	U25 Optik Demet Hattı	U90 Optik Demet Hattı	Toplam
Odaklayıcı	3	4	7
Düzlem	1	5	6
Toplam	4	9	13

Optik demet hattında kullanılacak aynaların seçiminde ise kullanılacak dalgaboyu aralığında en az deformasyona uğraması ve en iyi yansıtıcılığa sahip olması çok önemlidir. Bu koşullar göz önünde bulundurularak en uygun alttaş malzemesi

seçilmelidir. Kızılötesi bölgede yansıtıcılığı ve ısı kapasitesinin yüksek olmasından dolayı en yaygın olarak kullanılan bakır metali TARLA demet hatların için de uygun bir en yaygın olarak kullanılan alttaş malzemesidir. Diğer bir seçenek ise geniş dalga boyu aralığındaki yansıtıcılığı ve dayanıklılığından dolayı molibden alttaş malzemesidir. Ayrıca paslanmaz çelikte kızılötesi dalga boyu aralığında oksitlenmeye karşı dayanıklılığından dolayı yine tercih edilen bir malzemedir.

Alttaş malzemeleri belirlendikten sonra iletimi yapılacak olan dalgaboyu aralığında en iyi yansıtıcı özelliklere sahip olan ayna kaplamaları kullanılacaktır. Altın (Au), Alüminyum (Al) ve Gümüş (Ag) kızılötesi bölgede sıklıkla en çok kullanılan kaplamalardır. Ag ve Al kızılötesi bölgede en yüksek yansıtıcılığa sahip materyallerdir, fakat kısa sürede oksitlenmelerinden dolayı oksitlenmeye karşı daha dayanıklı olan Au tercih edilmektedir.



Şekil 3.1 a. Aynaların yerel ya da uzaktan kontrol seçiminin yapıldığı mekanizma, b. Aynaların kontrolünün yapılabilmesi için yerleştirilen kamera ve lokal kontrol, c.Uzaktan kontrollerin yapıldığı kontrol ekranı (Görüntüler ELBE Laboratuvarından alınmıştır.)

Aynalar yerleştirildikten sonra sıcaklık soğukluk değişimlerinden veya dışarıdan gelebilecek mekanik etkilerden dolayı konumlarında ve açılarında bazı değişiklikler meydana gelmektedir. Bu kontrollerinin yapılması için şekil 3.1.a’da gösterilen mekanizmada bulunan tuş ile uzaktan ya da yerel kontrol mü yapılacağına karar verilerek, aynaların değerlerine nasıl müdahale edileceği seçilir. Lokal olarak yapılan kontrollerde aynaya yakın bir yerde bulunan bir joystick yardımıyla aynanın açı değeri değiştirilebilmektedir. Aynı zamanda “remote control” seçilerek şekil 3.1.c’de gösterilen ekrandan aynaların konumları ve açıları değiştirilerek lazer demetinin hizalaması yapılmaktadır.

3.2 Yöntem

TARLA lazer taşınım hattı çalışmalarında öncelikli olarak lazer taşınımı hesaplamaları için kaynak olarak optik kitaplarından faydalanılmıştır. Bu çalışmada verilerinden en çok yararlanılan laboratuvar Almanya’da bulunan ELBE IR-FEL araştırma merkezidir. Belirtilen laboratuvarın internet sitesi ve makalelerinde bulunan veriler kullanılarak analitik hesaplamalardaki yöntem belirlenmiş ve olası hatalar saptanmıştır.

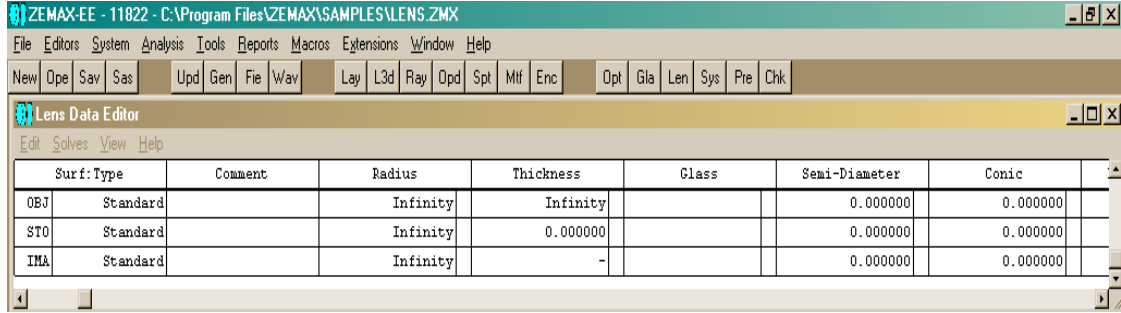
TARLA Tesisi’ nin optik demet hatları için aynı analitik hesaplamalar kullanılarak hattın genel parametreleri elde edilmiştir. ZEMAX ve GLAD programlarına aktarımı yapılan parametreler ile TARLA optik demet hattının simülasyonları yapılmıştır.

3.2.1 Optik demet hattı simülasyonu ve kullanılan programlar

Bu çalışmada optik demet hattı dizaynı için yapılan simülasyon çalışmalarında, optik sistemlerin tasarlanmasında özellikle modelleme kısımlarında ZEMAX ve GLAD programları kullanılmıştır. Bu programlar yardımıyla tasarlanmak istenilen optik demet hattının tasarımı ve optimizasyonu yapılabilmektedir.

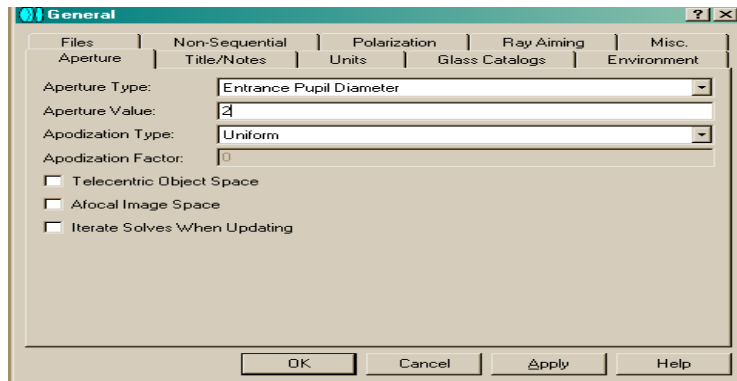
3.2.1.1 ZEMAX optik tasarım programı

YUUP projesi tarafından temin edilen ZEMAX programı optik sistemlerin tasarımında kullanılmaktadır. Programda Lens Data Editörü isimli bölmeden, hatta dair birçok veri girişi yapılabilmektedir (Anonymous 2010)



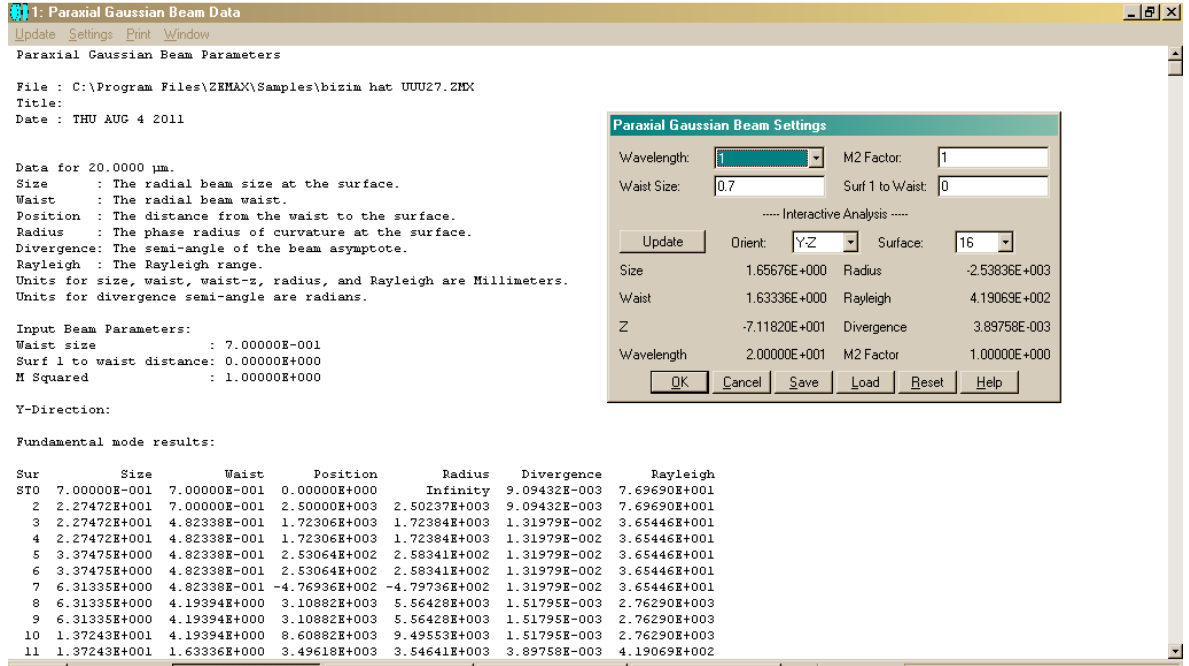
Şekil 3.2 ZEMAX mercek veri giriş ekranı

Şekil 3.7’da görülen ekrandan “Surf:Type” kısmından yüzey seçimi yapılır. Bu bölümde standart yüzey ile düzlem ayna veya tek odaklı ayna seçimi yapmak mümkün olabiliyor. Yine bu kısımdan toroidal ayna seçimi yapılarak ise iki farklı yarıçap değeri tanımlanarak mümkün olabiliyor ve bu şekilde “Radius” sekmesinden yapılamayan farklı yarıçap değerlerinin tanımlanabilmesi sayesinde astigmatizm önlenabiliyor ve demetin şekli bozulmadan iletimi sağlanabiliyor. “Thickness” sekmesinden iki yüzey arası mesafe, “Semi-diameter” sütunundan yüzey yarıçapı. “Glass” bölümünden ise ayna ya da merceklerde kullanılacak malzeme seçimi yapılabilmektedir (Anonymous 2007).



Şekil 3.3 ZEMAX genel parametre giriş ekranı

Şekil 3.3'teki "General" sekmesinden ise demet başlangıç çapı değerleri, kullanılacak birimler, kullanılacak yüzeylerin seçilmesi gibi bir çok işlemin yapılması mümkündür. Benzer bir ekrandan (Şekil 3.2'deki "Wav" tuşu ile ulaşılmaktadır) ise farklı dalgaboyu değerlerinin girilmesine program olanak sağlanmaktadır.



Şekil 3.4 ZEMAX "Paraxial Gaussian Beam" veri ekranı

Analysis bölümünden Paraxial Gaussian Beam Data penceresine ulaşılmaktadır. Burada "Settings" sekmesi altındaki "hole diameter (D_h)" değeri değiştirilerek (başlangıç demet belı değerını girerek) demet hattı boyunca ışının değışimi bu veri ekranından gözlemlenebilmektedir (Anonymous 2010).

Analitik hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler kullanılarak ZEMAX programı üzerinden hat ile ilgili simülasyonları yapılmış ve hattın genel verilerine ulaşılmıştır (ELBE internet sitesindeki grafikler ile elde ettiğimiz grafikleri karşılaştırarak ZEMAX programının hat tasarımında doğru çizimleri yaparak yeterli verileri sağladığı gözlemlenmiştir).

3.2.1.2 GLAD optik sistem tasarım programı

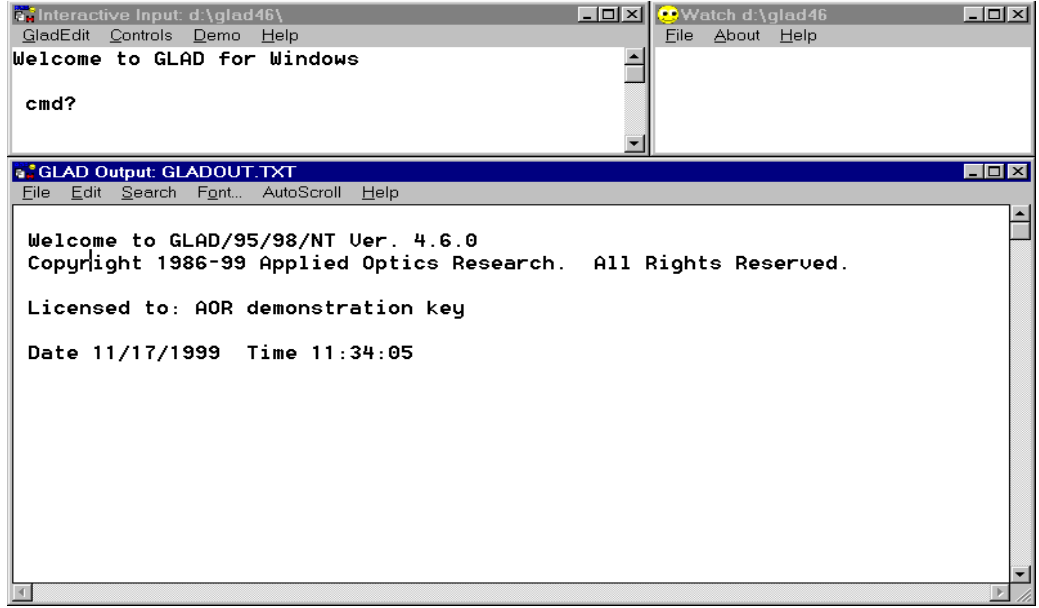
HZDR bünyesindeki ELBE SEL Tesisi'nde yapılan staj süresince GLAD programını kullanılma fırsatı bulunulmuştur. Bu program ile GLAD içerisinde tanımlanmış bulunan komutlar bir script dosyasına girilerek optik demetin taşınımı ve analizleri yapılmaktadır. GLAD programı ile alınan sonuçlar ve nasıl çalıştırıldığı dördüncü bölümde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

GLAD programı optik ve lazer analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir programdır. Komutlarla çalışan bu program ile koherent ışık kullanan lazerlerin ve karmaşık optik sistemlerin modellenmesi kolaylıkla yapılabilmektedir. Program içerisinde yarıklar, aynalar, lensler, ortamlar(sistemin içinde yer alacağı çevre), kırınım etkisi ve bunlar gibi daha birçok detay belirlenerek farklı lazer mekanizmaları yapmak mümkün olabilmektedir (Anonymous 2012.a).

