

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DİYOT UYARIMLI KATI HAL LAZER KAYNAKLARIYLA GÜNEŞ IŞIĞI
BENZETECİ TASARIM VE GELİŞTİRİLMESİ**

Hüseyin Yavuz KOCAOVA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARALIK 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DİYOT UYARIMLI KATI HAL LAZER KAYNAKLARIYLA GÜNEŞ IŞIĞI
BENZETECİ TASARIM VE GELİŞTİRİLMESİ**

Hüseyin Yavuz KOCAOVA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARALIK 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİYOT UYARIMLI KATI HAL LAZER KAYNAKLARIYLA GÜNEŞ IŞIĞI
BENZETEÇİ TASARIM VE GELİŞTİRİLMESİ

Hüseyin Yavuz KOCAOVA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARALIK 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİYOT UYARIMLI KATI HAL LAZER KAYNAKLARIYLA GÜNEŞ IŞIĞI
BENZETEÇİ TASARIM VE GELİŞTİRİLMESİ

Hüseyin Yavuz KOCAOVA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 27/12/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nuri ÜNAL

Prof. Dr. Murat CANPOLAT

Doç. Dr. Cumhuri Gökhan ÜNLÜ

Dr. Öğr. Üyesi Deniz KAYA

Dr. Öğr. Üyesi Erdi BİLGİÇ

ÖZET

DİYOT UYARIMLI KATI HAL LAZER KAYNAKLARIYLA GÜNEŞ IŞIĞI BENZETEÇİ TASARIM VE GELİŞTİRİLMESİ

Hüseyin Yavuz KOCAOVA

Doktora Tezi Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nuri ÜNAL

Aralık 2024; 135 sayfa

Güneş benzeteçleri güneşin cisimler üzerindeki çeşitli etkilerini laboratuvar ortamında gözlemlemek amacıyla kullanılırlar. Günümüzde güneş tayfına olan benzerliğinden dolayı ışık kaynağı olarak başta Ksenon-ark ampuller olmak üzere farklı kaynakların bulunduğu benzeteçler mevcuttur. Diyot uyarımlı katı hal lazerler ise ark ampullerine göre düşük güçlerde ve yaygın olan kaynaklardır. Ayrıca lazerlere ait ikinci harmoniklerin de kullanılarak güneş tayfına yaklaşılabilmesi böylece gereken lazer kaynak sayısının azaltılması hedeflenmiştir. Diyot uyarımlı lazer kaynak kullanımı ve ikinci harmonik üretimi tezin gerçekleşme zorluğunu artırabilecek olmasına rağmen maliyetleri ve kullanılabilirliği açısından gerekli görülmüştür. Çalışma mevcut lazer ve optik ekipmanlar referans alınarak modellenmiş ve elde edilen veriler hem güneş hem de mevcut güneş benzeteçleriyle kıyaslanarak ortaya konmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Güneş benzeteçi, İkinci harmonik üretimi, Lazer, Ksenon-ark ampul,

JÜRİ: Prof. Dr. Nuri ÜNAL

Prof. Dr. Murat CANPOLAT

Doç. Dr. Cumhuriyet Gökhan ÜNLÜ

Dr. Öğr. Üyesi Deniz KAYA

Dr. Öğr. Üyesi Erdi BİLGİÇ

ABSTRACT
**DESIGN AND DEVELOPMENT OF SUN LIGHT SIMULATOR WITH DIODE
PUMPED SOLID STATE LASER SOURCES**

Hüseyin Yavuz KOCAOVA

PhD Thesis in Physics

Supervisor: Prof. Dr. Nuri ÜNAL

December 2024; 135 pages

Solar simulators are used to observe various effects of the sun on objects in laboratory environment. This study focuses on the aging effects of the sun. Nowadays, there are simulators with different sources of light, mainly Xenon-arc bulbs due to their similarity to the solar spectrum. Diode-excited solid-state lasers are less powerful and more common sources than arc bulbs. It is also aimed to use the second harmonics of the lasers to approximate the solar spectrum, thus reducing the number of laser sources required. Although the use of diode-excited laser sources and second harmonic generation may increase the difficulty of realization of the thesis, it was deemed necessary in terms of cost and availability. The study was carried out theoretically by comparing existing laser and optical equipment and the data obtained were compared with both sun and existing solar simulators.

KEYWORDS: Laser, Second harmonic generation, Solar simulator, Xenon-arc Lamp,

COMMITTEE: Prof. Dr. Nuri ÜNAL
Prof. Dr. Murat CANPOLAT
Associate Prof. Dr. Cumhuri Gökhan ÜNLÜ
Assistant Prof. Dr. Deniz KAYA
Assistant Prof. Dr. Erdi BİLGİÇ

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın temel amacı güncel ihtiyaçlara katkı sağlayabilme çabasından kaynaklanmaktadır. Aslen teknoloji, üretim ve ticaretle geçen yılların birikimini fizikçi gençlere aktarabilmek ütopyasıyla başlayan eğitime devam sürecim, gençlerle ve akademik camiayla amaçladığım gelişmelere ulaşamamış olmanın burukluğuyla sona ermekte.

Ömrümün kalanında da bilimin, gerçeğin peşinden koşmayı adeta yaşam amacıma dönüştüren başta Atatürk'e, doktora programı ve tezin oluşturulmasında katkılarını esirgemeyen akademik danışmanın Sn. Prof.Dr. Nuri ÜNAL'a, tez izleme komitesi hocalarım Sn. Prof.Dr. Murat CANPOLAT ve Sn. Dr. Deniz KAYA'ya, her aşamada desteklerini sunan Sn. Prof.Dr. Nina TUNÇEL'e, canım kardeşim avukat Sn. Cemil ŞAHİN'e, canım annem Sn. Samiye KOCAOVA'ya, deneyin gerçekleşmesi katkılarından ötürü Sn. Dr. Afra ÇALIK'a, deneysel çalışmalardaki katkılarından ötürü Polisan Kimya AŞ. Arge Müdürü Sn. İbrahim Erdoğan'a Antalya satış sorumlusu Sn. Baykul BİLLA'ya teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1.Güneş Fiziği.	4
2.1.1.Dünyaya Ulaşan Güneş Kaynaklı Enerjiler.....	5
2.1.1.1.Güneşin Muhtemel Enerji Kaynakları.....	6
2.1.1.1.1.Füzyon Enerjisi.....	6
2.1.1.1.2.Güneş Yerçekimi Potansiyel Enerjisi.....	7
2.1.1.1.3.Güneşin Termal Enerjisi	8
2.1.2. Güneş Fiziği Ölçümleme Metotları	8
2.1.2.1.Radyometri	8
2.1.2.2.Fotometri	9
2.1.2.3.Spektrometri	12
2.1.3. Güneş Tayfının Maddeler Üzerindeki Yıpratıcı Etkileri	12
2.2.Güneş Benzeteçleri.....	15
2.2.1.Hava Yoğunluğu Katsayısı.....	15
2.2.2.Güneş Benzeteçlerinin Sınıflandırılması	17
2.2.3.Güneş Benzeteçlerinin Tipleri	21
2.2.3.1. Sürekli Işıma Yapan Benzeteçler	21
2.2.3.2. Darbeli veya Flaş Güneş Benzeteçleri.....	21
2.2.4. Güneş Benzeteçlerinde Kullanılan Işık Kaynakları.....	22
2.2.4.1. Karbon-Ark Lambaları	22
2.2.4.2. Argon-Ark Lambaları.....	23
2.2.4.3. Işık Saçan Diyotlar (LED).....	23
2.2.4.4. Süperkontinum lazer kaynakları	25

2.2.4.5. Metal Halid Ark Lambaları	25
2.2.4.6. Ksenon Ark Lambaları	25
2.3. Lazere Işığı	26
2.3.1. Lazerin Tarihçesi	26
2.3.2. Uyarılmış Salınım ve Nüfus Tersinmesi (Popülasyon İnversiyonu).....	26
2.3.3. Kendiliğinden Salınım.....	29
2.3.4. Emilim	30
2.3.5. Kara Cisim Radyasyonu	31
2.3.6. Enerji Seviyeleri Popülasyonu.....	33
2.3.7. Oran Eşitlikleri	34
2.3.8. Lazer	36
2.3.8.1. Üç Seviyeli Lazer	37
2.3.8.2. Dört Seviyeli Lazer	38
2.3.8.3. Eşik Kazancı Katsayısı ve Optik Rezonatör.....	38
2.3.8.4. Lazer Modları	40
2.3.8.4.1.Eksenel Modlar	40
2.3.8.4.2.Çapraz Modlar	41
2.3.8.4.3.Eksenel ve Çapraz Modlar Arasındaki Farklar	43
2.3.8.5.Lazer Çizgi Genişliği.....	43
2.3.8.6.Lazer Türleri	45
2.3.8.6.1.Katı Hal Lazerler	45
2.3.8.6.2.Gaz Lazerler.....	46
2.3.8.6.3.Yarı İletken Lazerler	47
2.3.8.6.4.Diyot Uyarımlı Katı Hal Lazerleri	49
2.3.8.6.5.Sürekli ve Darbeli Lazerler.....	51
2.3.8.7.Lazer Işığının Üstün Özellikleri	52
2.3.8.8. LED ve DPSSL arasındaki farklar	53
2.3.8.9. Optik İkinci Harmonik Oluşumu	54
2.3.8.9.1. İkinci Harmonik Dönüşümü için Kullanılan Kristaller	58
2.3.9. Lazer Optik Laboratuvarı	59
2.3.9.1. Lazer Optik Laboratuvarı Masası.....	59
2.3.9.2. Optik Yansıtıcılar ve Mercekler.....	61

2.3.9.3. Optik Test ve Kalibrasyon Ekipmanları	63
3. MATERYAL VE METOT	64
3.1. TEORİK ÇALIŞMALAR:	64
3.1.1. Kıyaslanan Cihaz (KC) Q-SUN XE-3 XENON Güneş Benzeteçi.....	64
3.1.1.2. Boya Numunelerinin Teste Hazırlanması	66
3.1.1.3 Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi:.....	66
3.1.2. FemtoPro Sanal Evren Lazer Optik Laboratuvarı:	68
3.1.2.1 FemtoPro Sanal Evren Lazer Laboratuvarı Deneyleri	75
3.1.3. Teorik Modelleme	78
3.1.3.1. Lazer Benzeteç İçin Uygun Tayf Standartı Belirleme	79
3.1.3.2 Yeryüzü İçin Lazer Güneş Benzeteçi Tayfi	80
3.1.3.3 Yeryüzü İçin Lazer Güneş Benzeteçi Tasarımı.....	81
3.1.3.4. Uydu İrtifası İçin Lazer Güneş Benzeteçi Tayfi.....	83
3.1.3.5. Uydu İrtifası İçin Lazer Güneş Benzeteçi Tasarımı	84
3.1.3.6. Ekipman Modelleme ve Tolerans.....	85
3.1.3.7. Ölçüm Noktaları	85
3.2. DENEYSEL KURULUM	87
3.2.1. Lazer Güneş Benzeteçi	87
3.2.2. Led Projektör İle Yaşlandırma	90
4. BULGULAR.....	92
4.1. TEORİK BULGULAR	92
4.1.1 Yeryüzü Lazer Güneş Benzeteçi Tasarımına Ait Bulgular:	92
4.1.2 Uydu İrtifası Lazer Güneş Benzeteçi Tasarımına Ait Bulgular:	94
4.2. DENEYSEL BULGULAR	98
4.2.1. Teorik Modellemeden Pratik Uygulamaya Lazer Güneş Işığı	98
4.2.1.1 Lazer Güneş Benzeteçi Kırmızı Mukavva Numune Testleri	103
4.2.1.2 Lazer Güneş Benzeteçi Mavi Mukavva Numune Testleri İnceleme	105
4.2.1.3 Lazer Güneş Benzeteçi Galvanizli Sac üzerinde Sprey Boya Numune Testleri	107
4.2.1.4 Yaşlanmanın Mikroskopik İncelenmesi.....	109
4.2.3. LED Projektör	110
4.3 KC Güç Tüketim Değerleri	111

5. TARTIŞMA	113
6. SONUÇLAR	118
6.1 Sanal evren çalışmalarının sonuçları	118
6.2. Uydu İrtifası Diyot Uyarımlı Katı Hal Lazer Güneş Benzeteçi	118
6.2.1 Yeryüzü Diyot Uyarımlı Katı Hal Lazer Güneş Benzeteçi	118
6.2.2 Uydu İrtifası Diyot Uyarımlı Katı Hal Lazer Güneş Benzeteçi	119
6.3 Deneysel Sonuçlar:.....	121
7. KAYNAKLAR	124
8. EKLER.....	128
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “**DİYOT UYARIMLI KATI HAL LAZER KAYNAKLARIYLA GÜNEŞ IŞIĞI BENZETEÇİ TASARIM VE GELİŞTİRİLMESİ**” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

27/12/2024

Hüseyin Yavuz KOCAOVA

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

λ	Dalga boyu, (nm)
h	Planck sabiti
L	Kesit Uzunluğu
n	Elektron taşıyıcı yoğunluğu
p	Boşluk taşıyıcı yoğunluğu
$\vec{q}$	Momentum geçiş vektörü, nm ⁻¹
s	saniye
Θ	Bragg açısı, derece
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
$\text{\AA}$	Angstrom
V	Uygulanan potansiyel fark, Volt
W	Watt
T	Tesla
c	Işık hızı
C	Coulomb
J	joule
V_H	Hall voltajı
w	Malzeme genişliği
d	Malzeme kalınlığı
n	Kırılma indisi
k	Sönüm katsayısı

C°	Santigrat derece
I	Akım
N	Taşıyıcı konsantrasyonu
ϵ_0	Vakumun dielektrik sabiti