Program çalıştırıldığı zaman üç ana ekran açılmaktadır: İnteraktif komut ekranı (interactive input window), grafik görüntüleme ekranı (watch) ve takip ekranı (traceback window).

3.2.1.3 İnteraktif komut ekranı

Bu ekran, simülasyon/tasarım için gerekli olan komutları satır satır girebilmek için kullanılmaktadır. Komutlar, oluşturulacak olan text dosyasının içerisine yazılarak sonrasında program üzerinden çalıştırılma imkanına sahiptir. Fakat daha çok tercih edilen bir metot interaktif ekranda bulunan GladEdit sekmesinden açılan script dosyası ile yazılacak olan komutların bu pencere üzerinden işlenmesidir. GladEdit ekranında bulunan Init-Run kullanılarak oluşturulan program çalıştırılabilmektedir. Program çalışırken elde edilen veriler ve çıktılar arka planda çalışmakta olan GLAD Output ekranından satır satır takip edilebilmektedir. Elde edilen çıktıları bir text dosyasına da aktarabilmek mümkündür.



Şekil 3.5 GLAD girdi ve çıktı ekranları

Ayrıca GLAD programını kullanırken script dosyalarını oluşturabilmek ve tasarım işlemini doğru bir şekilde yapabilmek için kullanılacak komutlar iyi seçilmelidir. Bu çalışmada kullanılan temel komutlar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir (Anonymous 2012.a).

Çizelge 3.2 GLAD Komutları

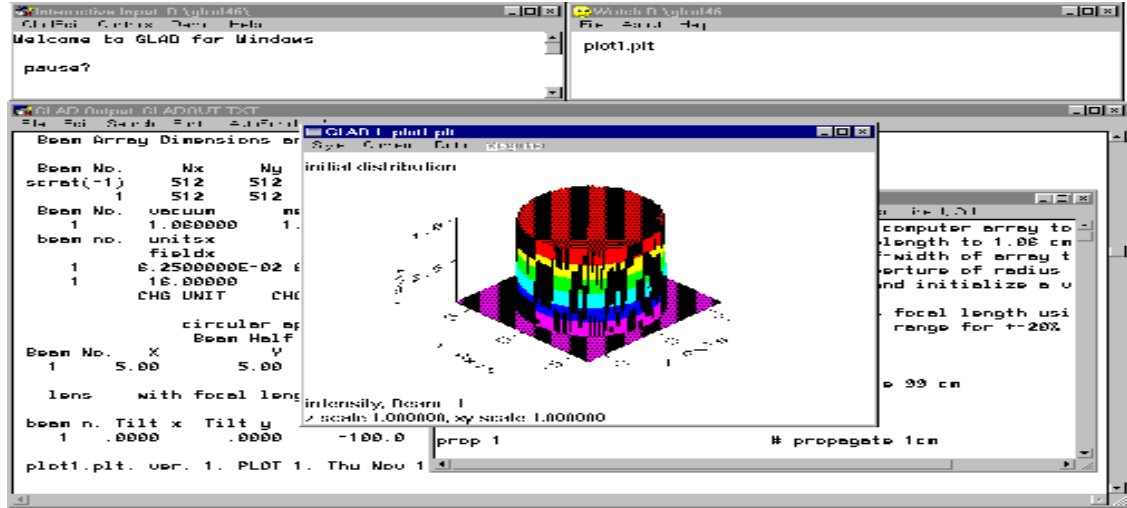
C,CC, COMMENT	Satır komutu (Yazılan satırın programın çalışması bittikten sonra output ekranında gözükmesini sağlar.)
CLAP	Açıklık değerini belirlemek için kullanılır (Clear Aperture)
COPY	Bir demeti diğer bir demete kopyalar, özelliklerini aktarır.
END	GLAD'a yazılan programı bitirmek için kullanılır.
ENERGY	Demetin toplam enerjisini (gücünü) hesaplamaktadır.
FITGEO	Ortalama yarıçap değerine göre demet genişliğini hesaplar.
GAUSSIAN	Demeti Gaussian fonksiyonu formatına uydurur.
GEODATA	GLAD Output ekranında, demet özelliklerinin gözükmesini sağlar.
LENS	İdeal bir lens yerleştirir.
MIRROR	İdeal özelliklerde bir ayna yerleştirir.

Çizelge 3.2 GLAD Komutları (devam)

NBEAM	Demet sayısını belirler ve demetlere reset atar.
NORMALIZE	Demette sıfır olmayan değerleri normalize eder.
OUTFILE	Demet özelliklerini bir dosyaya yazdırır.
PAUSE	Kullanıcı enter tuşuna basana kadar programın çalışmasını durdurur, isteğe göre yanına saniye değeri girilerek belirli bir süreliğini dondurmakta mümkündür.
PLOT	Bu komut ile çeşitli grafikler çizdirmek mümkün olabilmektedir.
PROP	Belirlenen kordinatlarda demetin iletilmek istenildiği uzaklığı belirlemede kullanılır.
TIME	Program çalışırken geçen zamanı saydırmak için kullanılır.
TITLE	Grafik başlığını belirler.
UDATA	İstenen verileri text dosyasına aktarmak için kullanılır.
WAVELENGTH	Demetin dalgaboyunu belirler.

3.2.1.4 Grafik görüntüleme ekranı

Grafik görüntüleme ekranı (watch window), GladEdit'te yazılan ve çalıştırılan program sonucunda elde edilen grafikleri arka planda açarak gözlemlememizi sağlayan bir penceredir. Watch ekranı ayrıca önceden oluşturulmuş grafik ekranlarını açtığımız zamanlarda, GLAD çalışmasa bile kullanılabilir. şekil 3.6'da sağ üst köşede watch penceresini görmek mümkündür, ilk satırda yazan kısım ise açılmış olan grafiğin ismini belirtmektedir. Demet profilleri veya yoğunlukları gibi grafikler watch ekranı altında aşağıdaki olduğu gibi görüntülenmektedir.



Şekil 3.6 GLAD programı ile grafik görüntüleme

3.2.2 Takip ekranı

Takip ekranından çalışmakta olan komutların satır numaraları ya da oluşturulan makroların tekrarlama sayıları ekrana yazdırılır. Böylece hangi komutun ne zaman çalıştığını ve ne gibi çıktılar verdiğini gözlemlemek mümkün olabilmektedir. Ayrıca şekil 3.7’de gösterilen değişkenler ekranından programda belirtilmiş olan değişkenler de gözlemlenebilmektedir.

Variable Monitor	
LoopCounter	400
InitialValue	1.234
Variable	201.234
VariableSquared	40495.1
Log10Variable	2.3037

Şekil 3.7 Değişkenlerin gösterildiği ekran

4. BULGULAR

4.1 ELBE IR SEL Laboratuvarları Optik Taşınım Hatları

4.1.1 ELBE U27 ve U100 taşınım hatları

TARLA Merkezi için tasarlanacak olan hattın doğru bir şekilde yapılabilmesi için öncelikle, daha önceden tasarlanmış ve kullanımda olan çok benzer bir optik demet hattını baz alarak onun üzerinden çalışmak, hesaplamaların ve tasarımın doğruluğunu test etme açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple Almanya'nın Dresden şehrinde bulunan ELBE SEL Laboratuvarı optik demet hattı çalışmalarından yararlanılmıştır (Gensch 2011)

Çizelge 4.1 U27 – U100 undulatör parametreleri

Parametreler	Undulatörler	
	U27	U100
Undulatör Periyodu (λ_u)	2.73 cm	10 cm
Periyot Sayısı	2*34	38
Undulatör Parametresi (Krms)	0.3 – 0.7	0.5 – 2.7
Dalgaboyu Aralığı	3.5 – 22 μm	22 – 280 μm

Çizelgede verilen değerler kullanılacak olan undulatörün yapısı dikkate alınarak hesaplanabilmektedir (Denklem 2.53).

Bu formülizasyonda kullanılan katsayı değerleri kullanılan NdFeB hibrit magnetin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Undulatörün K parametresi ise özellikle 2.53 ve 2.54 eşitlikleri kullanılarak grafikler analiz elde edilir ve istenen dalgaboyu aralığı için en

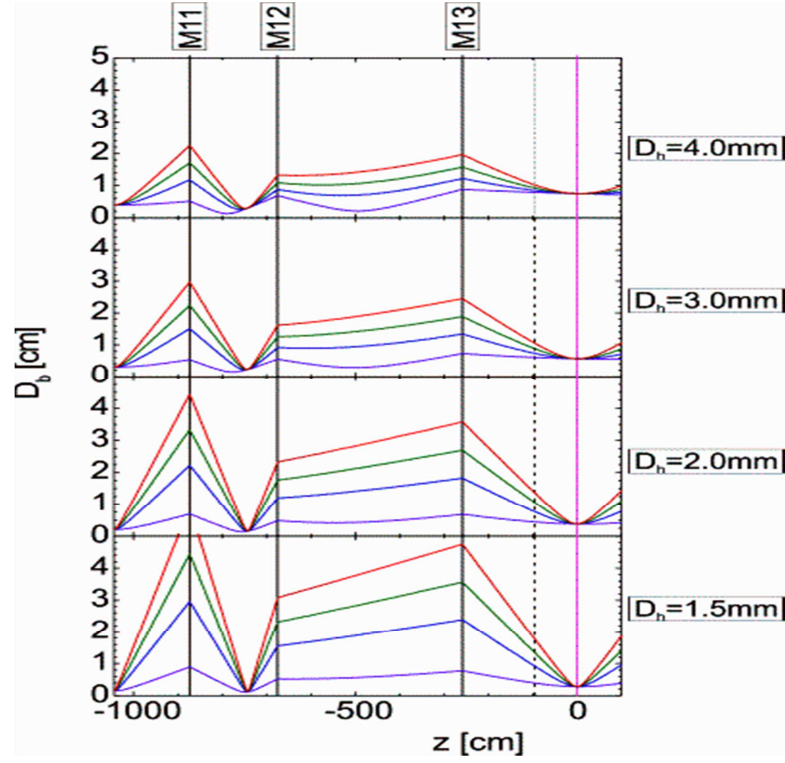
Elde edilen lazer demetinin öncelikle diyagnostik odasına, orada ölçümleri yapıldıktan sonra da deney istasyonlarına düzgün taşınabilmesi amaçlanmaktadır. Diyagnostik ve deney istasyonlarına alınırken demet çapı dikkate alınacak ve demetin belirtilen istasyonlara odaklanarak herhangi bir demet ve güç kaybı olmadan iletiminin sağlanması amaçlanmaktadır. Belirtilen istasyonlarda demet çaplarının ve gücün hesaplanabilmesi için Bölüm 2.6’ da verilen formüllerden yararlanılmıştır.

ELBE’ de hattın tasarımı için simülasyon programı olarak GLAD kullanılmaktadır. Bu programda başlangıç demet özellikleri (dalga boyu, demet çapı gibi) belirlenerek ve aşağıdaki program yazılarak U27 optik demet hattı simülasyonu program üzerinden yaptırılmıştır.