Kısaltmalar

AlGaAs	: Aliminyum Galyum Arsenik
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BBO (β -BaB ₂ O ₄)	: Baryum Borat
CB _{r4}	: Carbon Tetrabromide
COD	: Lazerin ölümcül optik hasarı
CW	: Sürekli akım
DBR	: Dağınımlı Bragg yansıtıcıları
DFB	: Dağıtılmış geri beslemeli lazerler
DPSSL	: Diyot Uyarımlı Katı Hal Lazer
FWHM	: Yarı yükseklik tam genişliği
GaAs	: Galium Arsenic
GaSb	: Galium Antimonide
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
ISO	: Uluslararası Kalite Organizasyonu
JIS	: Japon Endüstriyel Standartlar Komitesi
KC	: Kıyaslanabilir Q-sun xe-3 ksenon –ark cihazı
KTP (KTiOPO ₄)	: Potasyum Titanil Fosfat
LAZER	: Uyarılmış yayılım ile ışığın güçlendirilmesi
LD	: Lazer Diyot
LiIO ₃	: Lityum İodat
PPLN	: Dönemsel Kutuplu Kristaller
SHG	: İkinci Harmonik Üretimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 İstenen her dalga boyu için ayrı bir lazer kaynağı kullanılması durumundaki tasarım.....	2
Şekil 2.1. Güneşin dünyaya ulaşan elektromanyetik radyasyon tayfı	5
Şekil 2.2. Güneşin temel enerji kaynağı olan çekirdek füzyon reaksiyonu	6
Şekil 2.3. Güneşin maddeler üzerindeki yaşlandırma etkileri	13
Şekil 2.4. Güneşin yaşlandırma etkilerinin elektron mikroskopunda incelenmesi.....	14
Şekil 2.5. Hava yoğunluğu katsayısı AM 1,5 Zenitle 48,20 açıyı gösterir	16
Şekil 2.6. Hava kütlesi katsayısı A.M. hesaplanması.....	17
Şekil 2.7. Bazzi 2012, LED'ler ile gerçekleştirilmiş katı hal güneş benzeteçi tayfı	23
Şekil 2.8. Gunther M. 2020 LED güneş benzeteçi tayfı	24
Şekil 2.9. Bazzi 2012, LED'ler ile gerçekleştirilmiş katı hal güneş benzeteçi.....	24
Şekil 2.10. a) Emilim, b) Uyarılmış salınım, c) Kendiliğinden salınım	29
Şekil 2.11. Kara cisim ışıması tayfı	32
Şekil 2.12. Kara cisim tayfında T sıcaklığına sahip gaz molekülleri	33
Şekil 2.13. a) Üç seviyeli lazer, b) Dört seviyeli lazer	38
Şekil 2.14. Aynalar ve optik dengeleyici boşluktan oluşan lazer kazanç ortamı.....	39
Şekil 2.15. Lazer Eksenel modları a) Temel gösterim b) Lazerin Çizgi genişliği boyunca gösterim.....	40
Şekil 2.16. Lazer Çapraz Modları	42
Şekil 2.17. Lazer Çizgi genişliği.....	44
Şekil 2.18. Diyot Uyarımlı Lazer	50
Şekil 2.19. a) Darbeli lazer, b) Sürekli lazer.....	52
Şekil 2.20. ω frekansıyla gelen lazer ışını doğrusal olmayan $\chi^{(2)}$ duyarlılık katsayılı ortamdan geçince hem ω hemde 2ω ışın oluşumu	56
Şekil 2.21. İkinci Harmonik Üretim ve Dipol Dalgalarının Toplanması	56
Şekil 2.22. Işın doğrusal olmayan ortam boyunca yayıldıkça şiddeti azalır ve 2. harmonik dalganın şiddeti (başlangıçta sıfır) artar.....	57
Şekil 2.23. İkinci harmonik üretiminde kullanılan kristaller çift kırılma indisine sahiptir.....	58
Şekil 2.24. Lazer optik laboratuvarı masası.....	60
Şekil 2.25. Işın bölücü	62
Şekil 3.1. KC, Q-SUN XE-3 XENON ksenon ark güneş yaşlandırma benzeteçi	64

Şekil 3.2 KC güneş benzeteçi pozlama kabini.....	65
Şekil 3.3 Boya test numunesi yerleşime örnek.....	66
Şekil 3.4 Orta PVC bir boyada koyu renklerde 4 döngü sonrası gözlemlenen solma ve yaşlanma	67
Şekil 3.5 Orta PVC bir boyada açık renklerde 4 döngü sonrası gözlemlenen solma ve yaşlanma	67
Şekil 3.6 FemtoPro sanal evren optik laboratuvarı.....	69
Şekil 3.7 Sanal evren optik laboratuvarı güç metre	69
Şekil 3.8 Sanal evren optik laboratuvarı spektrometre	70
Şekil 3.9 Sanal evren optik laboratuvarı gecikme platformu.....	70
Şekil 3.10 Sanal evren optik laboratuvarı gecikme platformu uygulaması	71
Şekil 3.11 Sanal evren optik laboratuvarı eğitim ve uygulama seçenekleri	71
Şekil 3.12. Sanal evren optik laboratuvarı kontroller	72
Şekil 3.13 FemtoPro sanal evren optik laboratuvarı deney ortamı.....	75
Şekil 3.14. FemtoPro Würzburg Üniversitesi'nce geliştirilmiştir	76
Şekil 3.15. Sanal evrende gereken optik elemanların seçilmesi	76
Şekil 3.16. Sanal evrende optik elemanları yerleştirme.....	77
Şekil 3.17. Sanal evrende ikinci harmonik oluşum deneyi.....	77
Şekil 3.18 Güneş ve Ksenon Ark lambanın tayfları	78
Şekil 3.19. Güneş ve KC ait tayf (EK 4)	79
Şekil 3.20. Yeryüzü için diyot uyarımlı katı hal lazer güneş benzeteçi tasarımı.....	81
Şekil 3.21 Yeryüzü diyot uyarımlı katı hal lazer güneş benzeteçi için öngörülen tayf ..	82
Şekil 3.22 Uydu irtifası için diyot uyarımlı katı hal lazer güneş benzeteçi tasarımı	84
Şekil 3.23 Tek SHG kullanıldığı durumdaki ışın ölçüm noktaları	86
Şekil 3.24. İki adet SHG kullanıldığı durumdaki ışın ölçüm noktaları	86
Şekil 3.25. Deneyde kullanılan lazer kaynaklar	87
Şekil 3.26. Lazer kaynaklar kolimasyon lensine yönlendirilmiş durumda.....	88
Şekil 3.27. 395 nm 200 mW UV lazer, 525 nm 100 mW yeşil lazer, 650 nm 50 mW lazer kaynakların tayfları	88
Şekil 3.28. Sıcaklık ölçerler a) Unit UT320D kablolu b) Class JT-380CIR sensörlü ...	89
Şekil 3.29. Thorlabs CCS model spektrometre	89
Şekil 3.30. a)100 W led projektör b) led projektör soğutucular ile numune pozlamada.	90

Şekil 3.31. 100W led projektöre ait tayf, 330 nm UV, 450 nm mavi ve 650 nm kırmızı emisyonlar görülmektedir	90
Şekil 3.32. Solda lazer, sağda ise led projektörle numune üzerinde yaşlandırma pozlaması, yüzey sıcaklığı ölçülmekte ve soğutma kontrolü soğutucular ve fanla sağlanmaktadır	91
Şekil 4.1 Lazer 1 hattı ölçüm değerleri.....	92
Şekil 4.2. Yeryüzü lazer güneş benzeteçi tayfi	93
Şekil 4.3 Uydu seviyesi güneş benzeteçi lazer 1 hattı ölçümleri.....	95
Şekil 4.4. Uydu irtifası lazer güneş benzeteçi tayfi	96
Şekil 4.5. Lazer güneş ışığı.....	98
Şekil 4.6. Lazer güneş ışığı ve kontrol birimleri	99
Şekil 4.7. Lazer güneş ışığı yakın görünümü	100
Şekil 4.8. Mavi ve kırmızı mukavvalarla yapılan yaşlandırma çalışmaları.....	100
Şekil 4.9. Solda lazer güneş ışığı, sağda led projektörle yapılan yaşlandırmalar. Lazer 30 dakika led projektör ise 24 saat boyunca pozlanmıştır	101
Şekil 4.10. Thorlabs CCS model spektrometre, esnek fiber sensör aparatıyla lazer benzeteçle yaşlandırılan numunenin incelenmesi	101
Şekil 4.11. 30 dakika boyunca lazer güneş ışığı uygulanan kırmızı mukavvada oluşan solma	102
Şekil 4.12. Pozlanmamış kırmızı mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfi.....	102
Şekil 4.13. Pozlanmış kırmızı mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfi.....	103
Şekil 4.14. Pozlanmış ve pozlanmamış kırmızı mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfi birlikte görülmektedir	103
Şekil 4.15. 30 dakika boyunca lazer güneş ışığı uygulanan mavi mukavvadaki solma	104
Şekil 4.16. Pozlanmamış mavi mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfi	104
Şekil 4.17. Pozlanmış mavi mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfi	105
Şekil 4.18. Pozlanmış ve pozlanmamış mavi mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfi birlikte görülmektedir	105
Şekil 4.19. 24 saat boyunca lazer güneş ışığı uygulanan siyah boyalı sacdaki yaşlanma	106
Şekil 4.20. Pozlanmamış siyah boyalı galvanizli sacın beyaz floresan altındaki tayfi .	106
Şekil 4.21. Pozlanmış siyah boyalı galvanizli sacın beyaz floresan altındaki tayfi.....	107

Şekil 4.22. Pozlanmış ve pozlanmamış mat siyah boyalı numunenin beyaz floresan altındaki tayfları birlikte görülmektedir	107
Şekil 4.23. Siyah Mukavvada pozlama süresi arttıkça (5, 10, 30 ve 60 dak) siyahlık azalmakta olduğunun spektrumdaki görünümü.	108
Şekil 4.24. Siyah mukavvadaki yaşlanmanın mikroskopik görüntüleri	108
Şekil 4.25. Kırmızı mukavvadaki yaşlanmanın mikroskopik görüntüleri	109
Şekil 4.26. Mavi mukavvadaki yaşlanmanın mikroskopik görüntüleri	109
Şekil 4.27. 24 saat boyunca lazer uygulanan kırmızı mukavvada oluşan yaşlanma	110
Şekil 4.28. Led projektör ile 24 saat boyunca pozlanmış ve pozlanmamış	110
Şekil 4.29. KC tüketim değerleri (EK 6)	112
Şekil 5.1 Görünür bandtaki renk dalga boyları ve sürekli tayfta renklerin yerleşimi...	113
Şekil 5.2 Morötesi bandının detaylı gösterimi	114
Şekil 5.3. Lazer güneş benzeteci ile pozlamada sürekli sıcaklık kontrolü yapılmıştır .	115

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Güneşin Temel Özellikleri	4
Çizelge 2.2 Radyometrik ve Fotometrik Nicelikler	10
Çizelge 2.3 PV Güneş paneli testi için üretilmiş güneş benzeteçleri için kriterler.....	18
Çizelge 2.4 Güneş paneli testi için IEC 60904-9:2020 standartlarına göre hava yoğunluğu AM1.5G kriterleri	19
Çizelge 2.5. Yaşlandırma amaçlı güneş benzeteçleri ASTM G155 standardı (EK 3)....	20
Çizelge 2.6. Yaşlandırma amaçlı güneş benzeteçleri ISO 4892 standardı (EK 2)	20
Çizelge 2.7. Kendiliğinden ve uyarılmış salınımın özellikleri	28
Çizelge 2.8 Kendiliğinden salınımın enerji kaynağına göre sınıflandırılması.....	29
Çizelge 3.1 KC Test döngü açıklaması.....	65
Çizelge 3.2. Hesaplama çizelgesine örnek.....	68
Çizelge 3.3. Laboratuvardaki araçlar ve özellikleri	72
Çizelge 3.4. Yeryüzü güneş tayfında lazer benzeteçin orantısal olarak hesaplanmış değerleri	80
Çizelge 3.5. Uydu irtifası tayfında lazer benzeteçin orantısal olarak hesaplanmış değerleri... ..	83
Çizelge 4.1 Yeryüzü lazer güneş benzeteçi ölçüm noktalarındaki değerler	92
Çizelge 4.2. Yeryüzü lazer güneş benzeteçi kalite kontrol değerleri.....	94
Çizelge 4.3 Uydu irtifası lazer güneş benzeteçi ölçüm noktalarındaki değerler	95
Çizelge 4.4. Uydu irtifası lazer güneş benzeteçi kalite kontrol değerleri	97

1. GİRİŞ

Güneş, dünya üzerindeki yaşamın temel kaynağıdır ve bu nedenle güneş ışığının incelenmesi, bilimsel araştırmalar, mühendislik uygulamaları ve tarım faaliyetleri başta sayısız pek çok alanda büyük önem taşımaktadır.

Güneş benzeteçleri, günümüzde güneş ışığının yapay bir ortamda taklit edilmesini sağlayarak birçok farklı alanda önemli deneylerin gerçekleştirilmesine imkan tanır. Güneş enerjisi kullanımının yaygınlaşması hem çevresel hem de ekonomik açılardan giderek artan bir öneme sahip olmuştur. Güneş benzeteçleri, doğal güneş ışığını taklit ederek, güneş enerjisi uygulamalarının yanı sıra tarım, malzeme bilimi ve çevresel araştırmalar gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu bağlamda, güneş benzeteçleri iki ana grupta ele alınabilir ki bunlar; fotovoltaik (photovoltaic-PV) güneş panelleri ya da tarımsal çalışmalar gibi güneş ışığından faydalanma diğeri ise güneşin maddeler ve dokular üzerindeki yaşlandırma etkilerinin gözlemlenmesidir. Güneş panellerinin çalışma performanslarını test etme veya tarımsal amaçlı güneş benzeteçleri ile malzemeleri yaşlandırma amaçlı benzeteçler arasında güç ve hacim açılarından farklılıklar bulunmaktadır.

Güneş benzeteçlerinin ilk kullanım alanı, PV güneş panellerinin test edilmesi olmuştur. Bu sistemler, güneş ışığının elektrik enerjisine dönüştürülmesi amacıyla güneş panellerinden faydalanır. Güneş panelleri, PV hücreler yardımıyla güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirebilir. Ancak doğal güneş ışığının şiddeti ve özellikleri, günün saatine, mevsime ve hava koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden, güneş benzeteçleri bu konuda önemli bir rol üstlenmektedir.

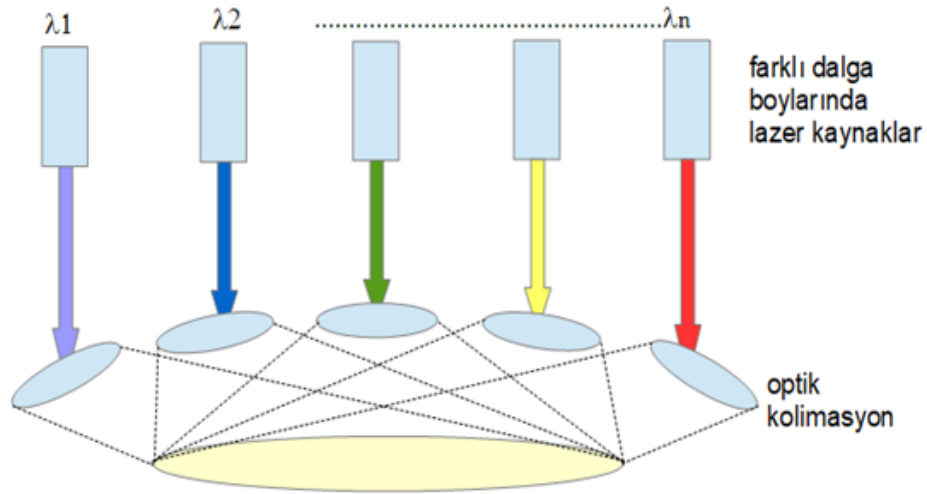
Laboratuvar ortamlarında çalışabilen güneş benzeteçleri, güneşinkine benzer belirli bir ışık şiddeti ve tayfi sağlayarak, güneş panellerinin verimliliğini test etmek için kullanılır. Bu ortamda, hücrelerin karşılaştığı farklı ışık koşulları ve bu koşullar altında enerji üretim kapasiteleri ve verimlilikleri ölçülür. Bu tür deneyler, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve iyileştirilmesi açısından kritik bir önem taşır. Ayrıca, güneş panellerinin uzun ömürlü ve sürdürülebilir olabilmesi için gereken aşınma ve yıpranma testleri de gerçekleştirilmektedir.

Güneş benzeteçleri, tarım ve botanik araştırmaları açısından da büyük bir fayda sağlamaktadır. Bu bağlamda, bitkilerin büyüme süreçleri üzerinde güneş ışığının etkilerini incelemek için laboratuvar ortamlarında kontrol edilen ışık koşulları oluşturulmaktadır. Çeşitli bitki türlerinin farklı ışık yoğunlukları ve tayfları altında nasıl tepkiler verdiği, verimlilikleri ve metabolizmaları üzerinde gözlemler yapılmaktadır. Bu çalışmalar, özellikle ürünü artırma, hastalıklara karşı dayanıklılığı artırma ve genetik çeşitliliği sağlama açısından büyük bir potansiyele sahiptir.

Güneş benzeteçleri, tarımsal araştırmalarda kullanılan bir takım kontrol sistemleri ile birliktelik gösterir. Örneğin, belirli bir nem oranı ve sıcaklık altında güneş ışığını taklit etmek, bitkilerin biyolojik ritimlerini ve fotosentez süreçlerini optimize etmeye yardımcı olur. Bu tür denemeler hem tarımsal verimliliği artırma hem de bitki sağlığını koruma hedeflerini desteklemek amacıyla gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışma güneşin maddeler ve dokular üzerindeki yıpratıcı, yıkıcı ve soldurucu etkilerini gözlemlemek amacıyla üretilen güneş yaşlandırma benzeteçleri kapsamındadır. Bu tür cihazlar, çeşitli malzemelerin, özellikle de polimer ve kompozitlerin güneş ışığına karşı dayanıklılığını incelemeye olanak tanır. Malzemelerin özellikle yıpratıcı morötesi (UV) ve ısıtıcı kızılötesi (IR) ışınlarına maruz kalması, moleküler, polimer veya kovalent bağların hasarı dolayısıyla kimyasal yapılarında değişiklikler meydana getirerek yaşlanma sürecinin hızlanmasına sebep olur. Güneşten gelen UV ışınları yüksek enerjili fotonlar içerdiğinden, atom ve molekül düzeyinde polimerlerin yapısını etkileyerek, kırılma ve çatlama gibi bozulma polimer zincirlerinde kopmalara sebep olur. Bu durum, malzemenin mekanik dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkiler yaratır. Diğer taraftan, kızılötesi ışınlar, malzemeler üzerinde ısı artışına neden olarak termal stres oluşturur. Bu stres, polimerlerin devamlılığını etkileyen önemli bir faktördür. Isı ile genişleme ve daralma, zamanla malzeme yüzeyinde çatlama ve deformasyonlara yol açar.

Güneş ışınının görünür dalga boyundaki bileşenleri de malzemelerin renklerinde solmalarına neden olabilir. Mekanik özelliklerin yanı sıra estetik nitelikleri de etkileyen bu değişim, özellikle dış mekan boya ve kaplama malzemeleri için kritik bir sorun haline gelir. Dış mekanda kullanılan polimer ve kompozit ürünlerin, estetik görünümelerini korumaları beklenir; dolayısıyla, güneş ışığına bağlı olarak meydana gelen renk solmaları, kullanılabilirliklerini doğrudan etkiler. Bu çalışmalar, inşaat, otomotiv ve plastik sanayileri gibi alanlarda; malzeme seçim süreçlerini ve uzun ömürlü ürün tasarımı için önemli bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 1.1 İstenen her dalga boyu için ayrı bir lazer kaynağı kullanılması durumundaki tasarım.

Güneş yaşlandırma benzeteçleri kullanarak, malzemelerin ne kadar sürede yıprandığı ve hangi koşullarda bozulduğu test edilebilmektedir. Aynı zamanda, güneş ışığının etkilerine dayanıklı yeni malzemelerin geliştirilmesine yönelik araştırmalara da olanak tanımaktadır. Güneş yaşlandırma benzeteçleri genellikle hızlandırılmış benzeteç (accelerated simulator-AS) özelliğinde üretilerek on güneş otuz güneş gibi birim zamanda güneşin yıpratıcı etkilerini hızlandırarak taklit ederler.

Şekil 1.1 tez konusu lazer benzeteçiyle güneş tayfını taklit etmek amacıyla gerekli her dalga boyu için bir kaynağı gerektirecek tasarım bulunmaktadır. Mevcut ışık saçan diyot (light emitting diode, LED) kaynakları kullanan benzeteçler bu mantıkla üretilmektedir. Fakat Lazer ışığının şiddetinin yüksek olması ikinci, üçüncü ve dördüncü harmoniklerinde çeşitli tekniklerle aynı birer kaynakmış gibi yeni bir dalga boyunda üretilmesine imkan tanımaktadır. Bu çalışmada lazerin ikinci üçüncü ve dördüncü harmonikleri de incelenmiş böylece gereken lazer kaynak sayısının azaltılabileceği gösterilmiştir.

Çalışma halen endüstride kullanılan yaşlandırma benzeteçleri referans alınarak ve temin edilebilecek diyot uyarımlı lazer kaynaklar, optik düzenekler ve ikinci harmonik üretimiyle modellenmiş, elde edilen sonuçlar yaşlandırma benzeteçleri ve güneşe göre kıyaslanmıştır.

Çalışma üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk iki aşama teorik son aşama ise deneyseldir. İlk aşamada Würzburg Üniversitesi'nce geliştirilen FemtoPro sanal evren lazer optik laboratuvarında lazer optik ve ikinci harmonik oluşumu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından sanal evren laboratuvarında kazanılan deneyimler neticesinde güneş benzeteçleri yeryüzü ve uydu irtifası için matematiksel olarak modellenmiştir. Deneysel aşamada ise mor ötesi, yeşil ve kırmızı lazer kaynakları ile lazer güneş ışığı elde edilmiş bu ışık değişik numunelere uygulanarak yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1.Güneş Fiziği

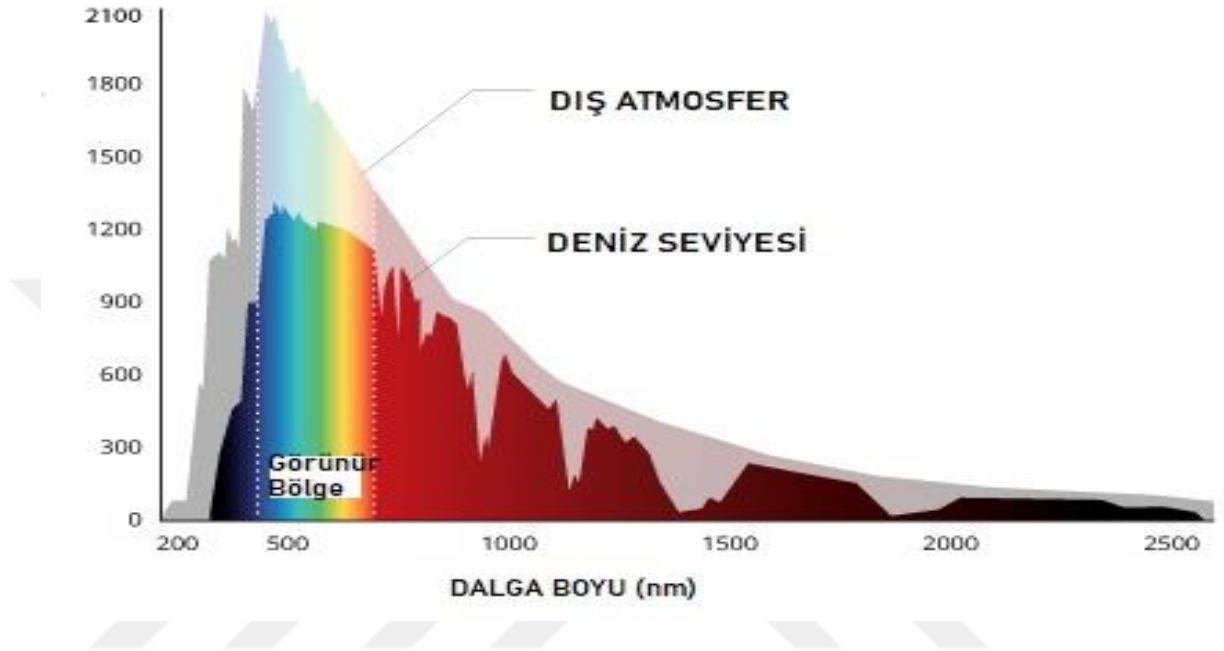
Güneşte enerji oluşumu, güneş fiziğinin etkileyici süreçlerinden biridir ve bu süreç, bizler için hayati öneme sahiptir. Güneş'in çekirdeğinde, hidrojen atomlarının helyuma dönüşmesiyle gerçekleşen termonükleer füzyon reaksiyonları sonucunda büyük miktarda enerji açığa çıkar. Güneşin temel özellikleri Çizelge 2.1 de görülmektedir (NASA 2024).

Çizelge 2.1. Güneşin Temel Özellikleri:

Dünyaya olan uzaklığı	149.600.000 km
Kütle (10 ²⁴)	$M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30}$ kg
Çap	1 $R_{\odot}$ = 695700 km
Mutlak yoğunluk	1408 kg /m ³ -
Işınım	1,368 kW/ m ²
Yüzey yerçekimi	274 m/s ²
Eylemsizlik momenti (I/MR ²)	0,070
Parlaklık	3,85 x 10 ²³ kW
Etkin sıcaklık	5778 K
Yüzey rüzgar hızı	300-700 km/s
Dönüş periyodu (ekvator)	25 gün
Dönüş hızı (ekvator)	2 km/s
Yaşı	$4,6 \times 10^9$ yıl = 4,6 Gyr
Manyetik alan gücü	Genel güneş $\sim 10^{-4}$ T Güneş noktaları $\sim 0,4$ T
Yıldız sınıflandırması	G2V
Mutlak görsel büyüklük, M_v	+4,83
Görsel büyüklük, m_v	-26,74

2.1.1.Dünyaya Ulaşan Güneş Kaynaklı Enerjiler:

Güneş enerjisi, Dünya üzerindeki hayatın devamı için gerekli olan ısı ve ışığı sağlar. Güneş'in yüzeyindeki radyasyon yoğunluğu yaklaşık dünya atmosferi dışında ve yeryüzünde farklıdır. Bunun neden atmosferik süzme etkileridir ve bu durum Şekil 2.1'deki tayf içerisinde gösterilmiştir (Fontenla J. 1991).