Çizelge 4.3 U27 optik demet hattı GLAD programı komutları

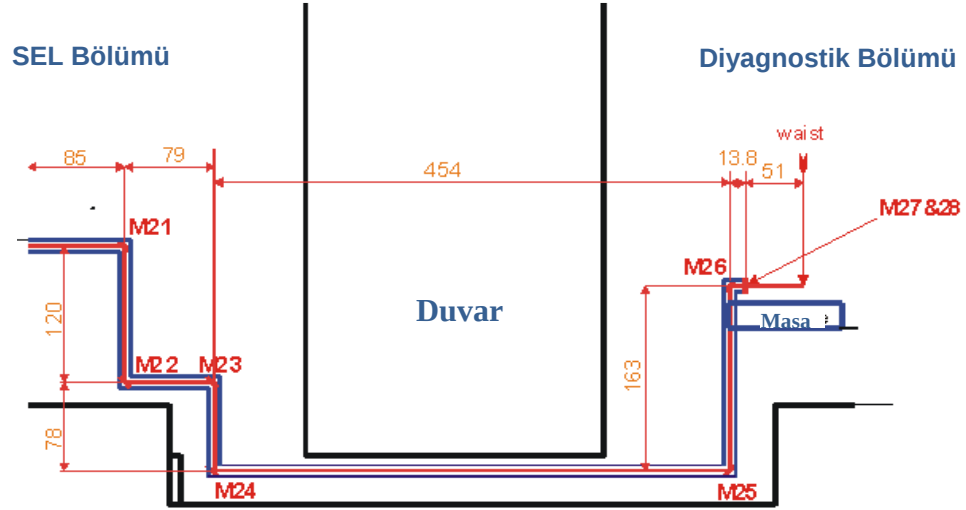
echo/off	min=0	#calculate and update spatial values
time/init	#fitegauss/reset	based on average radius
nslice=128*4	rad1=0.3*0.7	#variab/set rightsidesize 1
array/set 1	clap/cir/res ibeams=1 rad1	fitxomega
nbeam 1	gauss/c 1 1 rad1	geodat/list 1
vc=2.9979e9	geodata/list 1	.
lambda=100 #um	plot/watch plotaperture	.
wavelength/set 0 lambda #um	title behind aperture 0.3	
zR=200 #cm	plot/liso/intensity 1 1	
Lu=1153 #cm	plot/meta/wmf	
w0=0.01*sqrt(zR*lambda/pi)	geodata/list 1	
w0=	prop 96	
unit0=w0*sqrt(pi/nslice) list	status/parax	
unit=unit0	plot/watch plotM11	
units/set 0 unit unit	title 85 behind aperture	
#status/gaussian	plot/liso/intensity 1 1 xrad=5	
gaussian/cir 0 1 w0	yrad=5 nslice=256 min=0	
prop [Lu/2]	plot/meta/wmf	
geodata/list 1	geodata/list 1	
status/parax	C ##### M11 mirror 73.95	
geodata/list 0	vertex/locate/absolute 170.9 0 0	
array/list	global/define 0 0 0 0	
energy/list	#lens/sph/element 1 73.95	
plot/watch plotb.plt	lens/toric/element 1 73.95 73.95	
plot/liso/intensity 1 1 nslice=256	fitgeo/spatial 1	

Bu yazılan program kullanılarak demetin belirli uzaklıktaki çapları, gücü hesaplanarak demet profilleri elde edilebilmektedir. Program çalıştırıldıktan sonra bir GLAD Output ekranı üzerinden demetin taşınımları sırasında değişen özellikleri rahatlıkla gözlemlenebilmektedir.



şekil 4.2 1.5- 2.0- 3.0- 4.0 mm açıklık değeri için ELBE U27 hattı demet çapları ($D_b = 2.85 \cdot w$) (Wünsch 2003.a)

ELBE U100 optik demet hattında ise hem daha uzun bir iletim hattı olduğu hem de daha yüksek dalgaboylarında çalışıldığı için iletim işlem biraz daha zorlaşmaktadır. Bu nedenle hat boyunca daha çok ayna ve buna bağlı olarak aynaların koyulacağı yerlerde şekil 4.3' te görüleceği gibi aynalar kullanılarak basamaklar oluşturulmuştur. (Wünsch 2003.a).



Şekil 4.3 ELBE U100 optik iletim hattı (Wünsch 2003.c)

Çizelge 4.4 ELBE U100 optik demet hattı ayna parametreleri

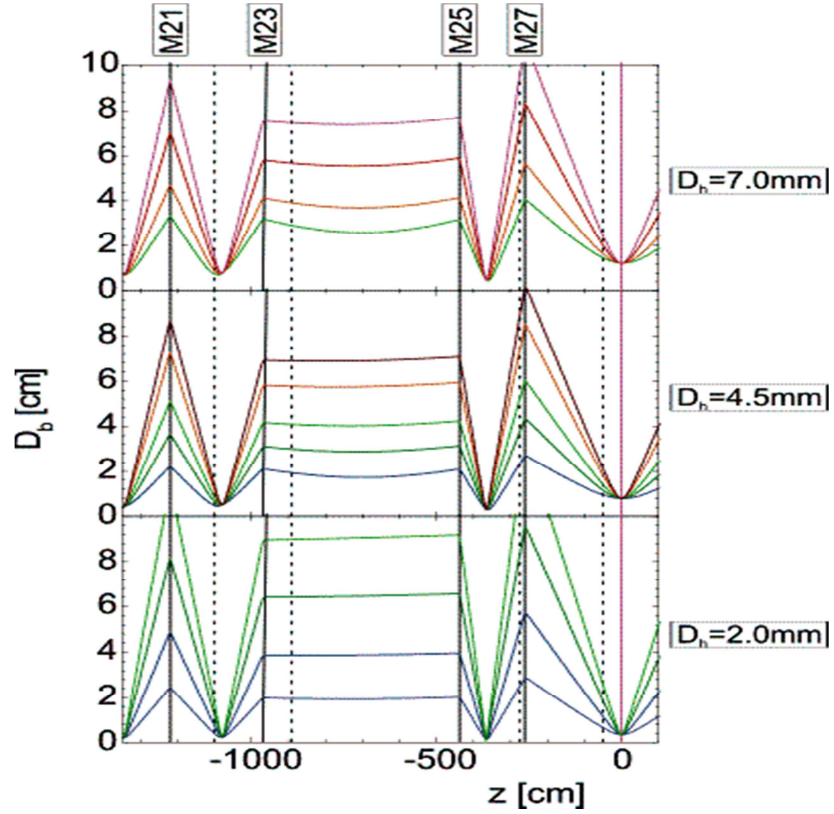
Ayna Numarası	Yol Uzunluğu (mm)	Etkili Odak Uzaklığı (mm)
M21	850	460.8
M22	2050	Düzlem
M23	2840	990.1
M24	3620	Düzlem
M25	8160	714.3
M26	9790	Düzlem
M27	9928	749.1
M28	12028	Düzlem

ELBE U100 optik demet hattı GLAD programı ile Çizelge 4.5' te gösterildiği gibi yazılarak, program çıktıları aşağıdaki çizelgede belirtildiği gibi alınabilmektedir.

Çizelge 4.5 ELBE U100 optik demet hattı GLAD çıktı ekranı

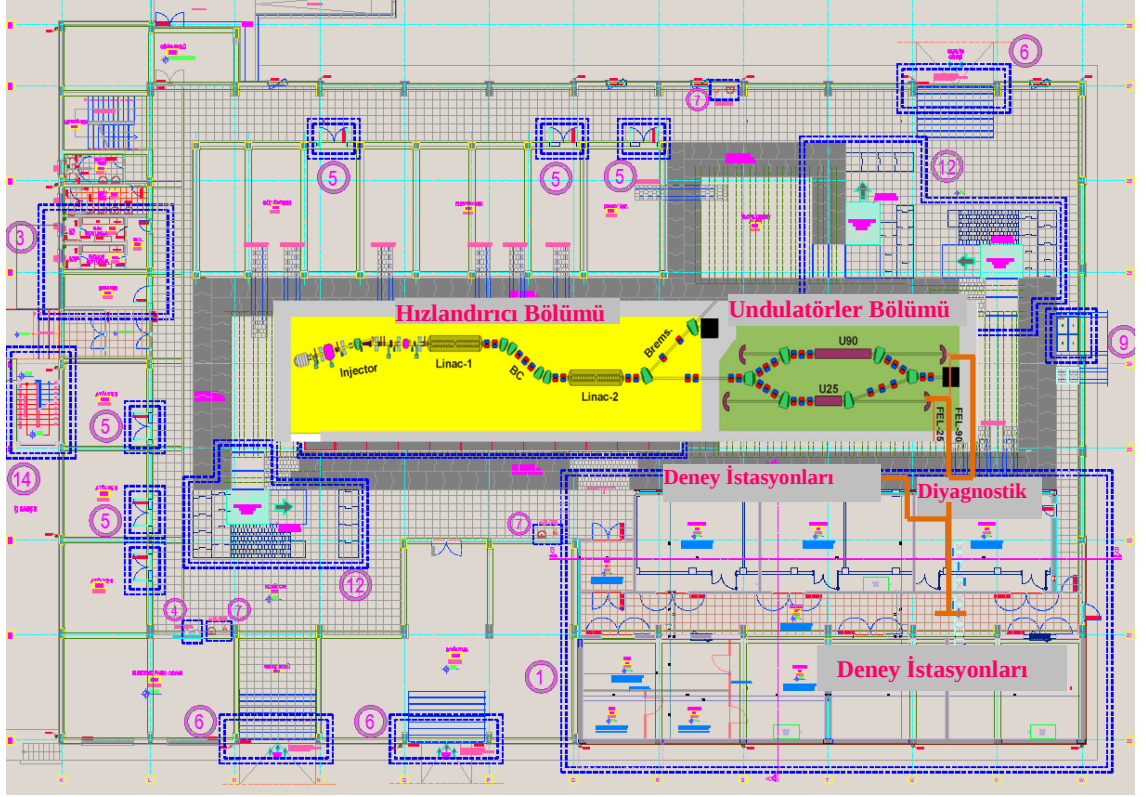
Surrogate gaussian: Beam No. 1				
Waist location		Waist size		
zwaistx	zwaisty	waistx	waisty	
576.50000	576.50000	0.20999999	0.20999999	
Plane(1) or curved(0) reference		Local beam half width		
iplanx	iplany	wsx	wsy	
1	1	0.20999999	0.20999999	
		Zwaist-to-zreff		
		zdistx	zdisty	
		0.0000000	0.0000000	
Rayleigh distance		M^2 values		
zrayx	zrayy	M2x	M2y	
13.854424	13.854424	1.0000000	1.0000000	
C ## prop 85 cm/ M11 mirror				
Surrogate gaussian: Beam No. 1				
Waist location		Waist size		
zwaistx	zwaisty	waistx	waisty	
576.50000	576.50000	0.20999999	0.20999999	
Plane(1) or curved(0) reference		Local beam half width		
iplanx	iplany	wsx	wsy	
0	0	1.3053992	1.3053992	
Surrogate radius		Zwaist-to-zreff		
radx	radx	zdistx	zdisty	
87.258179	87.258179	85.000000	85.000000	
Rayleigh distance		M^2 values		
zrayx	zrayy	M2x	M2y	
13.854424	13.854424	1.0000000	1.0000000	
C ##### M11 mirror 46.084				
Vertex Position		Vertex Matrix		
		T-cosines	U-cosines	V-cosines
x	85.0000	1.000000	0.000000	0.000000
y	0.00000	0.000000	1.000000	0.000000
z	0.00000	0.000000	0.000000	1.000000
lens with focal lengths = 46.08 in x 46.08 in y				

Programda optik demetin başlangıç noktası, rezonatörün orta noktası olarak belirlenmiştir. Bu nedenle açıklığın (aperture) belirlendiği nokta ayna üzerinde bulunduğu için, rezonatörden sonra oluşacak başlangıç demet belı 576.5 cm’ de yani rezonatör aynası üzerinde belirlenmiştir ve program çıktısında “zwaistx” olarak tanımlanmıştır. Belirtilen nokta üzerindeki demet çapı “wsx”, bu bölgeye en yakın demet belı genişliğı “waistx” ve demetin genişleme oranını belirleyecek olan rayleigh uzunluğunu ise “zrayx” değerinden gözlemlenebilmektedir. Tabloda gösterilen veriler sadece birinci aynaya (M21) kadar hesaplanan parametreleri göstermektedir. İşlem diğer aynalar için devam ettirilerek demet çaplarıyla ilgili değerler şekil 4.4’ten görüleceğı gibi değışim göstermektedir.



Şekil 4.4 2.0- 4.5- 7.0 mm açıklık değerleri için ELBE U100 hattı demet çapları ($D_b = 2.85 \cdot w$) (Wünsch 2003.b)

4.2 TARLA Optik Demet Hatları



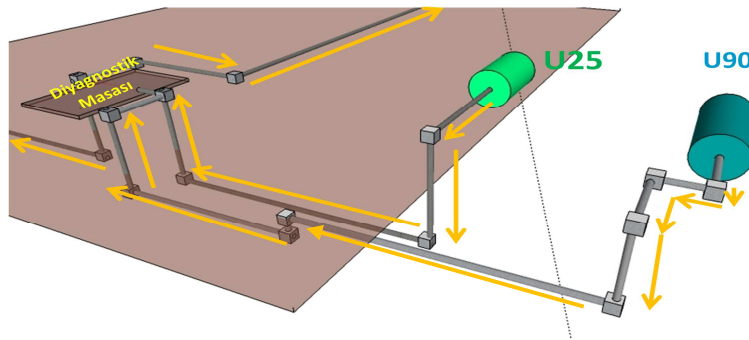
Şekil 4.5 TARLA tesisi yerleşim planı

TARLA Kızılötesi SEL tesisinde, lineer bir hızlandırıcı kullanılarak rölativistik hızlara ulaştırılan 15 - 40 MeV enerjili elektron demeti, 2.5 cm ve 9 cm periyotlu salındırıcı magnetlerden geçirilerek 2 – 250 μm dalga boyu aralığında kızılötesi bölgede ışınım yapan Serbest Elektron Lazeri (SEL) elde edilmesi planlanmaktadır (Özkorucuklu 2011).