Şekil 2.1 Güneşin dünyaya ulaşan elektromanyetik radyasyon tayfı

Dünya'nın yüzeyine düşen güneş ışığının miktarı, atmosferik koşullara bağlı olarak değişiklik gösterir ve 0 ile 1100 W/m² arasında değişebilir. Güneş enerjisi, dünya yüzeyine ulaşan ve yaşamın temel kaynağını oluşturan enerjidir. Güneş ışınlarının dünyaya ulaşan şiddetini hesaplamak için:

$$S_d = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (1)$$

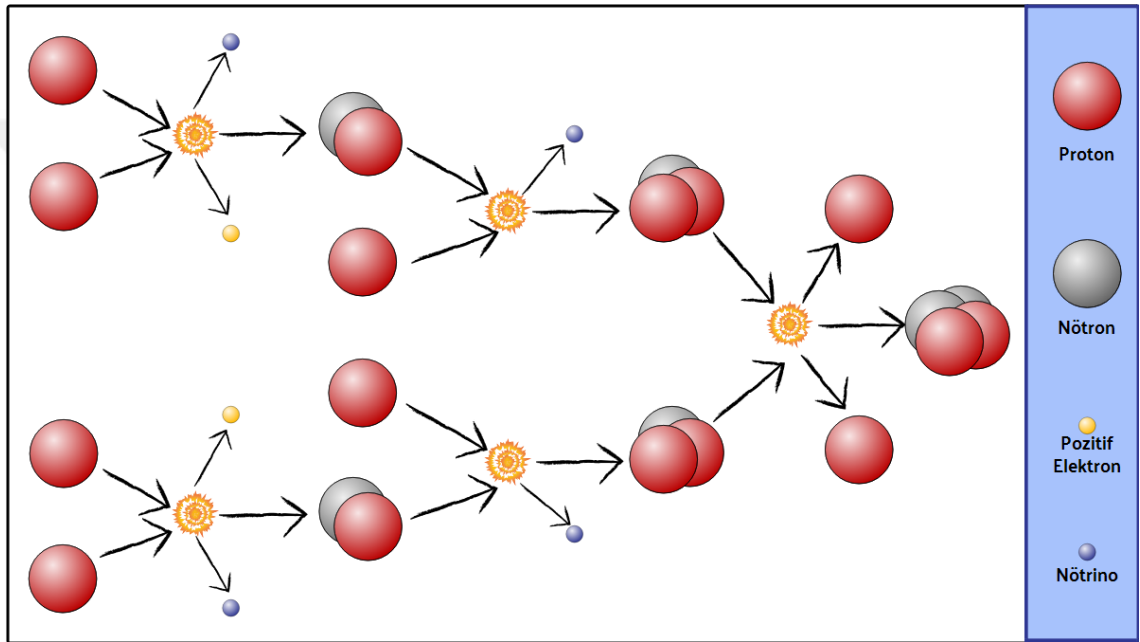
Burada S_d Solar Flux Yoğunluğu, L Solar parlaklık = ($3,9 \times 10^{26}$ W), d güneş dünya arası mesafe = ($1,5 \times 10^{11}$ m) olduğundan $S_d = 1370$ W/m² olarak bulunur. Fakat dünyada deniz yüzeyinde ölçüm yapıldığında atmosferik etkiler neticesinde bu değer yaklaşık 1000 W/m² bir değerdedir. (Sterhov 2019)

Bu enerjinin dünyaya ulaşan küçük bir bölümü bile, insanlığın mevcut enerji tüketiminden çok daha fazladır. Güneş enerjisi sistemleri, özellikle 1970'lerden sonra teknolojik ilerlemeler ve maliyetlerin düşmesiyle birlikte hızla gelişmiştir. Güneş enerjisi, çevresel olarak temiz bir birincil enerji kaynağı olarak kabul edilmekte ve giderek daha fazla kullanılmaktadır.

2.1.1.1 Güneşin Muhtemel Enerji Kaynakları:

2.1.1.1.1 Füzyon Enerjisi:

Güneşin enerji üretimi, yıldızlar arası bir bulutun kütle çekimsel çöküşünü ve güneşin çekirdeğinde hafif elementlerin nükleer füzyonuyla Şekil 2.2' deki gibi modellenmiştir. Temel füzyon reaksiyonu, küçük bir miktar kütle kaybıyla birlikte 4 Hidrojen (H) protonunun (p) bir helyum çekirdeği (He) oluşturması yani $4p \rightarrow He$ reaksiyonu şeklinde açıklanabilir (Dunlap R. 2021). İncelenmesi gereken füzyonun gerçekten Güneş'in (ve yıldızların) enerjisinin kaynağı mıdır sorusunun cevabıdır.



Şekil 2.2. Güneşin temel enerji kaynağı olan çekirdek füzyon reaksiyonu.

Bu soru, gözlemsel kanıtlar ve teorik modellerin birleşik bir sonucudur. Güneş'in çekirdeğinde meydana gelen yoğun enerji ve basınç, hidrojen atomlarının füzyonunu mümkün kılar. Bu işlemde, az miktarda kütle enerjiye dönüşür. Einstein'ın ünlü $E=mc^2$ denklemi, bu dönüşümün nasıl işlediğini açıklar. Bu enerji, güneşten yayılan ışık ve ısı olarak bize ulaşır.

Güneş'in ana enerji üretimi, yalnızca füzyon ile açıklanabilir. Güneş'in tahmini yaşı ve enerji çıkışı, sadece nükleer füzyonun sağlayabileceği miktarda enerjiyi destekler. Ayrıca, güneşten yayılan ışığın tayfı, füzyon reaksiyonlarının beklenen ürünlerini göstermektedir.

Sonuç olarak, gözlemsel ve teorik kanıtlar, füzyonun Güneş ve diğer yıldızların enerji kaynakları olduğuna dair güçlü bir kanıt sunmaktadır. Bu güçlü reaksiyon, evrenin temel enerji kaynağıdır, bu sayede güneş sistemi ve yaşam süregelir.

2.1.1.1.2. Güneşin Çekim Potansiyel Enerjisi:

Güneş, dünyanın yörüngesinde kalmasını sağlayan temel etkidir. Bu, güneş ile dünya arasındaki kütleçekim kuvveti nedeniyle oluşur. Güneşin dünyaya uyguladığı bu kuvvet, dünyanın güneşe doğru bir ivme kazanmasına sebep olur. Ancak dünya, güneşin etrafında hareket eden bir yörüngede kalır çünkü bu ivmenin yönü sürekli olarak değişir ve dünyayı güneşin etrafında döndürür (Poole G. 2019).

Dünyanın güneş etrafındaki yörüngesindeki bu hareket, dünyada depolanmış potansiyel yerçekimi enerjisini temsil eder. Bu enerji, dünyanın güneşe olan uzaklığı nedeniyle mevcuttur. Eğer dünya güneşe doğru hareket etseydi, bu potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşür ve dünyanın hızı artardı. Ancak dünyanın yörüngesi istikrarlı olduğundan, bu enerji depolanmış olarak kalır.

Bu potansiyel yerçekimi enerjisi, dünyadaki birçok doğal olayın oluşmasına katkıda bulunur. Örneğin, gelgitler güneş ve ayın dünyaya uyguladığı yerçekimi kuvvetleri nedeniyle meydana gelir. Bu kuvvetler, dünyadaki suların birikmesine ve çekilmesine sebep olarak gelgitleri yaratır.

Güneşin dünyaya uyguladığı çekimi kuvveti, dünyanın yörüngesini ve dolayısıyla iklimimizi, mevsimlerimizi ve yaşamın varlığını etkiler. Bu kuvvet, evrenimizin işleyişindeki temel güçlerden biridir ve dünyanın evrimi üzerinde derin bir etkisi vardır.

Güneş, büyük bir gaz ve toz bulutunun yerçekimsel çöküşü sonucunda oluşmuştur. Bu bulutun radyal simetriye sahip olduğunu ve başlangıç kütlelerinin $M_r = M(r)$ (r : radyal uzaklık) olduğunu varsayalım. Kütle yoğunluğu ρ olan

$$\Delta m = \rho \times 4\pi r^2 \Delta r \quad (2)$$

büyükliğindeki bir kütle parçası Δm için oluşan çekimi (3) inceleyelim.

$$\Delta E_G = \int_{\infty}^r g(s) \Delta m ds = \frac{GM_r}{s^2} (\rho^4 \pi r^2 \Delta r) ds \quad (3)$$

Kütle çekim kuvveti nedeniyle, kütle parçası sonsuzlukta sıfır potansiyel enerjiye sahipken, M kütleyle ulaştığında enerjisi azalır. Bu potansiyel enerji farkı, çekimsel enerji olarak (3) açığa çıkar.

$$\Delta E_G = \left[-\frac{GM_r}{s} \right]_{\infty}^r \rho 4\pi r^2 \Delta r = -\frac{GM_r}{r} \rho 4\pi r^2 dr \quad (4)$$

Çekimsel potansiyel (4) enerjinin hesaplanması için, kütle parçasının M kütlelerini oluşturan her bir kütle elemanının üzerine uyguladığı çekim kuvvetinin R 'ye göre integralini almak gerekir.

$$E_G = \int_0^R \frac{GM_r}{r} \rho 4\pi r^2 dr \quad (5)$$

Çekimsel potansiyel enerjiyi Ω ile gösterelim.

2.1.1.1.3. Güneşin Termal Enerjisi:

Çekimsel çöküş, Güneş'in oluşumunda büyük önem taşır. Çöküş sırasında açığa çıkan enerji, güneşi ısıtarak nükleer füzyon reaksiyonlarının başlamasına yol açar. Hidrostatik dengede yani gaz basıncı çekim ile dengelendiğinde güneşin toplam enerjisi E , termal enerjisi U ve Ω arasındaki bağıntı (5):

$$E = U + \Omega \quad (6)$$

Dengede $\Omega = -2U$ ve $E = U = \Omega / 2$ buradan:

* Güneş enerjisinin kaynağı termal enerji veya çekim enerjisi olamaz;

* Güneş büzüldükçe ısınır: Güneş büzüldükçe potansiyel enerjisi azalır ve bu miktarın yarısı termal enerji, diğer yarısı ise radyasyon olarak ortaya çıkar.

Bütün bu veriler ışığında güneşin **ana enerjisinin füzyon reaksiyonundan** kaynaklandığı söyleyebilir (Wagner F. 2018).

2.1.2. Güneş Fiziği Ölçümleme Metotları:

Güneş fiziği, güneşin yapısı, bileşimi, dinamikleri ve aydınlatma etkisi gibi çeşitli yönlerini inceleyen bir bilim dalıdır ve bu alandaki araştırmaların doğruluğu, kullanılan ölçümleme metotlarına büyük ölçüde bağlıdır. Güneş'in yüzey sıcaklığını, manyetik alanlarını ve radyasyon yayılımını incelemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Özellikle, spektroskopi, güneş ışığının farklı dalga boylarındaki bileşenlerini analiz ederek güneşin kimyasal bileşimini ve fiziksel koşullarını anlamamızda önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, fotometrik gözlemler sayesinde güneşin parlaklık değişimlerini takip edebilirken, heliosismoloji tekniği, güneşin iç yapısını anlamak için yüzeydeki dalgaların incelenmesini sağlamaktadır.

Uzaktan algılama yöntemleri, uzaydaki güneş gözlemevi ve teleskoplardan elde edilen verilerle birleştirilerek, güneşte meydana gelen patlayıcı olayların ve güneş rüzgarının özelliklerini saptamak için kullanılır. Güneş fiziği için geliştirilen diğer bir önemli ölçümleme metodu ise, magnetohidrodinamik benzetmeler olup, bu teknik, güneşin manyetik alanlarının dinamiklerini ve plazma akışlarını modelleyerek, güneşin davranışlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır. Tüm bu yöntemler, güneş fiziği alanında ilerlemeyi hızlandırmakta ve güneşin davranışlarının, insan yaşamı üzerindeki etkilerinin daha iyi analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

2.1.2.1 Radyometri

Radyometri, elektromanyetik radyasyonun, özellikle görünür ışığın enerjisini ve özelliklerini ölçen bir bilim dalıdır (Grum F. 2012). Elektromanyetik tayfın tüm aralığını kapsayan radyasyonun nicel olarak ölçülmesini ele alır. Radyometri, astronomi, uzaktan algılama, malzeme bilimi, tıp, fotoğrafçılık, aydınlatma ve ısı transferi gibi çeşitli alanlarda hayati önem taşır.

Radyometri, ışığın enerjisini ölçmek için çeşitli büyüklükleri ve birimleri kullanır. En temel büyüklüklerden biri radyant enerjidir (Q), belirli bir süre boyunca bir yüzeye düşen elektromanyetik radyasyonun toplam enerjisidir ve Joule (J) cinsinden ölçülür. Radyant güç (Φ) ise, radyant enerjinin zaman içindeki değişim hızını temsil eder ve Watt (W) cinsinden ölçülür. Radyant güç, bir ışık kaynağının salınım gücünü veya bir yüzeye düşen ışığın gücünü ifade eder.

Radyant yoğunluk (I), bir ışık kaynağının belirli bir yöne doğru yaydığı radyant gücün katı açığa göre değişimini ifade eder ve Watt/steradian (W/sr) cinsinden ölçülür. Radyant ışıınım (E), bir yüzeye düşen radyant gücün birim yüzey alanına göre değişimini gösterir ve Watt/metre kare (W/m^2) cinsinden ölçülür. Radyant pozlama (H) ise, bir yüzeye düşen toplam radyant enerjinin birim yüzey alanına göre değişimini ifade eder ve Joule/metre kare (J/m^2) cinsinden ölçülür.

Radyometri, elektromanyetik radyasyonu ölçmek için çeşitli teknikler ve cihazlar kullanır. En yaygın kullanılan cihazlar arasında radyometreler bulunur. Radyometreler, ışığın etkisiyle oluşan sıcaklık değişimini ölçen cihazlar olarak çalışırlar.

Fotodiyotlar, ışığı elektrik akımına dönüştüren yarı iletken cihazlar olup, ışığın gücünü ölçmek için kullanılırlar. Spektrometreler ise, ışığı dalga boylarına göre ayırarak, farklı dalga boylarındaki ışık enerjisinin miktarını ölçerler.

Radyometri, günlük yaşamımızda birçok uygulamaya sahiptir. Örneğin, uzaktan algılamada uydu ve uçaklar tarafından kullanılan sensörler, radyometrik ölçümler yaparak yeryüzünün yüzey özelliklerini belirler. Tıpta, radyometrik ölçümler, kanser tedavisinde ışığın etkisini izlemek ve teşhis koymak için kullanılır. Fotoğrafçılıkta, ışığın ölçümü doğru pozlama ve renk dengesi sağlamak için hayati önem taşır. Aydınlatma sektöründe, radyometrik ölçümler, ışık kaynaklarının performansını değerlendirmek ve enerji tasarrufu sağlamak için kullanılır.

2.1.2.2. Fotometri

Fotometri, ışığın ölçümüyle ilgilenen bir bilim dalıdır (McCluney W. 2014). Görsel ışığı, yani insan gözü tarafından algılanabilen ışığı ölçer ve bu ölçümle ilgili kavramları tanımlar. Fotometri, fizik, astronomi, mühendislik ve aydınlatma gibi çeşitli alanlarda önemli bir rol oynar.

Fotometri, ışık enerjisinin ölçülmesi ile başlar. Işık enerjisi, bir ışın demeti tarafından belirli bir zaman dilimi boyunca taşınan enerji miktarını ifade eder. Aydınlatma enerjisi Talbot (T_b) cinsinden ölçülür.

Fotometri, ayrıca ışığın yoğunluğunu ölçmek için kullanılır. Işık yoğunluğu, belirli bir alana düşen ışık enerjisinin miktarını ifade eder. Işık yoğunluğu, Watt/metrekare (W/m^2) cinsinden ölçülür.

Fotometride en önemli kavramlardan biri de ışık şiddetidir. Işık şiddeti, bir ışık kaynağının belirli bir yönde yaydığı ışık enerjisi miktarını ifade eder. Işık şiddeti, Kandil(cd) cinsinden ölçülür.

Çizelge 2.2. Radyometrik ve Fotometrik Nicelikler

Radyometrik Nicelik	Sembol	Birim	Tanım	Fotometrik Nicelik	Sembol	Birim
Işıma Enerjisi	Q_e	J (Joule)	$Q = \int \Phi_e dt$	Aydınlatma Enerjisi	Q_v	Talbot
Işıma Akısı (Güç)	Φ_e veya P_e	W (Watt) $W = \frac{J}{s}$	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	Aydınlatma Akısı	Φ_v	Lümen (lm)
Mutlak Açı	Ω_e	Steradian sr	$d\Omega = \frac{dA_{sphere}}{r^2}$	Mutlak açı	$Steradian$	sr
Işıma	L_e	$\frac{W}{m^2 sr}$	$L = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA_{s\perp}}$	Aydınlatma	L_v	$\frac{lm}{m^2 sr}$
Işıma Yoğunluğu	I_e	W/sr	$I = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Aydınlatma Yoğunluğu	I_v	Kandil $cd = \frac{lm}{sr}$
Işınım	E_e	$\frac{W}{m^2}$	$E = \frac{d\Phi_e}{dA_{he def}}$	Aydınlanma	E_v	$\frac{lm}{m^2}$ lüks = $\frac{lm}{m^2}$
Çıkış	M_e		$M = \frac{d\Phi_e}{dA_{kaynak}}$	Çıkış	M_v	$\frac{lm}{m^2}$

Fotometride kullanılan diğer önemli kavramlar şunlardır:

Aydınlatma akısı: Bir ışık kaynağının her yöne yaydığı toplam ışık enerjisi miktarı. Işık akısı, lümen (*lm*) cinsinden ölçülür.

Aydınlatma: Bir yüzeye düşen ışık yoğunluğu. Aydınlatma, lüks (*lx*) cinsinden ölçülür.

Görünürlük: Bir cismin göz tarafından ne kadar iyi görülebildiğini belirten bir ölçüttür. Görünürlük, çeşitli faktörlere, örneğin ışığın yoğunluğuna, cismin parlaklığına ve uzaklığına bağlıdır.

Fotometri, günlük hayatta pek çok uygulama alanına sahiptir. Örneğin, sokak lambaları, otomobil farları ve ev aydınlatma sistemleri gibi aydınlatma sistemlerinin tasarımı ve performansı fotometri prensiplerine dayanır. Fotometri, ayrıca fotoğrafçılık, sinema teknik ve tıp gibi alanlarda da kullanılır.

Astronomi, fotometriyi uzay nesnelerinin parlaklıklarını ve tayflarını ölçmek için kullanır. Bu ölçümler, yıldızların sıcaklıklarını, büyüklüklerini ve kimyasal bileşimlerini belirlemeye yardımcı olur.

Fotometri, günümüzde hızla gelişen bir bilim dalıdır. Yeni teknolojilerin geliştirilmesi, daha hassas ve duyarlı ışık ölçüm cihazlarının üretilmesini sağlamıştır. Bu gelişmeler, fotometrik ölçümlerin doğruluğunu ve kullanım alanlarını genişletmiştir.

2.1.2.3 Spektrometri

Spektrometri, çeşitli disiplinlerdeki araştırmacılar için vazgeçilmez bir analitik araçtır. Bu teknik, maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin ışık ile etkileşimine dayanır ve bunun sonucunda madde hakkında zengin bilgiler elde edilir (Lee M. 2012). Spektrometri, kimya, fizik, biyoloji, tıp ve çevre bilimlerinde geniş bir uygulama alanı bulmuştur.

Spektrometri, adlandırıldığı gibi, maddeyi oluşturan parçacıkların ışık tayfi üzerinde bırakan izine dayanır. Bu teknik, maddelerin ışık Emilimi veya Salınımı sırasında yaydıkları ışığın analiz edilmesine dayanır. Sonuç olarak, madde hakkında Atomik veya Moleküler düzeyde bilgiler elde edilir. Bu bilgiler, maddelerin kimyasal yapısını, fiziksel özelliklerini ve biyolojik aktivitelerini belirlemek için kullanılır.

Spektrometriyi oluşturan pek çok teknolojiler vardır. En yaygın olarak kullanılanlar, atomik emilim spektrometri (AAS), atomik salınım spektrometri (AES), Kızılötesi spektrometri (IR), mor ötesi- görünür spektrometri (UV-Vis), kütle spektrometri (MS) ve nükleer manyetik rezonans spektrometri (NMR)'dir. Her bir teknik, kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları bulunmaktadır.

Atomik emilim spektrometri, maddeyi oluşturan Atomların ışık Emilimi sırasında yaydıkları ışığın analiz edilmesine dayanır. Bu teknik, elementler için çok duyarlı ve seçicidir. Atomik salınım spektrometri ise, maddelerin ışık Salınımı sırasında yaydıkları ışığın analiz edilmesine dayanır. Bu teknik, elementler için çok duyarlı ve seçicidir.

Kızılötesi spektrometri, maddelerin kızılötesi ışınımına karşı emilim şiddetine dayanır. Bu teknik, organik maddelerin kimyasal yapısını belirlemek için kullanılır. Morötesi -görünür spektrometri, maddelerin ultraviyole ve görünür ışınımına karşı emilim şiddetine dayanır. Bu teknik, organik maddelerin kimyasal yapısını belirlemek için kullanılır.

Kütle spektrometri, maddelerin kütle-yük oranı üzerinden analiz edilmesine dayanır. Bu teknik, biyolojik maddelerin kimyasal yapısını belirlemek için kullanılır. Nükleer manyetik rezonans spektrometri ise, maddelerin NMR sinyallerine dayanır. Bu teknik, organik maddelerin kimyasal yapısını belirlemek için kullanılır.

Spektrometri en yaygın olarak kullanılan alanlar, kimya, fizik, biyoloji, tıp ve çevre bilimlerinde bulunmaktadır. Kimya alanında, spektrometri, maddelerin kimyasal yapısını belirlemek için kullanılır. Fizik alanında, spektrometri, maddelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılır. Biyoloji alanında, spektrometri, biyolojik maddelerin kimyasal yapısını belirlemek için kullanılır. Tıp alanında, spektrometri, hastalıkların teşhisi için kullanılır. Çevre bilimlerinde, spektrometri, çevre kirliliğini belirlemek için kullanılır.

2.1.3. Güneş Tayfının Maddeler Üzerindeki Etkileri:

Güneş, dünya üzerindeki yaşamın temel kaynağı olarak bilinirken, aynı zamanda çeşitli materyallerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen önemli bir enerji kaynağıdır. Güneş tayfı UV, görünür ve IR ışınlarını içeren geniş bir dalga boyu aralığına sahiptir. Bu tayf, malzemelerin yaşlanma süreçlerini etkileyen faktörlerin başında gelir. Malzemelerin, güneş ışınlarının farklı dalga boylarına maruz kalması sonucu meydana gelen değişiklikler, özellikle inşaat, otomotiv, tekstil ve elektronik gibi birçok sektörde önemli sorunlar yaratmaktadır.

Güneş tayfı, çeşitli dalga boylarında enerji içerir. UV ışınları, görünür ışık ve kızılötesi ışık, güneş ışığının ana bileşenleridir. UV ışınları, 100-400 nm arasındaki dalga boyları ile tanımlanırken, görünür ışık, 400-700 nm aralığındaki dalga boylarında bulunur. Kızılötesi ışık ise 700 nm'den başlayarak daha yüksek dalga boylarına kadar uzanır. Her bir dalga boyu, malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır.

Malzemelerin güneş ışığına maruz kalma süreci, yıllar içinde yavaş yavaş gerçekleşen bir yaşlanma sürecidir. Örneğin, plastikler, boyalar, kumaşlar ve metal yüzeyler, UV ışınları tarafından doğrudan etkilenir. UV ışınları, moleküler yapıyı bozarak malzemelerde mekanik zayıflamalara, renk solmasına ve dayanıklılık kaybına neden olabilir (Cubric I, 2022). Özellikle, UV ışınları polimerlerin yapı taşları olan karbon, hidrojen ve oksijen bağlarını zayıflatarak, malzemenin bütünlüğünü bozabilir.

Görülebilir ışık, doğrudan malzemeleri etkilemese de dolaylı yollarla etki eder. Örneğin, bazı boyalar ve kaplamalar, güneş ışığı ile reaksiyona girerek kimyasal değişiklikler gösterebilir. Bu, malzemenin estetik görünümünü etkileyebilir ve zamanla renk değişimlerine yol açabilir. Kızılötesi ışık, malzemelerin ısınmasına neden olur ve aşınma veya deformasyona sebep olabilir. Bu ısı, malzeme içindeki suyun buharlaşması veya gerilme gibi sorunlara yol açabilir.

Güneş tayfının malzemelerin yaşlanmasına etkisi birkaç temel mekanizma aracılığıyla gerçekleşir. Bunlar arasında fotokimyasal reaksiyonlar, fototermal etkiler ve mekanik stresler yer alır.

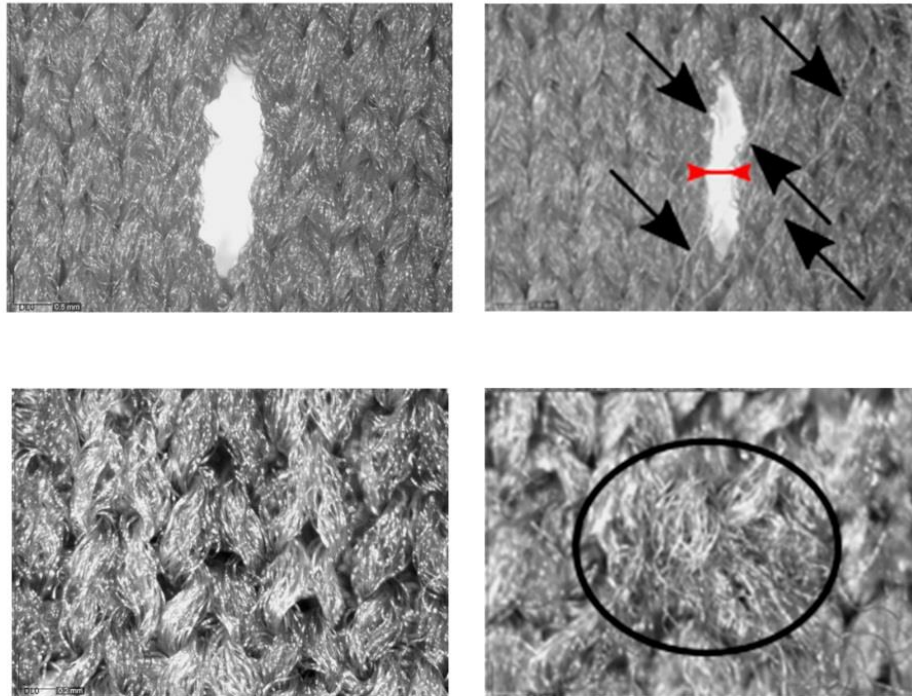
Fotokimyasal Reaksiyonlar: UV ışınları, pek çok malzeme için fotokimyasal reaksiyonları tetikler. Bu reaksiyonlar, malzemenin moleküler yapısında değişiklikler meydana getirir. Örneğin, polimerlerin foto degradasyon süreci, UV ışınlarının polimer zincirlerindeki bağları kırması ile başlar; bu, malzemenin dayanıklılığını azaltır ve çatlaklar oluşmasına neden olabilir.

Foto termal Etkiler: Güneş ışığının malzeme yüzeyinde ürettiği ısı, özellikle koyu renkli malzemelerde önemli bir etkidir. Isı, malzeme içindeki moleküler hareketliliği artırarak termal genişleme, büzülme veya deformasyona yol açabilir. Uzun süreli maruziyet, bu tür termal gerilmeler sonucunda malzemenin yapısal bütünlüğünü tehdit edebilir.

Mekanik Stresler: Malzemeler, güneş ışığına uzun süre maruz kaldıklarında, ısınma ve soğuma döngüleri nedeniyle içsel gerilimler geliştirir. Bu gerilimler, mikro çatlakların oluşmasına ve düşey çekme kuvvetleri altında malzemenin zayıflamasına yol açabiliyor.

Malzeme türlerine özgü etkiler

Farklı malzeme türleri, güneş ışığının yaşlandırıcı etkilerine farklı tepkiler verir. Özellikle polimerler, metal yüzeyler ve kompozit malzemeler, güneş ışığına maruz kaldıklarında çeşitli sorunlar yaşayabilmektedir (Şekil 2.3).