Çizelge 4.6 TARLA U25-U90 undulatör parametreleri

Parametreler	Undulatörler	
	U25	U90
Undulatör Periyodu (λ_u)	2.5 cm	0.9 cm
Periyot Sayısı	60	40
Undulatör Parametresi (K_{rms})	0.71	2.5
Dalgaboyu Aralığı	2.5-20 μm	18-250 μm

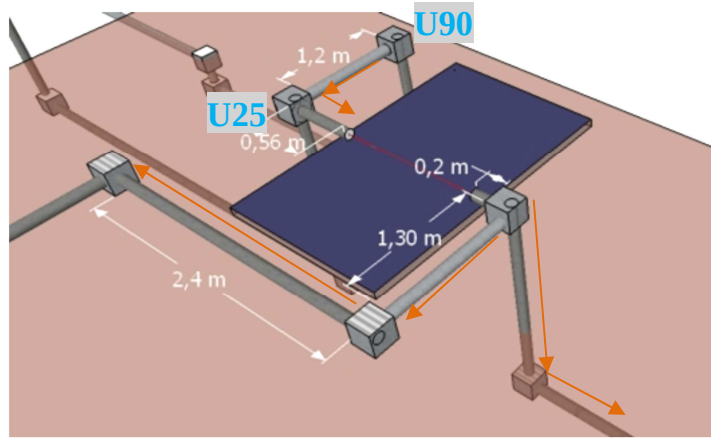
Bu çalışma ile U25 ve U90 undulatörlerinden elde edilen SEL' in, optik bileşenler yardımı ile diyagnostik odasına ve deney istasyonlarına iletimi sağlanacaktır (Şekil 4.6'da oklarla gösterilen hat).



Şekil 4.6 TARLA optik demet hatları şematik görünümü

U90 ve U25 hatları diyagnostik masasının üzerine gelmeden birleştirilerek masaya geldiğinde tek bir girişe indirgenmesi ve diyagnostik masası üzerindeki kontrolün daha rahat yapılması amaçlanmaktadır. Optik demet hattının çıkışında ise yine tek bir

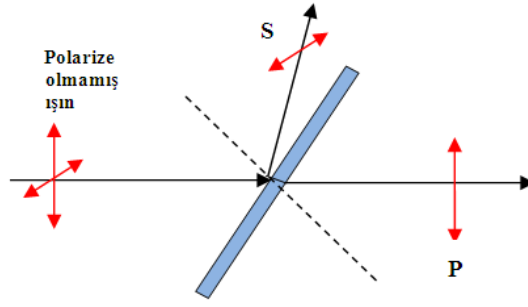
çıkıştan ikiye bölme işlemi yapılarak yan taraftaki istasyonlara ve karşı binada kurulacak olan deney istasyonlarına lazerin iletimi işlemi gerçekleştirilecektir.



Şekil 4.7 Diyagnostik masası şematik görünümü

4.2.1 Demet hatlarında kullanılacak optik elemanların belirlenmesi

Hat boyunca yapılacak olan vakumlama işleminden sonra, undulatör çıkışıından hattın vakumu bozulmadan alınması, diyagnostik odasına ve deney istasyonlarına herhangi bir kayıp olmadan verilebilmesi için kızılötesi geçirgen pencereler kullanılacaktır. Belirtilen pencerelerin, ışın kaybı olmadan geçirilebilmesi için Brewster açısında yerleştirilmesi gerekmektedir. Brewster açısı aynı zamanda polarizasyon açısı olarak da bilinmektedir. Brewster açısında yerleştirilen pencere, ışığın kutuplanmasına göre yansıma olmaksızın geçmesine olanak sağlamaktadır. Bu teoriye göre belirli bir polarizasyona sahip bir ışık, Brewster açısında yerleştirilen bir yüzeyden kayıpsız bir şekilde geçerek yansıma yapmaz. Eğer polarize olmamış bir ışın demeti mevcut ise, yüzeyden yansıyan ışın tek bir yönde mükemmel polarizedir (Bennet 1978).

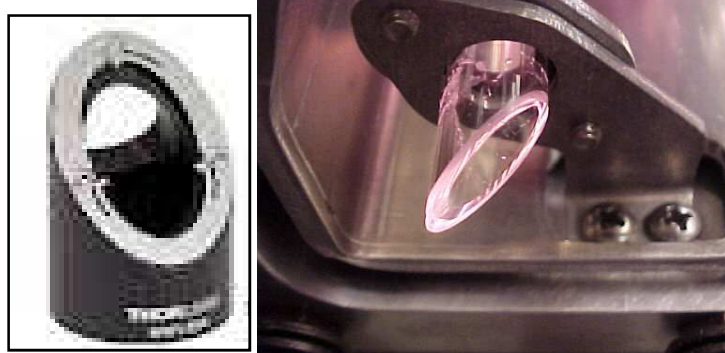


Şekil 4.8 Brewster açısında yerleştirilen pencerelerde kutuplaşma

SEL undulatorlerinden elektron salınımı yönünde kutuplaşma olması beklenmektedir, böylelikle magnetlere dik olan bu kutuplaşma aslında yere paraleldir.

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (4.1)$$

Formülde n_2 ve n_1 değerleri kırınım indislerini, θ_B ise Brewster açısını temsil etmektedir (Bennet 1978).



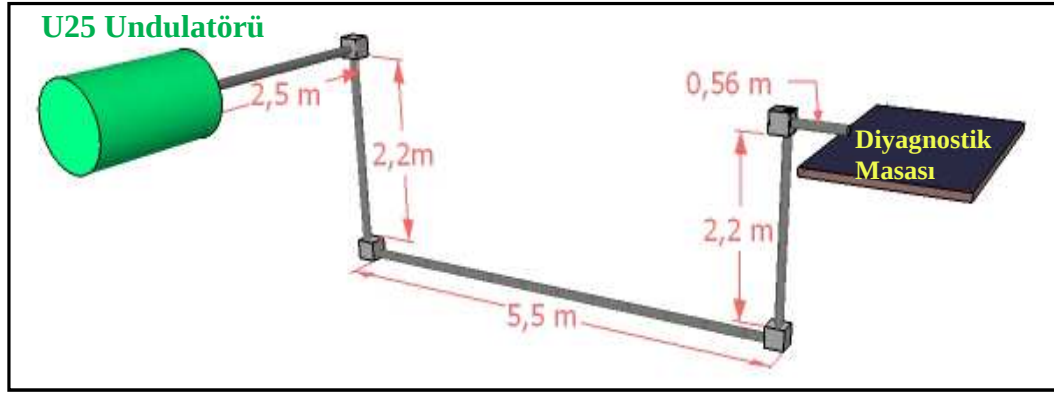
Şekil 4.9 Brewster açısında yerleştirilmiş optik pencereler

U90-U25 undulatorleri ve diyagnostik odasında kızılötesi bölgede en geniş dalga boyu aralığında geçirgen olan elmas pencere kullanılacağından (kırınım indisi 2.417) θ_B yaklaşık 67.2 olarak bulunmaktadır. Diğer deney istasyonlarında, dalgaboyu aralığına göre TPX, BaF₂, CaF₂, ZnSe gibi malzemelerden üretilen pencereler kullanılacaktır.

4.2.2 Hesaplama sonuçları ve parametrelerin optimizasyonu

THM IR SEL Tesisi'nde kurulumu devam etmekte olan TARLA SEL tesisinde $2\ \mu\text{m}$ ile $250\ \mu\text{m}$ dalgaboyu aralığında kızılötesi bölgede ışıyım yapan lazer demetinin elde edilebilmesi için periyot uzunlukları 2.5 cm ve 9 cm olan iki undulatör kullanılmaktadır. Belirtilen undulatörlerden elde edilen lazerler, deney istasyonlarına U25 ve U90 optik kovuklarından ayrı ayrı çıkış alınarak diyagnostik masasına kadar iki farklı optik demet hattı ile iletilmektedir. Demet hatları diyagnostik masasında birleştirilerek deney istasyonlarına taşınımı yapılacaktır..

4.2.2.1 TARLA U25 taşınım hattı



Şekil 4.10 TARLA U25 optik taşınım hattı

Bu çalışmada TARLA U25 undulatöründen diyagnostik masasına kadar olan demet hattının hesaplamaları ve ZEMAX çizimleri yapılmıştır. Öncelikle 3. Bölümdeki teorik hesaplamalar kullanılarak odak uzaklıkları hesaplanmıştır. TARLA U25 hattında 4 tane ayna kullanılmaktadır. Bu aynalar M11, M12, M13, M14 olarak isimlendirilecektir. İlk üç ayna odaklayıcı, sonuncu ayna ise düz ayna olacaktır. Hat üzerindeki odaklayıcı aynalar toroidal ayna seçilecektir. Bu şekilde aynalara iki ayrı odak uzaklığı girilerek astigmatizm önlenerek, demet dağılımı olmadan demetin daha düzgün bir şekilde iletilmesi sağlanacaktır. Buna göre dalgaboyunu $20\ \mu\text{m}$ ve başlangıç çapını (D_h) 2mm olarak ve de hattın değerlerini de dikkate alarak hesapladığımız veriler aşağıda bir tablo halinde gösterilmektedir (Erbay 2012). Bu hesaplamalar Excel üzerinden yapılmıştır ve hesaplamaların ayrıntıları U90 optik demet hattı içerisinde daha ayrıntılı anlatılacaktır.

Çizelge 4.7 TARLA U25 hattı için ayna değerleri

Ayna Numarası	Odak Uzaklığı (mm)	Yol Uzunluğu(mm)
M11	F11 = 909.9	2500
M12	F12 = 799.9	4700
M13	F13 = 3020.5	10200
M14	F14 = düzlem	12400

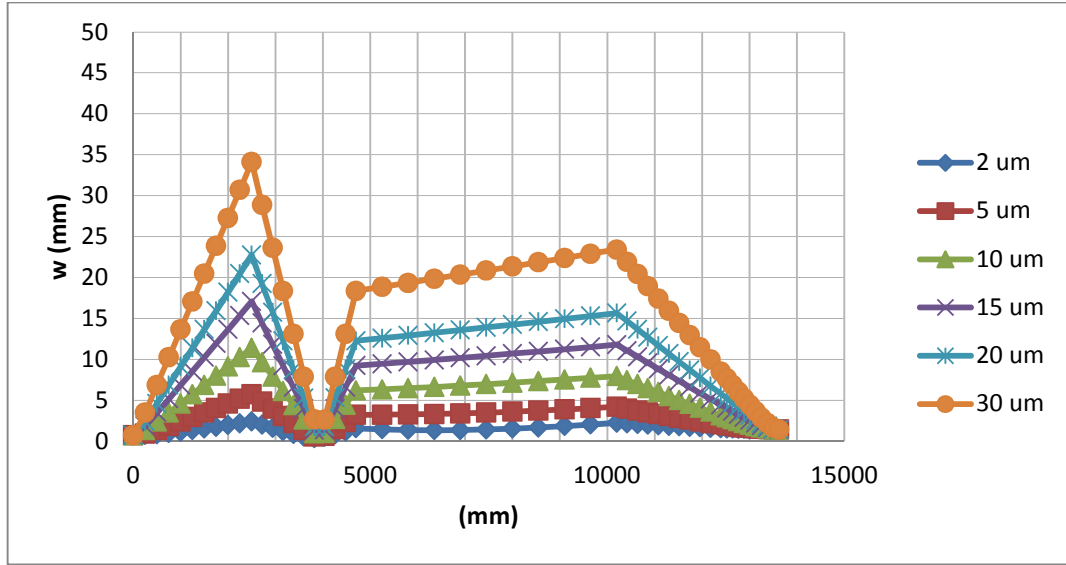
Bu çizelgede kullanılan ayna değerlerine, hem ZEMAX programı üzerinden hesaplatıldığında, hem de teorik hesaplamalar sonucunda ulaşılmaktadır. Bu değerler, yukarıda anlatıldığı gibi “Gaussian Beam Parameters” ekranından rahat bir şekilde görülmektedir. Buna göre aynaların üzerindeki ve oluşan demet bellerinin bulunduğu bölgelerdeki demet çapları hesaplandığı ve simülasyonu yapıldığı zaman Çizelge 4.8’deki değerleri okunabilmektedir.