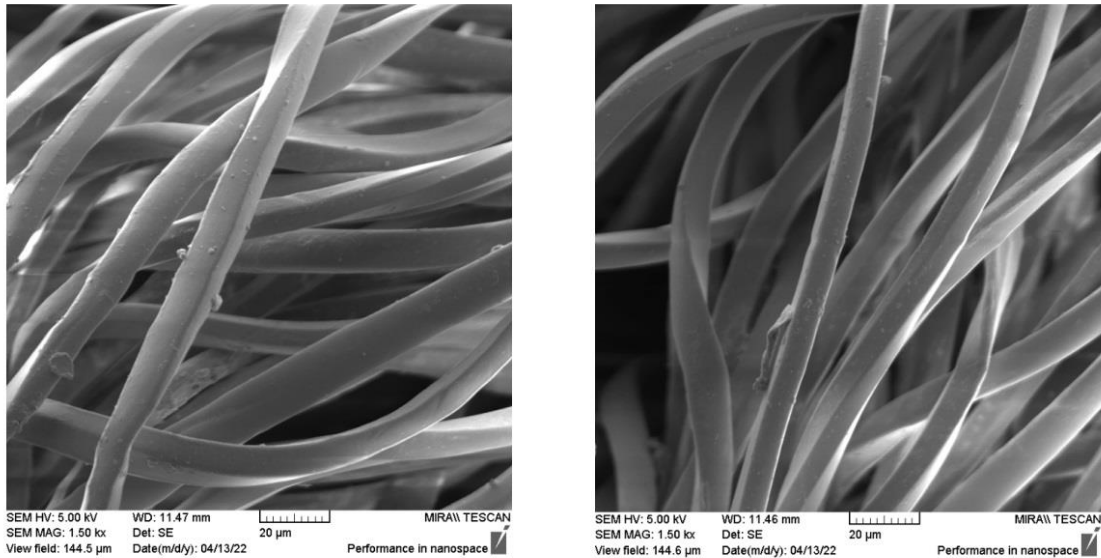


Şekil 2.3. Güneşin maddeler üzerindeki yaşlandırma etkileri

Polimerler: Plastik malzemeler, UV ışınlarına karşı son derece hassastır. Güneş ışığının bu tür malzemelere etkisi, genellikle renk kaybı, yüzey kabalaşması ve mekanik dayanıklılığın azalması şeklinde kendini gösterir. Özellikle dış mekan uygulamalarında kullanılan polimerler, çeşitli katkı maddeleri ile istikrarlı hale getirilse de, UV ışınlarına maruz kaldıkça bu stabilizasyonun etkisi zamanla azalır.

Metal Yüzeyler: Metal yüzeyler, güneş ışığına maruz kalmanın yanı sıra nem gibi çevresel etkilere de duyarlıdırlar. Güneş ışığı, metal yüzeylerde ısınmaya ve bu da oksitlenme gibi korozyon süreçlerine yol açabilir. Özellikle galvanizli çelik gibi koruyucu kaplamalara sahip metal malzemelerde bile bu süreçler zamanla ortaya çıkabilir.

Kompozit Malzemeler: Kompozit malzemeler hem polimer hem de metal bileşenlere sahip olmaları nedeniyle güneş ışığına karşı karmaşık tepkiler gösterir. UV ışınları, polimer bileşenlerini bozup, yapısal bütünlüğü zayıflatırken, metal bileşenlerin korozyona uğramasına sebep olabilir. Bu, kompozitlerin özelliklerini ve performanslarını olumsuz yönde etkileyebilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Güneşin yaşlandırma etkilerinin elektron mikroskobunda incelenmesi

Güneş tayfının malzemeler üzerindeki yaşlanma etkileri, teknik ve ekonomik açıdan önemli sonuçlara yol açabilir. Malzemelerin güneş ışığına maruz kalma süreleri, malzeme seçimi ve uygulama alanları dikkate alınarak, çözümler geliştirilir. UV emiciler, stabilizatörler ve koruyucu kaplamalar gibi özel katkı maddeleri, malzemelerin güneş ışığına karşı dayanıklılığını artırmak için kullanılabilir. Bunun yanı sıra, güneş ışığının etkilerini azaltmak amacıyla malzeme tasarımında yenilikçi yaklaşımlar benimsemek, gelecekte malzemelerin güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik önem taşımaktadır. Güneş tayfının yaşlanma etkileri üzerine yapılan bu tür çalışmalara devam edilmesi, sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesi ve uzun ömürlü ürünlerin üretilmesi açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Güneş ışığının kullanımı ve etkileri göz önünde bulundurularak, malzeme bilimi ve mühendisliği alanında daha fazla araştırma ve yenilik yapılması gerekmektedir.

2.2. Güneş Benzeteçleri:

Yapay güneş veya güneş ışığı benzeteçi olarak da bilinen güneş benzeteçi, çeşitli test amaçları için doğal güneş ışığını taklit eden çok önemli bir cihazdır (Wang W 2014). Bu cihazlar, Şekil 2.1'deki güneş tayfının dalga boyu ve şiddetini taklit etmek üzere kontrollü iç mekân pozlaması sağlayarak araştırmacıların laboratuvar ortamında deneyler yapmasına olanak tanır.

Güneş benzeteçleri, güneş ışığını doğru bir şekilde taklit etme yetenekleri nedeniyle çok çeşitli endüstrilerde ve araştırma alanlarında kullanılmaktadır. Güneş panelleri (Esen V. 2017), güneş kremleri (Sayre R. 1979), kozmetikler, plastikler, havacılık malzemeleri, cilt kanseri tedavileri (Mabruk M. 2009), biyoluminesans çalışmaları, fotosentez araştırmaları, su arıtma süreçleri, ham petrol bozunma deneyleri ve serbest radikal oluşumu araştırmaları gibi ışığa duyarlı süreçleri veya malzemeleri test etmek için yaygın olarak kullanılırlar.

Güneş benzeteçlerinin çok yönlülüğü, onları fotobiyoloji, foto-oksidasyon çalışmaları, foto-bozunma analizi, PV geliştirme ve fotokataliz araştırmaları gibi alanlardaki araştırmacılar için önemli araçlar haline getirmektedir. Güneş benzeteçleri, güvenilir ve kontrol edilebilir bir yapay güneş ışığı kaynağı sağlayarak, çeşitli disiplinlerde bilimsel bilgi ve teknolojik yeniliğin ilerletilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır.

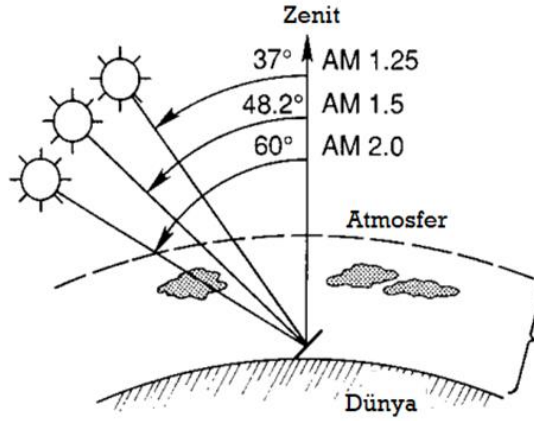
Araştırmacıların kontrollü aydınlatma koşulları altında doğru ve tekrarlanabilir deneyler yapmalarını sağlayan temel cihazlardır. Uygulamaları çok sayıda endüstri ve araştırma alanını kapsamakta, bu da onları fotosentez çalışmaları için vazgeçilmez araçlar haline getirmektedir.

2.2.1.Hava Yoğunluğu Katsayısı (Air Mass):

Güneş benzeteçleri dünya üzerindeki konuma erişim oranı olan hava kütlesinin (Air Mass)1,5 değerinde olduğu deniz seviyesindeki coğrafi bir bölge için dalga boylarının toplam ışımaya oranına göre tasarlanırlar.

Güneş enerjisi, dünya çapında enerji üretiminin ve sürdürülebilirliğin artan önemi ile birlikte giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, güneş enerjisi sistemlerinin performansını etkileyen birçok faktör vardır; bu faktörlerden biri de hava kütlesi katsayısıdır. Hava kütlesi katsayısı, güneş ışığının dünya atmosferinde kat ettiği yolu tanımlayan önemli bir parametredir.

Hava kütlesi değeri, güneş ışınlarının atmosferden geçerken kat ettiği yol uzunluğunu ifade eden bir ölçüttür. Güneşin ufuk çizgisine daha yakın bir konumda olması, ışınların daha kalın bir atmosfer tabakasından geçmesine ve dolayısıyla AM değerinin artmasına neden olur. Bu artış, ışınların atmosferik parçacıklar ve gazlar tarafından soğrulması ve saçılması sonucu spektral dağılımda önemli değişikliklere yol açar. Dolayısıyla güneş ışığının açısı ile AM değeri arasında ters orantılı bir ilişki mevcuttur; güneş açısı azaldıkça (güneş ufukta alçaldıkça) AM değeri artar ve güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği de buna bağlı olarak etkilenir.



Şekil 2.5 Hava yoğunluğu katsayısı AM 1,5 zenitle 48,2° açığı gösterir.

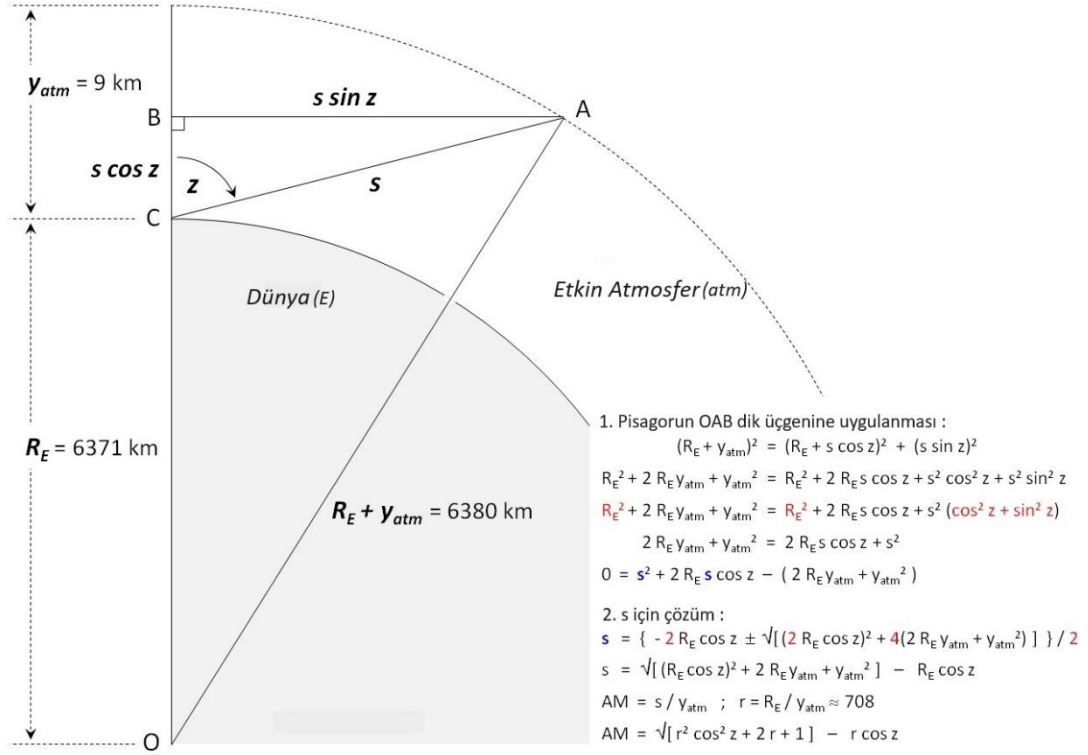
Hava kütlesi katsayısı (6), güneş ışığının, atmosfere dik olarak yukarıya doğru (zenit) giden bir yol ile karşılaştırıldığında, atmosferde kat ettiği optik yol uzunluğunu tanımlar. Bu katsayı, hava kütlesinin yoğunluğunun ışığın atmosferdeki yolculuğu üzerindeki etkisini anlamak için hayati öneme sahiptir.

Hava kütlesi katsayısı, atmosferin kalınlığının nasıl değiştiğine bağlı olarak, dik olarak yapılan ölçümlerin yanına başka bir katman ekleyen bir orandır. Örneğin, güneş ışığı, 90 derece açıyla (zenit konumu) atmosferden geçerken, hava kütlesi katsayısı 1'dir. Ancak, güneşin ufka yakın olduğu durumlarda, hava kütlesi katsayısı 1'den daha yüksek bir değere ulaşır. Bu, ışığın atmosferde daha fazla mesafe kat etmek zorunda kalmasından kaynaklanmaktadır.

Hava kütlesi katsayısı, genellikle "AM" ile gösterilir ve ardından bir sayı gelir. Örneğin, "AM1,5" ifadesi, güneş ışığının atmosfere 1,5 kat daha fazla mesafe kat ettiğini gösterir. Dünyaya olan açının azalması, dolayısıyla zenitle olan açının artması hava kütlesi katsayısının artmasına neden olur ve bu da güneş ışığının daha fazla hava katmanı sayesinde daha uzun bir yol katetmesine yol açar (şekil 2.5).

Atmosfer dışı L_0 daki tayf "AM0" olarak adlandırılmakta olup, bu terim "sıfır atmosfer" anlamına gelmektedir. Uydulara elektrik sağlamak için kullanılan PV güneş panelleri, özellikle iletişim uyduları üzerinde yer alanlar, genellikle AM0 koşulları altında ifade edilmektedir. AM0 atmosferin ozon tabakası başta olmak üzere diğer bütün filtre edici ve süzücü etkilerinin bulunmadığı, güneş ışığının atmosfer dışı ve uydu yörünge irtifalarında yaptığı etkileri incelemek amacıyla tanımlanmıştır.

Bu tayfsal koşullar, dünyanın atmosferinin etkilerinden arındırılmış bir durumda güneş enerjisinin doğrudan ölçülmesini sağlamakta ve bu nedenle uzayda bulunan güneş hücrelerinin verimliliği ve performans analizi açısından kritik bir önem taşımaktadır. AM0 standardı, uzaydaki güneş ışınımının doğasına dair önemli veriler sunarak, uydu sistemlerinin enerji verimliliğini artırmak için gerekli temelleri oluşturmaktadır.



Şekil 2.6 Hava kütlesi katsayısı A.M. nin hesaplanması

$$A.M. = \frac{L}{L_o} \approx \frac{1}{\cos z} \quad (7)$$

AM 1,5D ve AM 1,5G, bu güneş panellerini test etmek üzere kullanılan güneş benzetecilerinin belirli standartlarına atıfta bulunan terimlerdir. AM 1,5D, güneş ışığının atmosferdeki dağılımını temsil ederken, genellikle düz yüzeylerde güneş enerjisi panellerinin performansını ölçmek için kullanılır. AM 1,5G ise, daha karmaşık benzetimler sunarak, güneş ışığını daha dikkate değer bir açıda ve dağılımda yansıtma yeteneğine sahiptir; bu da genellikle eğimli yüzeylerdeki sistemlerin test edilmesi için idealdir. Her iki yöntem de güneş enerjisi sistemlerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için kritik öneme sahiptir.