Çizelge 4.8 TARLA U25 hattı için ZEMAX ve hesap sonuçları ($D_h=2\text{mm}$, $\lambda=20\text{ }\mu\text{m}$)

Aynalara Göre Konumları	Pozisyonu (mm)	Beam Waist değeri (mm)	Rayleigh Uzunluğu (mm)
M11 öncesi	0.00	0.70	76.97
M11 üzeri	2500	22.747	25.15
M11-M12 arası	3929.46	0.400	25.15
M12 üzeri	4700	12.266	10737.1
M13 üzeri	10200	15.657	307.8
M14 üzeri	12400	5.762	307.8
M14 sonrası (diyagnostik odası)	1362.46	1.399	307.8

Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi, optik demeti undulatörden çıktıktan sonra M11 ve M12 aynaları arasında bir demet beli oluşturmaktadır. Sonuncu demet beli ise diyagnostik masası üzerinde oluşturulmaktadır. Bu şekilde demet diyagnostik odasına odaklanarak demetin daha güçlü bir şekilde diyagnostik odasına alınması ve ölçümlerin

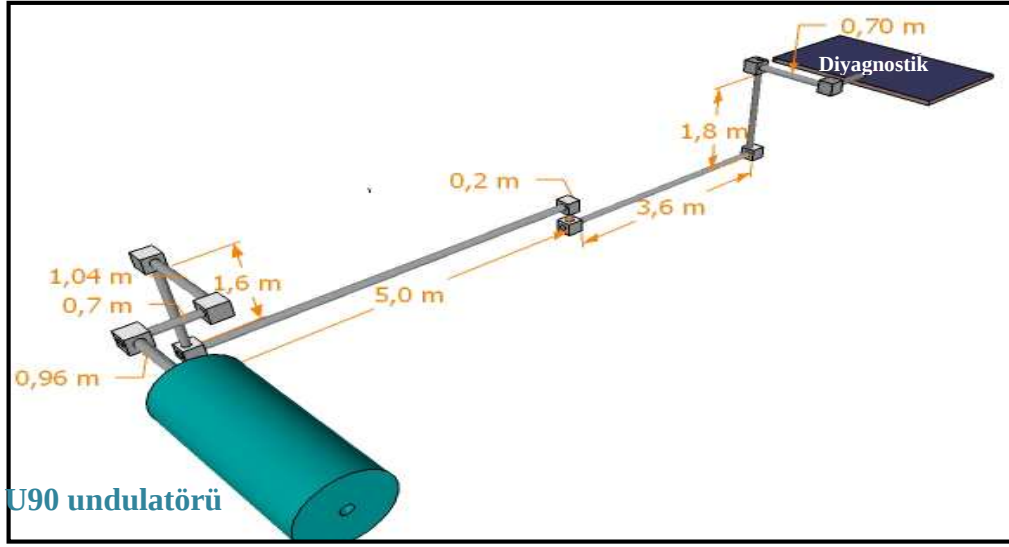
herhangi bir kayıp olmadan daha iyi yapılabilmesi ve deney istasyonlarına iletilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4.11 $D_h=2$ mm rezonatör çıkışı için U25 optik demet hattı boyunca demet çapları

Yukarıdaki çizelgede gösterilmiş olan TARLA U25 optik demet hattının değerleri GLAD programında başlangıç demet özellikleri tanımlanarak optimizasyonu yapılmıştır. Işın matris ve Gaussian optiği yöntemleri kullanılarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılarak değerlerin geçerliliği kontrol edilmiştir. Şekil 4.11’de oluşan demet çapları ve demet bellerinin oluştuğu yerler GLAD çıktı ekranından Ek 1’de görülebilmektedir.

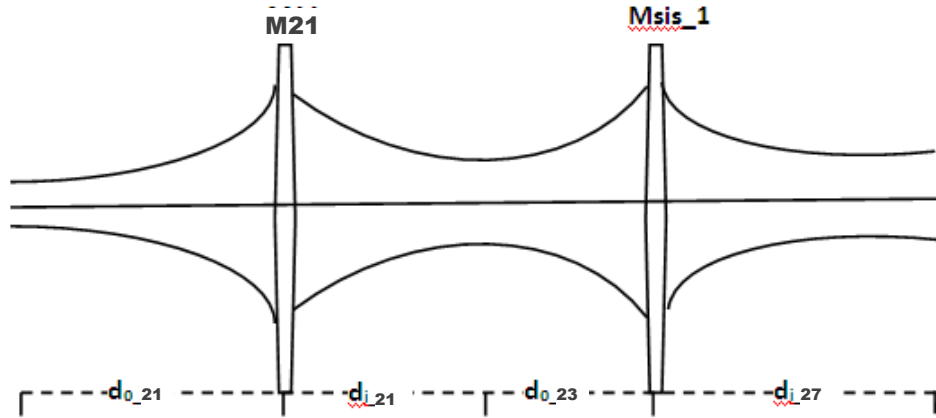
4.2.2.2 TARLA U90 taşınım hattı



Şekil 4.12 TARLA U90 optik demet hattı görünümü

Bu tez ile TARLA U90 optik demet hattı parametreleri hesaplanmış, hattın tasarımı yapılmıştır. Hattın tasarımında 2. Bölümde anlatılan Gaussiyen ve ışın demet optiği yöntemlerinden yararlanılarak analitik hesaplamalar yapılmıştır.

Tasarım çalışmasında, hat boyunca kullanılacak aynaların odak uzaklıkları hesaplanırken öncelikle hattın büyütme oranlarına bakılmıştır. Bu aşamada öncelikle M23, M25 ve M27 aynaları bütün bir sistem düşünülerek (M_{sis1}) aynaların büyütme oranına bakılmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 TARLA U90 optik demet hattı büyütme oranları ve uzaklıklar

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi sistemlerin ayrı ayrı büyütme oranları belirlenmiştir. Bu büyütme oranlarından yola çıkarak Çizelge 4.8'de tanımlandığı gibi diyagnostik masası üzerinde oluşan demet belinin son aynaya olan uzaklığından M_{sis_1} oranına ve buradan da M23 aynasından önce oluşan demet belinin bu aynaya olan uzaklığı hesaplanabilir (Denklem 2.105). Aynı şekilde iki ayna arası uzaklıktan yola çıkarak da aynaların demet beli genişliklerine olan uzaklıklarına ulaşılabilir. Bu uzaklıklardan faydalanılarak M21 aynasının odak uzaklığı, 2.106 ve 2.107 denklemleri Excel dosyası içerisinde kullanılarak hesaplanmaktadır.

Aynı yöntem kullanılarak M_{sis2} (M23 ve M25 aynalarını kapsayan sistem) oranı belirlenmiştir ve bu oran diğer büyütme oranıyla bağlantı kurulması yöntemiyle tüm aynaların odak uzaklıklarının hesaplanması sağlanmıştır (Burada M_{sis1} ve M_{sis2} büyütme oranları optik hat boyunca kullanılabilir en uygun mesafe ve odak uzaklığı değerlerinin belirlenmesi yoluyla seçilmiştir).

Çizelge 4.9 TARLA U90 optik demet hattı Excel analitik hesaplamaları

M_{sis_1} (M23-25-27) (Büyütme oranı)	3.800
Son demet beli konumu (d_{i27}) (mm)	3300
2. demet beli konumu (d_{0-23}) (mm)	868.42
2. demet beli konumu (d_{i-21}) (mm)	871.58
Optik Kovuk – M21 aynası arası(d_{o_21}) (mm)	960.0
F21 (mm)	456.8
M_{sis_2} (M23-M25) (Büyütme oranı)	1.86
M23 öncesi demet beli (d_{0_23}) (mm)	868.4
3.beam waist($d_{i_s_iç}$) (mm)	1615.3
d_{0_27} (mm)	2184.7
M27 – diyagnostik masası (mm)	3300.0
F27 (mm)	1314.5
F23 (mm)	868.0
M23 – M25 arası	6600.0
F25 (mm)	1616.7

TARLA Tesisi'nde kurulacak olan U90 optik demet hattı tasarımı için hesaplamalar yapılarak, simülasyon işlemlerinde ZEMAX ve GLAD optik tasarım programları kullanılmıştır.

Çizelge 4.10 TARLA U90 taşınım hattı ayna değerleri

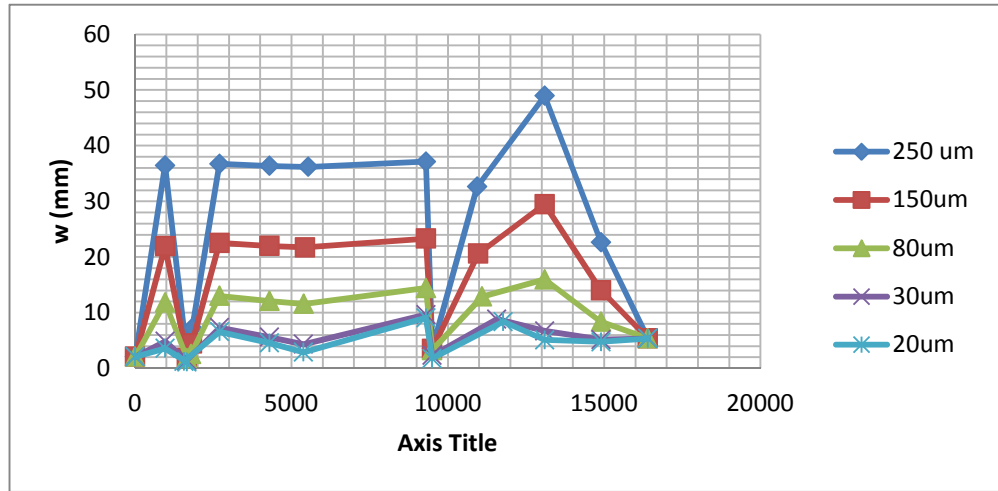
Ayna Numarası	Odak Uzaklığı(mm)	Yol Uzunluğu(mm)
M21	F21= 456,828	960
M22	F22 = Düzlem	1660
M23	F23 = 868,000	2700
M24	F24 = Düzlem	4300
M25	F25 = 1616,727	9300
M26	F26 = Düzlem	9500
M27	F27 = 1314,490	13100
M28	F28 = Düzlem	14900

Çizelge 4.11 TARLA U90 optik demet parametreleri ($D_h=6\text{mm}$, $\lambda=250\text{ }\mu\text{m}$)

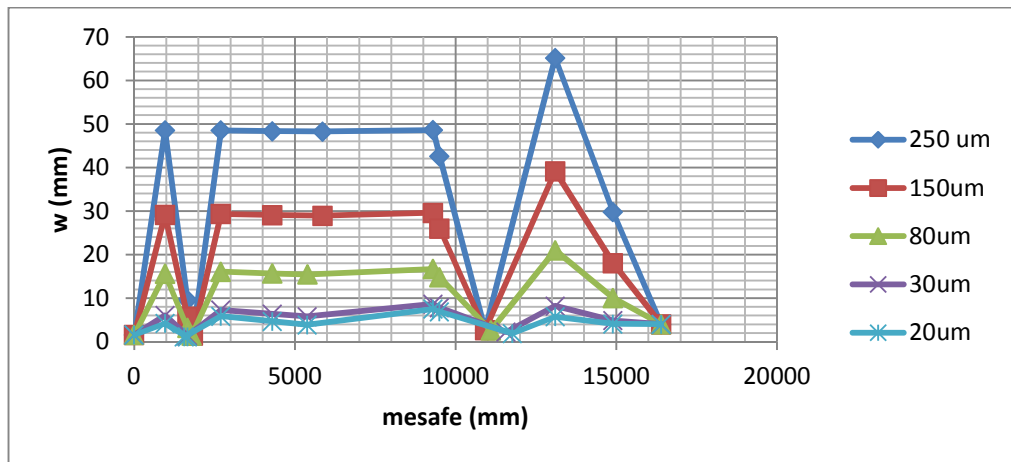
Ayna Numarası	Yol Uzunluğu(mm)	Rayleigh uzunlukları (mm)	Demet Çapları (mm)
M21	960	45,132	36,439
M22	1660	45,132	7,248
M22- M23 arası	1827	45,132	1,895
M23	2700	45,132	36,723
M24	4300	16458,939	36,361
M24 – M25 arası	5534	16458,939	36,191
M25	9300	16458,939	37,126
M26	9500	156,146	32,634
M26 – M27	10937	156,146	3,525
M27	13100	156,146	48,954
M28	14900	362,561	22,638
Diyagnostik Masası	16400	362,561	5,376

Belirlenmiş olan odak uzaklıkları kullanılarak yapılan analitik hesaplamalar sonucunda Çizelge 4.10’ da hesaplanmış olan uzaklıklar ve bu uzaklıklara bağlı oluşan demet çapları grafiği çizildiği zaman hat boyunca demet dağılımı gözlemlenebilmektedir (Denklem 2.109).

Undulatörlerden elde edilen lazer ışınımı 4.5 ve 6.0 mm’lik rezonatör çıkışındaki açıklıklardan dışarı alınacaktır. Bu açıklık değerlerine göre 20 μm ile 250 μm aralığında değişen değerler için hat boyunca lazerin demet çapları şekil 4.8 - 4.9’daki gibi değişim göstermektedir.



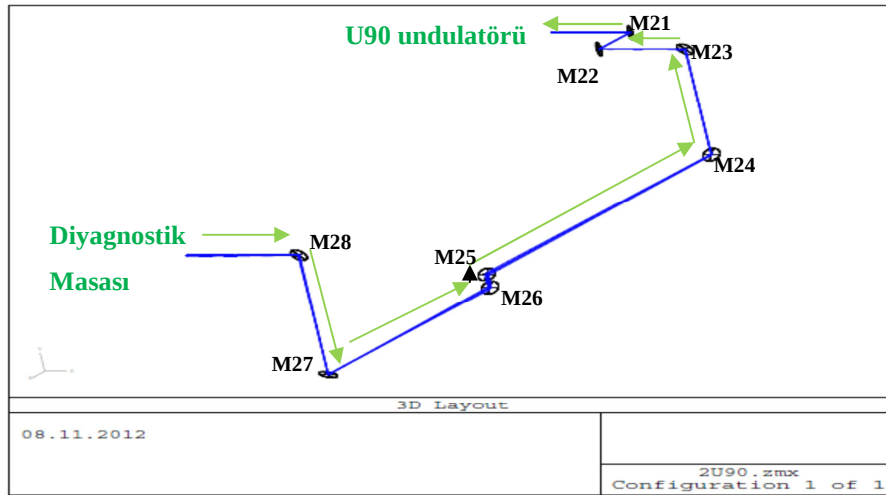
Şekil 4.14 $D_h=6.0$ mm için U90 SEL iletim hattı boyunca demet çapları



Şekil 4.15 $D_h=4,5$ mm için U90 SEL iletim hattı boyunca demet çapları

Grafiklerden de gözlemlendiği gibi minimum demet çaplarının oluştuğu bölgelerde, demet çapı dalga boyundan bağımsızdır.