2.2.2. Güneş Benzeteçlerinin Sınıflandırılması:

PV testlerde kullanılan güneş benzetecileri IEC 60904-9, ASTM E927-19 ve JIS C 8912 gibi standartlarda belirtilen belirli performans gereksinimlerine uymalıdır. Bu standartlar, tayfsal içerik, uzaysal homojenlik ve zamansal kararlılık dahil olmak üzere güneş benzetecileri tarafından yayılan ışık için temel kontrol boyutlarına odaklanmaktadır.

Çizelge 2.3 PV Güneş paneli testi için üretilmiş güneş benzeteçleri kriterleri

Sınıflandırma	Tayf Uyumu	Uzaysal Benzeşmezlik	İstikrarsızlık
A+ Sınıfı	$0,875 \leq R_{SM} \leq 1,125$	$S_{NE} \leq 1\%$	$T_{IE} \leq 1\%$
A Sınıfı	$0,75 \leq R_{SM} \leq 1,25$	$S_{NE} \leq 2\%$	$T_{IE} \leq 2\%$
B Sınıfı	$0,60 \leq R_{SM} \leq 1,40$	$S_{NE} \leq 5\%$	$T_{IE} \leq 5\%$
C Sınıfı	$0,40 \leq R_{SM} \leq 2,00$	$S_{NE} \leq 10\%$	$T_{IE} \leq 10\%$
U Sınıfı	$R_{SM} > 2:00$	$S_{NE} > 10\%$	$T_{IE} > 10\%$
$S_{NE} = 100 \cdot \frac{\max(I_S) - \min(I_S)}{\max(I_S) + \min(I_S)}$		$T_{IE} = 100 \cdot \frac{\max(I_T) - \min(I_T)}{\max(I_T) + \min(I_T)}$	

Çizelge 2.3 te S_{NE} eşitliğindeki I_S PV güneş panelinin kısa devre akımı, T_{IE} eşitliğindeki I_T akımı ise güneş panelinden birim zamanda geçen akımı ifade eder.

Bunlara ek olarak IEC 60904-9:2020, tayfsal kapsam (SPC) ve tayfsal sapma (SPD) terimlerini de tanıtmış ama bir sınıflandırma kriteri olarak belirtmemiştir. Öte yandan tayf uyumu oranı (Spectral match ratio - R_{SM}), uzaysal benzeşmezlik (spatial non-uniformity- S_{NE}), istikrarsızlık (temporal instability- T_{IE}) kriterleri güneş paneli testlerini gerçekleştirmek amacıyla üretilen güneş benzeteçleri için geçerlidir. Öte yandan tayf uyumu oranı dışındaki diğer kriterlerin güneş panelleri testleri için gerekli ve geçerli olup (S_{NE} ve T_{IE} hesaplamalarında güneş panelinden akan I_S ve I_T yakımları ölçümlendiğinden) yaşlandırma benzeteçleri için üreticiler tarafından özellikle UV bandı standartları ve kontrollerine önem verildiği görülmüştür. Güneş paneli benzeteçlerinde ise, bu boyutlardaki performanslarına göre A, B veya C kategorilerinde sınıflandırılır. IEC 60904-9'un son baskısında Sınıf A+'nın tanıtılması, özellikle 300 nm ila 1200 nm tayfsal aralığında çalışan güneş benzeteçleri için geçerlidir. Fotovoltaik güneş panellerinin güneş tayfının 300-1200 nm aralığında göstermesi gereken elektrik üretim performansı performans Çizelge 2.4 ile gösterilmiştir.

ASTM E927-19 için, A, B veya C sınıfları için kriterleri karşılamayan güneş benzeteçleri Sınıf U (sınıflandırılmamış) olarak sınıflandırılır. Bu standartlar başlangıçta güneş paneli testler için geliştirilmiştir, ancak o zamandan beri çeşitli endüstrilerde daha geniş bir şekilde benimsenmiştir.

ASTM E927-19'daki Çizelge 2.3, her sınıf ve boyut için gereken özellikleri özetlemektedir. Her üç boyutta da A sınıfı özellikleri karşılayan bir güneş benzeteçi AAA sınıfı güneş benzeteçi olarak bilinir. Bu standartlar, güneş benzeteçlerini belirlemek ve farklı uygulamalarda kalite ve güvenilirliklerini sağlamak için ortak bir çerçeve sağlar

Çizelge 2.4 PV Güneş paneli testi için IEC 60904-9:2020 standartlarına göre hava yoğunluğuna göre güneş tayfı değerleri

Dalga boyu aralığı (nm)	AM1,5G	AM0
300–400	veri yok	4,67%
400–500	18,21%	16,80%
500–600	19,73%	16,68%
600–700	18,20%	14,28%
700–800	14,79%	11,31%
800–900	12,39%	8,98%
900–1100	15,89%	13,50%
1100–1400	Veri yok	12,56%

Tayfsal sapma (Spectral deviation-SPD), 2020 yılında IEC 60904-9 standardına yapılan güncellemeyle birlikte, PV güneş panelleri testlerinde kullanılan güneş benzeteçlerini nitelendirmek için ek bir yöntem olarak tanıtılmıştır (8). *SPD*, bir güneş benzeteçinin yaydığı tayf ile bir referans tayfı arasındaki toplam yüzde sapmayı ifade eder ve bu değer, mevcut durumda benzeteçlerin sınıflandırmasını etkilememekle birlikte, IEC 60904-9:2020 standardı kapsamında raporlanması talep edilmektedir.

$$SPD = \left(\sum_{300nm}^{1200nm} |E_{SIM}(\lambda) - E_{AM1.5}(\lambda)| \cdot \Delta\lambda / \sum_{300nm}^{1200nm} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \right) \cdot 100\% \quad (8)$$

Bu metrik, güneş benzeteçlerinin performansını daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirmek için önemli bir araç sunmakta ve araştırmacılara, mühendislik uygulamalarına ve kalite kontrol süreçlerine daha fazla bilgi sağlamaktadır. Güneş benzeteçlerinin tayfsal sapmasının hesaplanması, belirli bir referans tayfına göre emisyonun ne kadar farklılık gösterdiğini belirlemeye yardımcı olur; bu da benzeteçlerin doğal güneş ışığına ne kadar benzer olduğunu anlamak için kritik bir faktördür. Bu bağlamda, *SPD* değeri, benzeteçlerin kalitesinin ve güvenilirliğinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamakta ve güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için gerekli olan doğru test ve ölçüm süreçlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Çizelge 2.5. Ksenon –ark yaşlandırma amaçlı güneş benzetecileri ASTM G155 standardı (EK 3)

TABLE 1 Relative Spectral Power Distribution Specification for Xenon Arc with Daylight Filters

Bandpass, nm	Xenon Arc with Daylight Filters ^{A,B}	Sunlight ^C
Ultraviolet Wavelength Region		
Irradiance as a percentage of total irradiance from 300 to 400 nm		
290–300	<1 %	0 %
301–320	2.1–6.4 %	5.6 %
321–340	11.1–15.0 %	18.5 %
341–360	19.4–23.3 %	21.7 %
361–380	26.3–29.3 %	26.6 %
381–400	30.6–36.4 %	27.6 %
Ultraviolet and Visible Wavelength Region		
Irradiance as a percentage of total irradiance from 300 to 800 nm ^D		
300–400	9.2–12.3 %	11 % ^E
401–700	64.0–77.3 %	72 % ^E

Çizelge 2.6. Ksenon-ark yaşlandırma güneş benzetecileri ISO 4892 standartı (EK 2)

ISO 4892-2:2013/Amd.1:2021(E)

Table C.1 — Relative spectral irradiance of xenon-arc lamps with daylight filters (method A)^a

Spectral pass-band wavelength λ nm	General ^b		Type I ^c		Type II ^d		CIE No. 85:1989, Table 4 ^e %
	Min %	Max %	Min %	Max %	Min %	Max %	
$\lambda < 300$	2,60	8,05	0,00	0,20	0,20	1,05	5,40
$300 \leq \lambda \leq 320$			2,60	6,00	3,50	7,00	
$320 < \lambda \leq 340$	28,2	39,8	10,0	17,0	10,0	17,0	38,2
$340 < \lambda \leq 360$			18,3	23,2	18,3	23,2	
$360 < \lambda \leq 380$	54,2	67,5	25,0	30,5	25,0	30,5	56,4
$380 < \lambda \leq 400$			29,2	37,0	29,2	37,0	

^a This table gives the irradiance in the given passband, expressed as a percentage of the total irradiance between 290 nm and 400 nm. To determine whether a specific filter or set of filters for a xenon-arc lamp meets the requirements of this Table, the spectral irradiance must be measured from 250 nm to 400 nm. The total irradiance in each wavelength passband is then summed and divided by the total irradiance from 290 nm to 400 nm.

^b Values of the spectral passband of xenon-arc lamps with daylight filters according to Table 1.

^c Daylight filter systems as described in ASTM D7869 fall under the definition of Type I Daylight filters.

^d Daylight filter systems as described in SAE J2527 fall under the definition of Type II Daylight filters.

^e Details of the solar reference spectrum can be found in Table 1.

Çizelge 2.4’te görülen PV panel testleri için üretilmiş güneş benzetecileri standartları olan dünya yüzeyi için AM1,5 ve uydu PV panelleri için AM0 güneş tayflarının yaşlandırma

benzeteçleri standardı olan Çizelge 2,5 ASTM G115 ve Çizelge 2.6. ISO 4892'den farklı olduğu görülmektedir. Yaşlandırma benzeteçi standartlarında yıpratıcı UV ışını toplam tayfın %11 değerdayken PV standartlarında dünyada AM1,5 için 0, uydular içinse AM0 da %4,67 değerindedir. Bu durum PV panellerin çalışma ömrünün uzatılması için UV filtresiyle kaplanması dolayısıyla UV bandından elektrik üretememelerinden kaynaklanmaktadır (Tahir Y. 2022).

2.2.3. Güneş Benzeteçleri Tipleri

2.2.3.1. Sürekli Işıma Yapan Güneş Benzeteçleri:

Güneş enerji sistemlerinin test edilmesi ve değerlendirilmesi amacıyla kullanılan güneş benzeteçleri, farklı ışık kaynakları kullanarak güneşin tayfını taklit etmeyi amaçlar. Sürekli ışıma yapan benzeteçlerin ışık kaynakları kesintisiz olarak ışıma yapar (Codd D. 2010). Sürekli ışıma yapan güneş benzeteçleri, özellikle düşük yoğunluklu testler için, yani "bir güneş" ışıma seviyesinden birkaç güneş seviyesine kadar olan uygulamalar için yaygın şekilde kullanılır.

Bu benzeteçlerin ölçüm ve değerlendirme kriterleri, daha önce ele alınan bir dizi teknik ve spesifikasyon ile doğrudan ilişkilidir. Sürekli ışık kaynaklarının belirli bir amacı vardır; bu da ışımanın sürekli ve düzenli sağlanmasını garanti etmektir. Örneğin, AM1.5G tayfının toplam ışıması, 280 nm ile 4000 nm arasındaki bir bant genişliğinde 1000.4 W/m^2 olarak belirlenmiştir ve bu değer sıklıkla "1 güneş" olarak adlandırılmaktadır (Wang 2014).

Sürekli ışık veya sürekli dalga, (Continuous Wave-CW) güneş benzeteçleri, genellikle ışık tayfını genişletmek için birden fazla lamba türünü bir araya getirir. Bu lambalar arasında, ark kaynakları ile bir veya daha fazla halojen lambası bulunabilir. Bu birleşim, ışık tayfını kızılötesi bölgeye kadar uzatarak, daha geniş bir tayfsal aralık sağlama amacı güder. Bu durum, farklı güneş paneli türlerinin ve sistemlerinin daha iyi analiz edilmesi ve optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Kesintisiz ışık kaynakları, güneş enerjisi sistemlerinin performansını test etmek için gerekli olan belirli koşulları sağlar. Bu benzeteçler, laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilen testlerde, güneş panellerinin verimliliğini değerlendirmek ve geliştirmek amacıyla vazgeçilmez bir araçtır. Ayrıca, güneş enerjili cihazların gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceğini tahmin etmek için de önemlidir.

2.2.3.2. Darbeli veya Flaş Güneş Benzeteçleri:

Güneş benzeteçleri, PV hücrelerin ve diğer güneş enerjisiyle ilgili sistemlerin performansını değerlendirmek için kullanılan önemli cihazlardır. Bu benzeteçlerin ikinci türü, "darbeli benzeteç" ya da "laş benzeteç" olarak adlandırılır (Shimotomai M. 2006) ve niteliksel olarak laş fotoğrafçılığına benzer şekilde çalışır. Bu cihazlar genellikle birkaç ms süren laş tüpleri kullanarak güneş ışığı taklidi yaparlar.

Darbeli güneş benzeteçleri, tipik olarak birkaç bin güneş yoğunluğuna kadar ulaşabilen yüksek ışık şiddeti sağlayabilir. Bu, özellikle test edilen cihazda gereksiz ısı birikimini önlemek amacıyla büyük avantaj sunar. Güneş ışığını taklit etme yetenekleri,

çeşitli test senaryolarında önemli bir rol oynar. Örneğin, belirli bir güneş ışığı koşulunu taklit ederken, cihazların dayanıklılığını ve verimliliğini değerlendirmek için kısa süreli yoğun ışık flaşları kullanılabilir.

Ancak, darbeli güneş benzeteçlerinin çalışma prensibi, ısıtma ve soğutma döngülerinin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi nedeniyle bazı zorluklar da barındırır. Flaş lambasının hızla ısınması ve soğuması hem ışık şiddetinden hem de ışık tayfında geçici dalgalanmalara neden olabilir. Bu durum, testlerin tekrarlanabilirliğini sağlamada teknik zorluklar yaratmaktadır.

Son yıllarda, katı hal lambası teknolojisi, özellikle LED uygulamaları, flaş güneş benzeteçlerinde bazı ısıtma ve soğutma endişelerini hafifletmektedir. LED'lerin sağladığı avantajlar, daha kararlı ve sürdürülebilir ışık kaynakları sağlayarak test süreçlerinin güvenilirliğini artırmaktadır.