TARLA optik demet hattının tasarımı, ZEMAX programı kullanılarak yapılmıştır. GLAD ve ZEMAX çıktılarının değerleri karşılaştırılarak demet hattı tasarımının doğru yapıp yapılmadığı teyit edilmiştir (Ek3 ve Ek4). Aşağıdaki şekilde TARLA U90 demet hattının ZEMAX programı üzerinden elde edilen 2 boyutlu çizimi görülmektedir. Program üzerinden bu ekranı büyütürsek demet bellerinin nerelerde oluştuğunu ve optik demetin nerelerde genişleyip daraldığını da gözlemlemek mümkündür.



Şekil 4.16 TARLA U90 optik demet hattı zemax görüntüsü

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, Kalkınma Bakanlığı tarafından desteklenen Türk Hızlandırıcı Merkezi Konulu YUUP (Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) projesi kapsamında kurulumu devam etmekte olan TARLA tesisinde, U25 ve U90 undulatörlerinden elde edilecek olan 2 ile 250 μm aralığında kızılötesi serbest elektron lazerlerinin undulatörlerden çıktıktan sonra diyagnostik odasına kadar olan optik demet hatları için tasarım çalışmaları yapılmıştır.

Optik demet hattı tasarımında ilk aşamada analitik yöntemler incelenmiştir ve bu inceleme sonucunda lazer iletimi konusunda iki yöntemin kullanılması gerektiğine karar verilmiştir. Bu yöntemlerden ilki Gaussiyen optiği yöntemidir. Bu yöntemde lazer demetinin ideal Gaussiyen demet gibi davrandığı yaklaşım kullanılmaktadır. Bu durum, lazerin temel enine modda (TEM_{00} mod) çalıştığını yani Gaussiyen fonksiyonlarına uygun olduğunu göstermektedir. İkinci bir yöntem ise ışın demet optiği yöntemidir. Bu yöntemde ise lazer demetinin dalga cephesine dik bir şekilde hareket ettiği düşünülerek, sistemin ve ışının büyütme oranlarının (M) hesaplanması yardımıyla, odak uzaklıkları ve aynalar arası mesafeler en küçük demet dağılma değerine göre belirlenmektedir. Hesaplamalarda dikkat edilmesi gereken kural, demet çapının 10 cm'lik optik demet hattı boru çapı değerini geçmemesidir, çünkü geçtiği takdirde demet boru çeperlerine çarpacak ve demette kayıplar oluşacaktır.

Tasarımın ikinci aşamasında ise analitik hesaplamalar sonucunda U25 ve U90 optik demet hatları için ayna değerleri ve hat boyunca kullanılacak mesafeler seçilerek, belirlenen değerler üzerinden simülasyon işlemi iki optik tasarım programı ile yapılmıştır. Başlangıç aşamasında YUUP projesi tarafından temin edilen ZEMAX optik tasarım programı kullanılmıştır. Bu programa hesaplanan uzaklık ve ayna değerleri girilerek hattın optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca ELBE 'de 2012 yılında yapılan staj esnasında çalışma imkanı bulunan GLAD optik tasarım programı yardımıyla hattın simülasyonunu yapmak için ikinci bir tasarım programı kullanılmış ve optik hattın değerlerinin kontrol edilmesine olanak sağlanmıştır. GLAD programında bir script dosyası üzerinden tasarım için gerekli komutlar girilerek hattın simülasyonu

yapılmıştır. Programda özellikle belirtilmesi gereken parametreler ise dalga boyu, başlangıç demet çapı değeri, ayna değerleri ve aynalar arası uzaklıklardır.

GLAD programının dezavantajı, tek dalga boyu yani monokromatik ışın üzerinden hesaplama yapabilmesidir. Bu nedenle hesaplamak istediğimiz her bir dalga boyu için yeni bir script dosyası oluşturulmalıdır. GLAD programının ZEMAX programından üstünlüğü ise optik rezonatör içerisinde lazer demetinin, aynalar arasında her geçişindeki kazanç ve kayıp değerlerinin hesaplanabilmesidir.

U25 ve U90 optik demet hattı demet çapları değişimleri ve diyagnostik masası üzerinde oluşan demet beli parametreleri çizelge 5.1 - 5.2’de açık bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 5.1 TARLA U25 optik demet hattı demet beli değerleri ($D_h=2\text{mm}$, $\lambda=20\mu\text{m}$)

	Hesaplanan demet beli (mm)	Zemax demet beli (mm)	GLAD demet beli (mm)
M11	22.75	22.75	22.75
M12	12.26	12.30	12.30
M13	15.66	15.70	15.70
M14	5.76	5.76	5.76
Diyagnostik masası	1.40	1.40	1.40

Çizelge 5.2 TARLA U90 optik demet hattı demet belı değerleri ($D_h = 6\text{mm}$, $\lambda = 100\mu\text{m}$)

	Hesaplanan demet belı (mm)	Zemax demet belı (mm)	GLAD demet belı (mm)
M21	14,40	14,70	14,40
M22	30,74	30,70	30,70
M23	15,65	15,70	15,65
M24	14,89	14,70	14,70
M25	16,81	16,80	16,80
M26	14,96	15,00	15,02
M27	19,81	19,80	19,80
M28	9,92	9,92	9,92
Diyagnostik masası	5,74	5,38	5,38

Çizelge 5.1’den, U25 optik demet hattı için analitik hesaplama ve simülasyon sonuçlarının uyum sağladığı görölmektedir. U25 undulatöründen elde edilen $20\ \mu\text{m}$ dalgaboyuna sahip lazer demeti rezonatörden 2mm açıklıktan dışarı alındığı zaman, diyagnostik masası üzerinde 1.399 mm’lik bir demet çapı oluşturacak şekilde taşınımı yapılmıştır. Aynı şekilde U90 optik demet hattı için ise $100\ \mu\text{m}$ için inceleme yapıldığında, optik rezonatör çıkış çapı 6mm için incelendiği zaman diyagnostik masası üzerinde 5.73 mm’lik demet belı olduğu gözlemlenmektedir. Sonuçlar ELBE tesisi ile karşılaştırıldığında uyumluluk gösterdiği görölmektedir.

Optik hat tasarımının üçüncü aşamasında ise hat boyunca kullanılacak optik bileşenler araştırılmıştır. Optik bileşenlerden aynalar göz önüne alındığı zaman, U25 undulatörü ile diyagnostik masası arasında iletimi sağlayacak olan hatta 3 odaklayıcı 1 düzlem ayna, U90 undulatörü ile diyagnostik masası arasında ise 4 odaklayıcı 4 düzlem ayna

yerleştirilmesine karar verilmiştir. Bu aynalarda kızılötesi bölgede en iyi yansıtıcılık ve en az deformasyona sahip bakır alttaş üzerine altın kaplama kullanılacaktır. Bu şekilde kayıpların en aza indirgenmesi planlanmaktadır. Optik hat boyunca vakumlama işlemi için mekanik pompa kullanılacak ve oluşacak nem ise kuru azot kullanılarak giderilecektir. İletim hatları arasında farklı vakumlama işlemlerinden dolayı, iletim hattı ve salındırıcılardaki vakumu koruyabilmek için kızılötesi geçirgen pencereler kullanılacaktır. Işın kaybı olmaması için aynalar Brewster açısında yerleştirilecektir. Undulatör çıkışlarında ve diyagnostik üzerinde vakum geçişlerinde geniş dalgaboyu aralığında ışın iletimi yapılacağı için kızılötesi bölgede en geniş dalgaboyu aralığında geçirgenliğe sahip elmas pencere kullanılacaktır. Deney istasyonları girişinde ise laboratuarlardaki deneylerde kullanılacak dalgaboyu aralığında en iyi geçirgen olan pencere kullanılacaktır. Bunlar ihtiyaçlara göre TPX, Kuartz, BaF₂, CaF₂, ZnSe gibi optik geçirgen pencereler arasından seçilecektir.

TARLA tesisi için belirlenmiş olan son tasarımlara göre çizimleri yapılan optik demet hattının U25 ve U90 undulatörlerinden diyagnostik masasına kadar olan bölümünde hattın tasarım işlemi tamamlanmıştır. Hatların analitik hesaplamaları yapılarak, GLAD ve ZEMAX programları tarafından simülasyon işlemleri yapılmıştır. Diyagnostik masasından deney istasyonlarına kadar olan hattın hesaplamaları ve simülasyonlarına ise bundan sonraki çalışmalarda bakılacaktır.

KAYNAKLAR

- Alda, J. 2003. Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation, University Complutense of Madrid, Madrid, 2, 1-15.
- Allan, R. J., Allen, M. P., Alexandrov, A. S., Ashfold M. R. , Atkinson, R., Avaldi, L. , Bain, L.D., Bancroft, J., Barrett, S.D., Barron, L.D. 2001, The Science Case for 4GLS, A World Leading Facility for UK Science, Presented by The UK Scientific Community
- Altarelli, M., Brinkmann, R., Chergui, M., Decking, W., Dobson, B., Düsterer, S., Grübel, G., Graeff, W., Graafsma, H., Hajdu, J., Marangos, J., Pflüger, J., Redlin, H. 2007. The European X-Ray Free Electron Laser Technical Design Report. ISBN 978-3-935702-17-1. Hamburg
- Anonim. 2008. Web Sitesi: <http://thm.ankara.edu.tr/>, Erişim Tarihi: 21.05.2012
- Anonymous, 1988, WINDOWS, The Center for Occupational Research and Development, ISBN 1-55502-024-0, Web sitesi: http://cord.org/cm/leot/course06_mod04/mod06_04.htm, Erişim Tarihi: 03.06.2012
- Anonymous, 1996. <http://www.newport.com>, Copyright 1996-2013 Newport Corporation. Erişim Tarihi: 15.07.2012
- Anonymous, 2007. ZEMAX Optical Design Program- User's Guide Version 6.0. Focus Software, Radiant ZEMAX, .Incorporated, Tucson, AZ 85731 USA, Web Sitesi: <http://www.radiantzemax.com/en/design/>, Erişim Tarihi: 17.11.2011
- Anonymous, 2009, Web Sitesi: <http://www.ispoptics.com/designofpressurewindow.html>, Copyright ISP Optics Corp., Erişim Tarihi: 03.06.2012
- Anonymous, 2010. Getting Started with ZEMAX Version 1.1.3. Radiant ZEMAX, ZEMAX Development Corporation.
- Anonymous, 2012.a. GLAD Commands Version 5.7, Copyright, 1998-2012 Applied Optics Research. Web Sitesi: www.aor.com, Erişim Tarihi: 15.07.2012
- Anonymous, 2012.b. European X-European XFEL flyer "Enlightening science" , Copyright by DESY, Web sitesi: http://www.xfel.eu/overview/in_brief/, Erişim Tarihi: 26.02.2012
- Anonymous, 2012.c. Web sitesi: <http://www.infraredtraininginstitute.com/newsite/infrared-transparent-materials> Infrared Training Institute, Erişim Tarihi: 27.03.2012
- Anonymous,. 2012.d. Optics Selection Guide, Thorlabs Corp. Web sitesi : <http://www.thorlabs.com/>. Erişim Tarihi: 15.11.2011
- Bass, M., Van Stryland, E.W. (eds.). 1994. Handbook of Optics vol. 2 (2nd ed.), McGraw-Hill, ISBN 0070479747.
- Bennett, H. E., Bennett, J. M. 1978. "Polarization , " in Handbook of Optics , W . G . Driscoll and W . Vaughan , eds . McGraw-Hill , New York
- Benson, S. 1989. Spreadsheet for calculating the performance of free-electron laser. 1-4, CEBAF.

- Bilderback, D., Elleaume, P., Weckert, E. 2005. Review of third and next generation synchrotron light sources, publishing of Journal Of Physics B: Atomic, Molecular And Optical Physics, stacks.iop.org/JPhysB/38/S773
- Clarke J. 2004. Insertion Devices for Free Electron Lasers. ISBN: 9780198508557
eISBN: 9780191708770
- Cushing, D.H. 2011, Enhanced Optical Filter Design, SPIE Press, ISBN13: 9780819483584, Arizona.
- Çetinkaya, H. 2006. Zemaxte Lidar için Optik Sistem Tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Danışmanı: Prof. Dr. Cankut Örmeci.
- Dattoli, G., Renieri, A., Torre, A. 1993. Lecture on Free Electron Laser Theory and Related Topics, World Scientific Publishing Co. PTE. LTD., ISBN: 981-02-0565-1
- G. Dattoli and A. Renieri, 1984, Experimental and theoretical aspects of Free-Electron Lasers, Laser Handbook Vol. 4, ed by M.L. Stich and M.S. Bass, North Holland, Amsterdam
- Erbay, E. 2012, Kızılötesi Bölgede Serbest Elektron Lazerinin Taşınım Hattı Tasarımı, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Danışmanı: Prof. Dr. Ergün Kasap.
- Fisher, R.E. 2008. Professional Optical System Design. Second Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc. 199-308.
- Fraser, J., Sheffield, R. 1987, High-Brightness Injectors for RF-Driven Free Electron Lasers, IEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-23, No.9
- Gensch, M. 2011. The optical resonators of the ELBE FELs, Web Sitesi: <http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=10500&pNid=471>, Erişim Tarihi: 26.08.2011
- Gencer, Y., Kaya, Ç., Yavaş, Ö. 2007. Sinkrotron Işınımı ve Serbest Elektron ALzeri için Salındırıcı ve Zigzaglayıcı Megnetler, III. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, 17-19.09.2007, Muğla, Bodrum.
- Griot, M., SeeWolf, A. Optical Coatings, 2013. Copyright by CVI Melles Griot and Auburn SeeWolf, LLC, Web Sitesi: <http://www.cvimellesgriot.com/>, Erişim Tarihi: 27.01.2012
- Hecht, Eugene. 1990. Optics, Addison Wesley, 2nd edition, Chapter 9, ISBN 0-201-11609-X.
- Karslı, Ö. 2006. Hızlandırıcılara Dayalı Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri (Ir-Fel) Optimizasyonu, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Danışmanı: Prof. Dr. Ömer Yavaş, Ankara
- Mabe, R. 1995, Limit Cycle Behaviour in Free Electron Lasers, Thesis Advisors: R. Armstead, Naval Postgraduate school, California, 9-61.
- Maimann, T. H. 1960. Stimulated Optical Radiation in Ruby, Hughes Research Laboratories, California, Nature, ISSN: 0028-0836, EISSN: 1476-4687, 187, 1

- Malacara, D., Malacara, Z. 1994. Handbook of Optical Design, Marcelu Erkker Inc. ISBN: 0-8247-4613-9. 95-127, New York.
- Mathias, B. 1997, *A high brightness electron beam for Free Electron Lasers*. Thesis, Laser Physics and Nonlinear Optics (LPNO)
- Mete, Ö. 2006. Parçacık Hızlandırıcılarına Dayalı Işınım Kaynaklarının Fiziksel Karakteristikleri. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Danışmanı: Prof. Dr. Ömer Yavaş, 51-68, Ankara
- Milonni, P. W., Eberly, J. H. 2010. Laser Physics, 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc. ISBN-13: 978-0470387719.
- Özkorucuklu, S. 2012. Status of T.A.R.L.A, TAC Light Sources Users' Meeting - 2012 (LSUM-2012). 6-7 October, 2012. Gölbaşı Campus of Ankara University, Ankara, Turkey
- Özkorucuklu, S., Aksoy, A. (Eds.) 2010. The Technical Design Report of Turkish Acceleration and Radiation Labrotary at Ankara
- Robinson, M. 2006. A Thermographer's Guide to Infrared Windows, http://www.irinfo.org/articles/article_7_1_2006_robinson.html, Erişim Tarihi: 23.05.2012
- Saleh, B., Teich, M. C. 1991. Fundamentals of Photonics, ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback); 0-471-2-1374-8
- Seidel, W., Grosse, E., Justus, M., Leege, K., Proehl, D., Schlenk, R., Winter, A., Wohlfarth, D., Wuensch, R.. 2007. The IR Beam Transport System From The ELBE-FELs To The Users Labs, Forschung Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Germany.
- Seidel, W., Winter, A., Wuensch, R. 2003. The IR Beam Line of Free Electron Lasers at The FZ Dresden, Rossendorf, Germany
- Smith, W. J. 2000. Modern Optical Engineering. Chief Scientist, Kaiser Electro-Optics Inc. Carisbad, California and Consultant in Optics and Design. 3rd edition. 173-214.
- Talman, R. 2006. Accelerator X-Ray Sources, Copyright by John Wiley, ISBN: 978-3-527-40590-9
- Tekin, S. 2008. Osilatör SEL Sisteminde Optik Kavite Yapıları ve Lazer Kazanç Mekanizmaları, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Danışmanı: Prof. Dr. Ömer Yavaş. 4-27, Ankara
- Thompson, N. R., McNeil, B. W. J. 2010, X-ray free-electron lasers, Nature Photonics, Scottish Universities Physics Alliance, Fizik Bölümü, Strathclyde Üniversitesi, İngiltere
- Tural, M. 2008. , Kırmızıaltı Serbest Elektron Lazerlerinin Temel Ve Uygulamalı Araştırmalarda Kullanımı, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Danışmanı: Prof. Dr. Ömer Yavaş, Ankara

- Wünsch, R. 2003 a The optical beamline from the FEL (U27) to the diagnostic cave,
Web Sitesi: <http://www.hzdr.de/FWK/MITARB/fwkf/wuensch/internal/OblU27.html>, Erişim Tarihi: 26.08.2011
- Wünsch, R. 2003 b. The optical beamline from the FELs to the user laboratories, Web
Sitesi: <http://www.hzdr.de/FWK/MITARB/fwkf/wuensch/internal/OblU27.html>, Erişim Tarihi: 26.08.2011
- Wünsch, R. 2003 c. The optical beamline from the FEL (U50) to the diagnostic cave,
Web Sitesi:<http://www.hzdr.de/FWK/MITARB/fwkf/wuensch/internal/OblU27.html>, Erişim Tarihi: 26.08.2011
- Yavaş, Ö. 2001. 4. Nesil Işınım Kaynağı Olarak Serbest Elektron Lazerleri. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK I) 25–26.Ekim.2001, TAEK, Ankara.

EKLER

EK 1 TARLA U25 Hattı GLAD Çıktı Ekranı ($D_h=2$ mm, $\lambda=20$ μm)

EK 2 TARLA U90 GLAD Programı Veri Giriş Ekranı ($D_h=6$ mm, $\lambda=100$ μm)

EK 3 TARLA U90 Hattı GLAD Çıktı Ekranı ($D_h=6$ mm, $\lambda=100$ μm)

EK4 TARLA U90 Optik Demet Hattı ZEMAX Gaussian Paraksiyel Demet Parametreleri ($D_h=6$ mm, $\lambda=250$ μm)

EK 1 TARLA U25 Hattı GLAD Çıktı Ekranı ($D_h=2$ mm, $\lambda=20$ μ m)

```

Surrogate gaussian: Beam No.: 1
Waist location          Waist size
  zwaistx    zwaisty    waistx    waisty
  576.50000  576.50000    7.00000003E-02  7.00000003E-02
Plane(1) or curved(0) reference    Local beam half width
iplanx    iplanx    wsx    wsy
  1        1        7.00000003E-02  7.00000003E-02
Surrogate phase radius    Zwaist-to-zreff
radx      rady      zdistx    zdisty
  1.00000002E+20  1.00000002E+20    0.0000000    0.0000000
Rayleigh distance    M^2 values
zrayx      zrayy      M2x
M2y
  1.5393804    1.5393804    1.0000000    1.0000000

```

```

plot0, ver. 1, PLOT 2, Thu Nov 08 12:49:53 2012, 99
Surrogate gaussian: Beam No.: 1
Waist location          Waist size
  zwaistx    zwaisty    waistx    waisty
  576.50000  576.50000    7.00000003E-02  7.00000003E-02
Plane(1) or curved(0) reference    Local beam half width
iplanx    iplanx    wsx    wsy
  1        1        7.00000003E-02  7.00000003E-02
Surrogate phase radius    Zwaist-to-zreff
radx      rady      zdistx    zdisty
  1.00000002E+20  1.00000002E+20    0.0000000    0.0000000
Rayleigh distance    M^2 values
zrayx      zrayy      M2x
M2y
  1.5393804    1.5393804    1.0000000    1.0000000

```

```

## prop 250 cm/ M11 mirror
Coord. Beam Center    Beam Radius    Field Size
Beam No.  x    y    x    y    x    y
  1  0.00  0.00  11.4  11.4  112.  112.

```

```

beam no.  zreff  direction  zwaistx  zwaisty  ip_x  ip_y  attrib
1  826.50  positive  576.50  576.50  0  0  1

```

```

plot1, ver. 1, PLOT 3, Thu Nov 08 12:49:53 2012, 99

```

```

Surrogate gaussian: Beam No.: 1
Waist location          Waist size
zwaistx    zwaisty    waistx    waisty
576.50000  576.50000    7.00000003E-02  7.00000003E-02
Plane(1) or curved(0) reference    Local beam half width
iplanx    iplanx    wsx    wsy
0        0        11.368425  11.368425

```

```

Surrogate phase radius      Zwaist-to-zreff
radx      rady      zdistx      zdisty
250.00948      250.00948      250.00000      250.00000
Rayleigh distance      M^2 values
zrayx      zrayy      M2x      M2y
1.5393804      1.5393804      1.0000000      1.0000000

#### M11 mirror 90.99
Vertex Position      Vertex Matrix
T-cosines U-cosines V-cosines
x      250.000      1.000000      0.000000      0.000000
y      0.00000      0.000000      1.000000      0.000000
z      0.00000      0.000000      0.000000      1.000000

lens with focal lengths = 90.99 in x 90.99 in y
beam no.      Radx      Rady      Unitsx      Unitsy
vertex ray propagation
Beam      Center Coordinates (cm)      Beam Radius (cm)      Field Radius (cm)
1 0.00      0.00      0.00      11.4      11.4      112.      112.

1 0.000      0.000      -143.1      -143.1      3.487      3.487

Surrogate gaussian: Beam No.: 1
Waist location      Waist size
zwaistx      zwaisty      waistx      waisty
969.55219      969.55219      4.00540940E-02      4.00540940E-02
Plane(1) or curved(0) reference      Local beam half width
iplanx      iplanx      wsx      wsy
0      0      11.368427      11.368427
Surrogate phase radius      Zwaist-to-zreff
radx      rady      zdistx      zdisty
-143.05396      -143.05396      -143.05219      -143.05219
Rayleigh distance      M^2 values
zrayx      zrayy      M2x
M2y
0.50401533      0.50401533      1.0000000      1.0000000

```

EK 2 TARLA U90 GLAD Programı Veri Giriş Ekranı ($D_h=6$ mm, $\lambda=100$ μm)

```
echo/off
time/init
nsize=128*4
array/set 1
nbeam 6
vc=2.9979e9
lambda=100 #um
wavelength/set 0 lambda
zR=200
w0=0.01*sqrt(zR*lambda/pi)
unit0=w0*sqrt(pi/nsize) list
unit=unit0
units/set 0 unit unit
status/gaussian
gaussian/cir 0 1 w0
#
prop [Lu/2]
rad1=0.2*0.7

clap/cir/res ibeams=1 rad1
gauss/c 1 1 rad1
geodata/list 1
geodata/set/msquared/values 1 1 1 #kbeam M2x M2y
plot/watch plot0
title behind aperture 0.2
plot/liso/intensity 1 1 2 2
geodata/list 1

C ## prop 96
prop 96
status/parax
plot/watch plot1
title 96 behind aperture
plot/liso/intensity 1 1 xrad=5 yrad=5 nslice=256 min=0
plot/meta/wmf
geodata/list 1
vertex/locate/absolute 96 0 0
lens/toric/element 1 46.085 46.085
fitgeo/spatial 1
geodat/list 1

end
```

EK 3 TARLA U90 Hattı GLAD Çıktı Ekranı ($D_h=6$ mm, $\lambda=100$ μ m)

```

Surrogate gaussian: Beam No.: 1
Waist location          Waist size
zwaistx      zwaisty      waistx      waisty
  576.50000    576.50000    0.20999999  0.20999999
Plane(1) or curved(0) reference  Local beam half width
iplanx      iplanx      wsx      wsy
  1          1          0.20999999  0.20999999
Surrogate phase radius      Zwaist-to-zreff
radx      rady      zdistx      zdisty
  1.00000002E+20  1.00000002E+20    0.0000000    0.0000000
Rayleigh distance      M^2 values
zrayx      zrayy      M2x      M2y
  13.854424    13.854424    1.0000000    1.0000000

Surrogate gaussian: Beam No.: 1
Waist location          Waist size
zwaistx      zwaisty      waistx      waisty
  576.50000    576.50000    0.20999999  0.20999999
Plane(1) or curved(0) reference  Local beam half width
iplanx      iplanx      wsx      wsy
  1          1          0.20999999  0.20999999
Surrogate phase radius      Zwaist-to-zreff
radx      rady      zdistx      zdisty
  1.00000002E+20  1.00000002E+20    0.0000000    0.0000000
Rayleigh distance      M^2 values
zrayx      zrayy      M2x      M2y
  13.854424    13.854424    1.0000000    1.0000000

## prop 96 cm/ M21 mirror

      Coord. Beam Center      Beam Radius      Field Size
Beam No.  x      y      x      y      x      y
  1    0.00    0.00    1.47    1.47    14.3    14.3

beam no.  zreff  direction  zwaistx  zwaisty  ip_x ip_y attrib
  1    672.50   positive   576.50   576.50    0  0  1

plot1, ver. 1, PLOT 3, Wed Nov 07 13:53:10 2012,  99

Surrogate gaussian: Beam No.: 1
Waist location          Waist size
zwaistx      zwaisty      waistx      waisty
  576.50000    576.50000    0.20999999  0.20999999

```

```

Plane(1) or curved(0) reference      Local beam half width
iplanx      iplany      wsx      wsy
  0          0      1.4702060      1.4702060
Surrogate phase radius      Zwaist-to-zreff
radx      rady      zdistx      zdisty
 97.999428      97.999428      96.000000      96.000000
Rayleigh distance      M^2 values
zrayx      zrayy      M2x      M2y
 13.854424      13.854424      1.0000000      1.0000000

#### M21 mirror 46.828
      Vertex Position      Vertex Matrix
              T-cosines  U-cosines  V-cosines
x      96.0000      1.000000      0.000000      0.000000
y       0.00000      0.000000      1.000000      0.000000
z       0.00000      0.000000      0.000000      1.000000

lens with focal lengths = 45.68   in x  45.68   in y

beam no.      Radx      Rady      Unitsx      Unitsy
      vertex ray propagation
Beam  Center Coordinates (cm)  Beam Radius (cm)  Field Radius (cm)
 1  0.00   0.00   0.00   1.47   1.47   14.3   14.3

 1  0.000   0.000  -85.57  -85.57   0.4463   0.4463

spatial Centroid of beam 1 fit(x,y)cent      -7.3467E-09 -9.7119E-09
mean radii, fit(x,y)rad:      0.5682      0.5682
Surrogate gaussian: Beam No.: 1
Waist location      Waist size
zwaistx      zwaisty      waistx      waisty
 756.73529      756.73529      0.18381763      0.18381763
Plane(1) or curved(0) reference      Local beam half width
iplanx      iplany      wsx      wsy
  0          0      1.4702064      1.4702064
Surrogate phase radius      Zwaist-to-zreff
radx      rady      zdistx      zdisty
-85.572975      -85.572975      -84.235291      -84.235291
Rayleigh distance      M^2 values
zrayx      zrayy      M2x      M2y
 10.615103      10.615103      1.0000000      1.0000000

```

EK 4 TARLA U90 Optik Demet Hattı ZEMAX Gaussian Paraksial Demet Parametreleri ($D_h=6$ mm, $\lambda=250$ μ m)

Paraxial Gaussian Beam Parameters

File : C:\Users\btekiner\Documents\Zemax\beceriksiz\2U90.zmx
Title:
Date : 08.11.2012

Data for 250.0000 μ m.

Size : The radial beam size at the surface.
Waist : The radial beam waist.
Position : The distance from the waist to the surface.
Radius : The phase radius of curvature at the surface.
Divergence: The semi-angle of the beam asymptote.
Rayleigh : The Rayleigh range.
Units for size, waist, waist-z, radius, and Rayleigh are Millimeters.
Units for divergence semi-angle are radians.

Input Beam Parameters:

Waist size : 2.10000E+000
Surf 1 to waist distance: 0.00000E+000
M Squared : 1.00000E+000

Y-Direction:

Fundamental mode results:

Sur	Size	Waist	Position	Radius	Divergence	Rayleigh
STO	2.10000E+000	2.10000E+000	0.00000E+000	Infinity	3.78759E-002	5.54177E+001
2	4.20045E+000	2.10000E+000	9.60000E+001	1.27991E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
3	7.57266E+000	2.10000E+000	1.92000E+002	2.07995E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
4	1.11137E+001	2.10000E+000	2.88000E+002	2.98664E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
5	1.47021E+001	2.10000E+000	3.84000E+002	3.91998E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
6	1.83100E+001	2.10000E+000	4.80000E+002	4.86398E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
7	2.19278E+001	2.10000E+000	5.76000E+002	5.81332E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
8	2.55512E+001	2.10000E+000	6.72000E+002	6.76570E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
9	2.91783E+001	2.10000E+000	7.68000E+002	7.71999E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
10	3.28077E+001	2.10000E+000	8.64000E+002	8.67555E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
11	3.64388E+001	2.10000E+000	9.60000E+002	9.63199E+002	3.78759E-002	5.54177E+001
12	3.64388E+001	1.89512E+000	8.66608E+002	8.68959E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
13	3.64388E+001	1.89512E+000	8.66608E+002	8.68959E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
14	3.35038E+001	1.89512E+000	7.96608E+002	7.99165E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
15	3.05696E+001	1.89512E+000	7.26608E+002	7.29412E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
16	2.76365E+001	1.89512E+000	6.56608E+002	6.59710E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
17	2.47049E+001	1.89512E+000	5.86608E+002	5.90081E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
18	2.17754E+001	1.89512E+000	5.16608E+002	5.20551E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
19	1.88489E+001	1.89512E+000	4.46608E+002	4.51169E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
20	1.59272E+001	1.89512E+000	3.76608E+002	3.82017E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
21	1.30134E+001	1.89512E+000	3.06608E+002	3.13252E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
22	1.01145E+001	1.89512E+000	2.36608E+002	2.45217E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
23	7.24814E+000	1.89512E+000	1.66608E+002	1.78834E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
24	7.24814E+000	1.89512E+000	-1.66608E+002	-1.78834E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
25	7.24814E+000	1.89512E+000	-1.66608E+002	-1.78834E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
26	3.24083E+000	1.89512E+000	-6.26083E+001	-9.51421E+001	4.19661E-002	4.51319E+001
27	1.89558E+000	1.89512E+000	1.00000E+000	2.03788E+003	4.19661E-002	4.51319E+001
28	6.39248E+000	1.89512E+000	1.45392E+002	1.59401E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
29	1.06422E+001	1.89512E+000	2.49392E+002	2.57559E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
30	1.49597E+001	1.89512E+000	3.53392E+002	3.59155E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
31	1.92995E+001	1.89512E+000	4.57392E+002	4.61845E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
32	2.36493E+001	1.89512E+000	5.61392E+002	5.65020E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
33	2.80045E+001	1.89512E+000	6.65392E+002	6.68453E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
34	3.23629E+001	1.89512E+000	7.69392E+002	7.72039E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
35	3.67233E+001	1.89512E+000	8.73392E+002	8.75724E+002	4.19661E-002	4.51319E+001
36	3.67233E+001	3.61906E+001	2.83427E+003	9.84134E+004	2.19884E-003	1.64589E+004
37	3.67233E+001	3.61906E+001	2.83427E+003	9.84134E+004	2.19884E-003	1.64589E+004
38	3.66652E+001	3.61906E+001	2.67427E+003	1.03972E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
39	3.66104E+001	3.61906E+001	2.51427E+003	1.10258E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
40	3.65590E+001	3.61906E+001	2.35427E+003	1.17421E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
41	3.65108E+001	3.61906E+001	2.19427E+003	1.25651E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
42	3.64660E+001	3.61906E+001	2.03427E+003	1.35201E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
43	3.64245E+001	3.61906E+001	1.87427E+003	1.46409E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
44	3.63864E+001	3.61906E+001	1.71427E+003	1.59739E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
45	3.63516E+001	3.61906E+001	1.55427E+003	1.75847E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
46	3.63202E+001	3.61906E+001	1.39427E+003	1.95688E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
47	3.62922E+001	3.61906E+001	1.23427E+003	2.20714E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
48	3.62922E+001	3.61906E+001	-1.23427E+003	-2.20714E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
49	3.62922E+001	3.61906E+001	-1.23427E+003	-2.20714E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
50	3.62266E+001	3.61906E+001	-7.34265E+002	-3.69670E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
51	3.61906E+001	3.61906E+001	1.00000E+000	2.70897E+008	2.19884E-003	1.64589E+004
52	3.61953E+001	3.61906E+001	2.65735E+002	1.01969E+006	2.19884E-003	1.64589E+004
53	3.62298E+001	3.61906E+001	7.65735E+002	3.54539E+005	2.19884E-003	1.64589E+004

54	3.62975E+001	3.61906E+001	1.26573E+003	2.15289E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
55	3.63983E+001	3.61906E+001	1.76573E+003	1.55184E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
56	3.65319E+001	3.61906E+001	2.26573E+003	1.21828E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
57	3.66980E+001	3.61906E+001	2.76573E+003	1.00713E+005	2.19884E-003	1.64589E+004
58	3.68961E+001	3.61906E+001	3.26573E+003	8.62170E+004	2.19884E-003	1.64589E+004
59	3.71258E+001	3.61906E+001	3.76573E+003	7.57030E+004	2.19884E-003	1.64589E+004
60	3.71258E+001	3.52501E+000	1.63712E+003	1.65201E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
61	3.71258E+001	3.52501E+000	1.63712E+003	1.65201E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
62	3.66763E+001	3.52501E+000	1.61712E+003	1.63219E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
63	3.62270E+001	3.52501E+000	1.59712E+003	1.61238E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
64	3.57776E+001	3.52501E+000	1.57712E+003	1.59257E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
65	3.53283E+001	3.52501E+000	1.55712E+003	1.57277E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
66	3.48791E+001	3.52501E+000	1.53712E+003	1.55298E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
67	3.44300E+001	3.52501E+000	1.51712E+003	1.53319E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
68	3.39809E+001	3.52501E+000	1.49712E+003	1.51340E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
69	3.35318E+001	3.52501E+000	1.47712E+003	1.49362E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
70	3.30829E+001	3.52501E+000	1.45712E+003	1.47385E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
71	3.26340E+001	3.52501E+000	1.43712E+003	1.45408E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
72	3.26340E+001	3.52501E+000	-1.43712E+003	-1.45408E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
73	3.26340E+001	3.52501E+000	-1.43712E+003	-1.45408E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
74	2.45702E+001	3.52501E+000	-1.07712E+003	-1.09975E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
75	1.65683E+001	3.52501E+000	-7.17115E+002	-7.51115E+002	2.25713E-002	1.56146E+002
76	8.79887E+000	3.52501E+000	-3.57115E+002	-4.25389E+002	2.25713E-002	1.56146E+002
77	3.52508E+000	3.52501E+000	1.00000E+000	2.43825E+004	2.25713E-002	1.56146E+002
78	8.91837E+000	3.52501E+000	3.62885E+002	4.30073E+002	2.25713E-002	1.56146E+002
79	1.66956E+001	3.52501E+000	7.22885E+002	7.56613E+002	2.25713E-002	1.56146E+002
80	2.46991E+001	3.52501E+000	1.08288E+003	1.10540E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
81	3.27635E+001	3.52501E+000	1.44288E+003	1.45978E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
82	4.08527E+001	3.52501E+000	1.80288E+003	1.81641E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
83	4.89544E+001	3.52501E+000	2.16288E+003	2.17416E+003	2.25713E-002	1.56146E+002
84	4.89544E+001	5.37138E+000	3.28441E+003	3.32443E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
85	4.89544E+001	5.37138E+000	3.28441E+003	3.32443E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
86	4.63048E+001	5.37138E+000	3.10441E+003	3.14675E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
87	4.36571E+001	5.37138E+000	2.92441E+003	2.96936E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
88	4.10120E+001	5.37138E+000	2.74441E+003	2.79231E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
89	3.83698E+001	5.37138E+000	2.56441E+003	2.61567E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
90	3.57313E+001	5.37138E+000	2.38441E+003	2.43954E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
91	3.30973E+001	5.37138E+000	2.20441E+003	2.26404E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
92	3.04690E+001	5.37138E+000	2.02441E+003	2.08934E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
93	2.78481E+001	5.37138E+000	1.84441E+003	1.91568E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
94	2.52367E+001	5.37138E+000	1.66441E+003	1.74339E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
95	2.26382E+001	5.37138E+000	1.48441E+003	1.57297E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
96	2.26382E+001	5.37138E+000	-1.48441E+003	-1.57297E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
97	2.26382E+001	5.37138E+000	-1.48441E+003	-1.57297E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
98	2.04861E+001	5.37138E+000	-1.33441E+003	-1.43292E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
99	1.83509E+001	5.37138E+000	-1.18441E+003	-1.29540E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
100	1.62390E+001	5.37138E+000	-1.03441E+003	-1.16149E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
101	1.41609E+001	5.37138E+000	-8.84412E+002	-1.03304E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
102	1.21340E+001	5.37138E+000	-7.34412E+002	-9.13399E+002	1.48140E-002	3.62561E+002
103	1.01889E+001	5.37138E+000	-5.84412E+002	-8.09340E+002	1.48140E-002	3.62561E+002
104	8.38283E+000	5.37138E+000	-4.34412E+002	-7.37006E+002	1.48140E-002	3.62561E+002
105	6.82686E+000	5.37138E+000	-2.84412E+002	-7.46596E+002	1.48140E-002	3.62561E+002
106	5.72862E+000	5.37138E+000	-1.34412E+002	-1.11238E+003	1.48140E-002	3.62561E+002
IMA	5.37634E+000	5.37138E+000	1.55882E+001	8.44826E+003	1.48140E-002	3.62561E+002

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Begüm TEKİNER
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri : İstanbul
Doğum Tarihi : 24/08/1986
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu:

Lise : Beşiktaş Bingül Erdem Lisesi (2001-2003)

Üniversite: Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik
Bölümü (2004-2009)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik
Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2010 – Ocak 2013)

Bildiriler:

1. B.Tekiner, TARLA Kızılötesi Bölgede Işınım Yapan Serbest Elektron Lazerinin Taşınım Hattı Tasarımı, X. THM YUUP Çalıştayı, 9-11 Aralık 2011, HTE, Ankara Üniversitesi, Gölbaşı, Ankara
2. B.Tekiner, TARLA (THM IR SEL) Tesisi İçin Planlanan Lazer Taşınım Hatlarının Genel Parametreleri, XI. THM YUUP Çalıştayı, , 30 Kasım- 2 Aralık 2012, HTE, Ankara Üniversitesi, Gölbaşı, Ankara

Bilgisayar Yeterlilikleri:

C/C++, Linux İşletim Sistemi, Microsoft Office, ZEMAX, Beam Optics, MAD-X, GLAD