Geleneksel benzeteçlere göre sağladığı yüksek ışık yoğunluğu güneş enerjisi teknolojilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Ancak, bu tür benzeteçlerin getirilerinin yanı sıra, geçici dalgalanmaların yönetimi gibi teknik zorlukların da göz önünde bulundurulması önemlidir.

2.2.4.Güneş Benzeteçlerinde Kullanılan Işık Kaynakları

2.2.4.1.Karbon-Ark Lambaları:

Güneşin AM0 (Sıfır Hava Kütlesi) salınım tayfına benzer bir salınım tayfına sahip olan karbon ark lambaları, aslında güneş benzeteçlerinde güneş dışı tayfları kopyalamak amacıyla kullanılmaktadır (Xu J. 2000). Bu özellik onları NASA tarafından yürütülen uzay benzeteçlerinin ilk günlerinde değerli kılıyordu. Karbon ark lambalarının yüksek yoğunluklu ultraviyole (UV) emisyonu, belirli test ve araştırma türleri için özellikle uygun gelmekteydi. Bu avantajlara rağmen, karbon ark lambaları genellikle ksenon ark muadillerine göre daha az yoğundur. Bu düşük yoğunluk, güçlü bir ışık kaynağına ihtiyaç duyulduğunda önemli bir dezavantaj olabilir. Ayrıca, karbon ark lambaları nispeten kısa çalışma ömürleriyle bilinir. Ayrıca kullanım sırasında kararsız olma eğilimindedirler ve bu da tutarlı deneysel koşullar için zorluklar oluşturabilir.

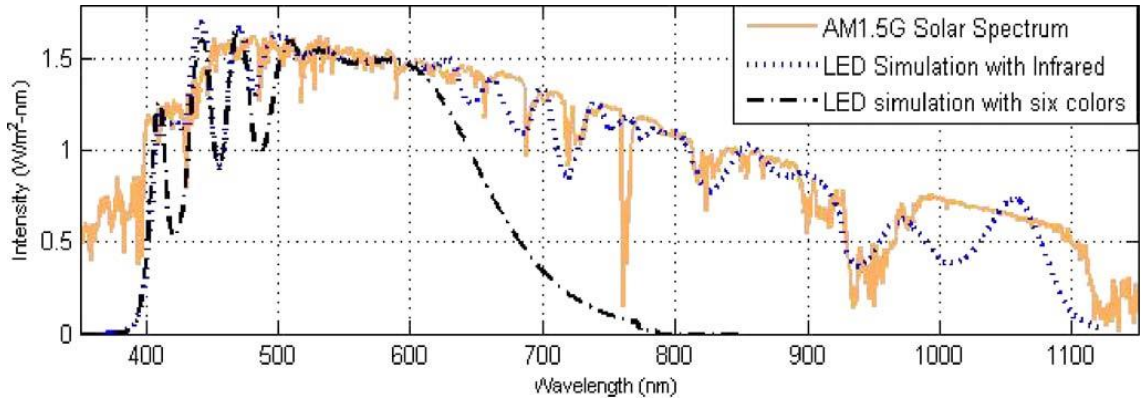
Diğer bir sınırlama ise, güneş tayfıyla iyi hizalanmayan, doğal güneş ışığına yakın bir eşleşme gerektiren benzeteçlerde potansiyel olarak çizgilere yol açan yüksek yoğunluklu mavi ışığın salınımıdır. Ksenon ark lambaları daha pahalı olmasına rağmen, güneşinkine daha çok benzeyen bir tayfa sahip daha yoğun bir ışık kaynağı sağlar ve bu da onları birçok modern güneş benzeteçinde tercih edilen bir seçenek haline getirir. Güneş benzeteç, teknolojisinin gelişimi, araştırmacıların güneş panellerini test etmekten çevre araştırmaları yürütmeye kadar çeşitli uygulamalar için güneş tayfını kopyalamanın daha verimli ve doğru yollarını geliştirmeye çalışmasıyla devam ediyor. Mükemmel güneş benzeteçi arayışı, yenilenebilir enerji alanındaki en önemli zorluklardan ve fırsatlardan biri olmaya devam eden güneşin gücünü anlamaya ve kullanmaya yönelik daha geniş bilimsel çabayı yansıtıyor.

2.2.4.2.Argon-Ark Lambaları

Argon ark lambaları, erken dönem güneş benzeteçi çalışmalarında (1972) kullanılmıştır ve 6500 K'lık ışımaya sahip olmaları nedeniyle güneşin kara cisim tayfı ile iyi bir uyum içindedirler (Decker A. 1972). Bu lambalar, 275 nm ile 1525 nm arasında oldukça geniş bir tayfsal emisyon sunarak, güneş ışığını taklit etme yetenekleri ile dikkat çekerler. Yüksek basınçlı argon gazı, bir anot ve katot arasında döngü yaparak çalışırken, içindeki kuvars tüp duvarı boyunca akan bir su vortexi, ark kenarını soğutmak için kullanılır. Ancak argon ark lambalarının kısa ömürleri ve düşük güvenilirlikleri gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu durum, özellikle uzun süreli deneyler ve sürekli güneş benzeteçi gerektiren uygulamalarda sorun yaratabilir. Bu nedenle, argon ark lambalarının kullanımı, belirli laboratuvar koşullarında sınırlı kalmış ve daha dayanıklı ve güvenilir alternatiflerin geliştirilmesine yol açmıştır. Güneş benzeteçi alanında yapılan bu erken çalışmalar, güneş enerjisi araştırmalarının ve PV sistemlerin geliştirilmesine önemli katkılarda bulunmuş, böylece argon ark lambalarının tarihi, güneş enerjisi teknolojilerinin evrimi açısından önemli bir yere sahip olmuştur.

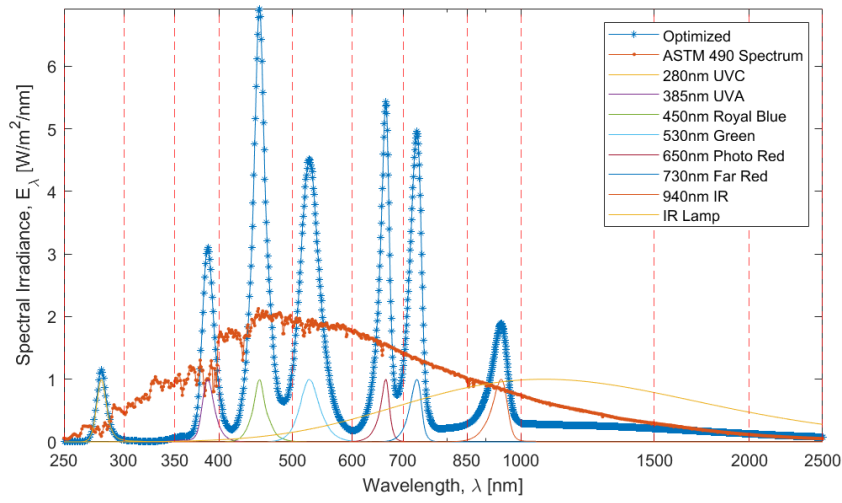
2.2.4.3. Işık Saçan Diyotlar:

LED'ler, elektron-delik çiftlerinin birleşmesiyle ışık yayarak çalışmakta olup, düşük maliyetli, kompakt yapıda ve düşük enerji tüketimine sahip olmalarıyla dikkat çekmektedirler (Tavakoli 2021). Genellikle 10 nm ile 100 nm arasında dar bir bant genişliğine sahip olduklarından, bir güneş benzeteçinde birden fazla LED'in bir araya getirilmesi gerekmektedir. Bu durum, bir LED güneş benzeteçinin tayfsal eşleşmesinin büyük ölçüde tasarımında kullanılan LED'lerin sayısı ve türleri ile belirlendiği anlamına gelmektedir.

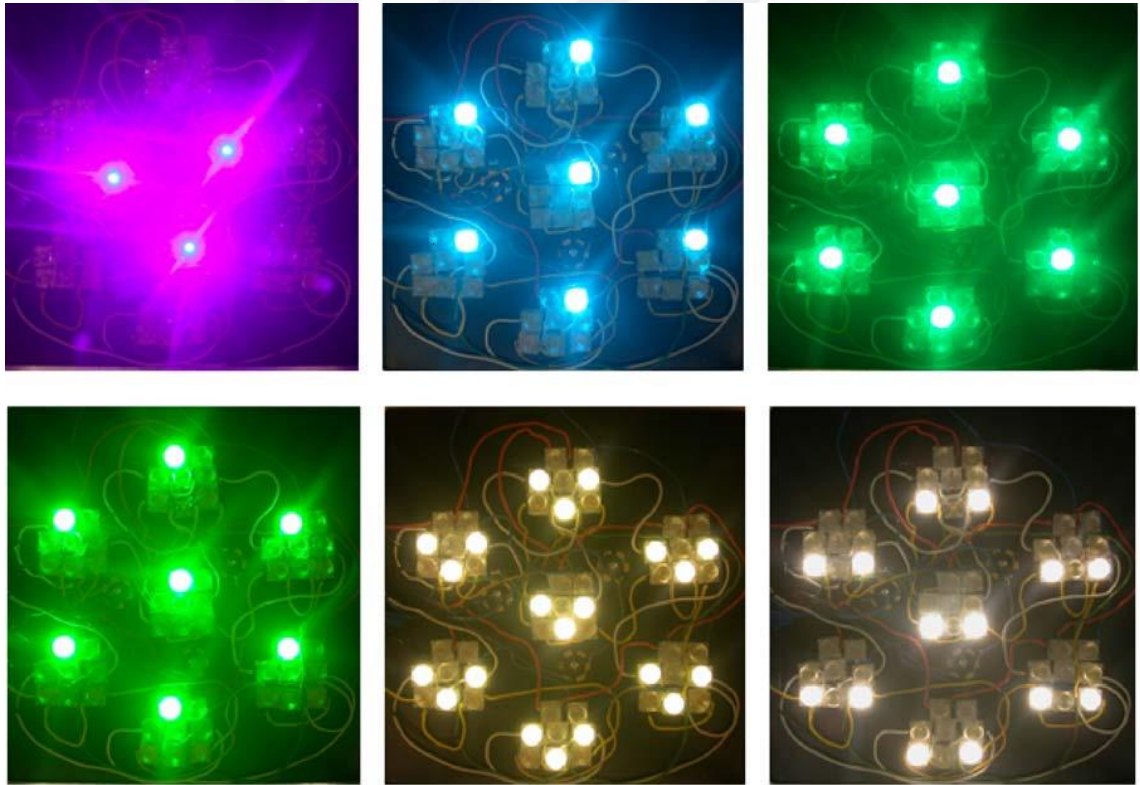


Şekil 2.7. Bazzi 2012, LED ler ile gerçekleştirilmiş güneş benzeteçi tayfı

LED'ler, sabit veya flaşlı güneş benzeteçi uygulamaları için zaman pencerelerini milisaniyelerden daha kısa bir sürede hassas bir şekilde kontrol edebilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, LED'lerin diğer tüm güneş benzeteçi lamba türlerine kıyasla oldukça uzun bir yaşam döngüsü bulunmaktadır ve enerji dönüşümünde oldukça etkilidirler. LED'ler üzerindeki devam eden araştırmalar ve geliştirmeler, maliyetlerini sürekli olarak düşürmekte ve tayfsal kapsama alanını genişletmekte, bu da geniş tayflı güneş benzeteçlerinde daha fazla kullanılmalarını sağlamaktadır.



Şekil 2.8. Gunther M. 2020 LED güneş benzeteçi tayfı



Şekil 2.9. Bazzi 2012, LED'ler ile gerçekleştirilmiş katı hal güneş benzeteçi

LED güneş benzeteçleri, optik filtreleme ihtiyacı duymaksızın çeşitli LED'lerin yoğunluğunu artırarak veya azaltarak tayflarının elektriksel olarak ayarlanabilmesi bakımından avantajlar sunar.

2.2.4.4. Süperkontinum Lazer Kaynakları

Süperkontinum lazer kaynakları, solar benzeteciler için önemli bir bileşen oluşturarak, güneş ışığının geniş tayfını taklit etme yetenekleri sayesinde PV sistemlerin performansını değerlendirmek amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır (Dennis T. 2014). Bu lazerler, geleneksel lazerlerin sınırlı dalga boyları yerine, görünür ışıktan kızılötesine kadar geniş bir tayfda ışık üretebilme kapasitesine sahiptir. Süperkontinum yapısı, bir optik lif içerisinde yüksek enerjili lazer darbelerinin bir araya gelmesiyle oluşur ve bu süreç, lineer olmayan optik etkiler aracılığıyla geniş bir dalga boyu yelpazesinin ortaya çıkmasını sağlar. Güneş paneli testleri sırasında, bu geniş dalga boyu aralığı, çeşitli ışık koşullarının ve güneş ışığının gün içindeki değişimlerinin benzeteci için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, süperkontinum lazer kaynakları, güneş enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak için gerekli olan farklı dalga boylarındaki fotonların etkilerini analiz etme fırsatı sunar. Sonuç olarak, bu tür lazer kaynaklarının kullanımı, güneş enerjisi teknolojilerinin geliştirilmesine katkıda bulunarak, yenilenebilir enerji alanında önemli bir ilerleme kaydedilmesine olanak tanır.

2.2.4.5. Metal Halid Ark lambaları:

Bu lambalar, yüksek basınçtaki civa ve metal halid bileşenlerinin buharı içinde elektrik arkı geçirerek ışık üreten yüksek yoğunluklu deşarj (HID) teknolojisi ile çalışır (Siegel N. 2018). Metal halid ark lambalarının dezavantajları arasında yüksek enerji tüketimi, yüksek elektronik sürücü maliyetleri ve kısa yaşam döngüleri sayılabilir. Ancak, bu lambaların göreceli olarak düşük maliyeti, bu teknolojiyi kullanarak birçok büyük alanlı güneş benzeteci inşa edilmesini sağlamıştır. Özellikle geniş alanların aydınlatılması gereken durumlarda, bu lambaların sağladığı avantajlar, onların kullanılabilirliğini artırmıştır. Güneş benzeteci uygulamalarında, gün ışığına yakın ışık tayfları sunmaları, araştırma ve geliştirme alanlarında önemli bir rol oynamaktadır.

2.2.4.6. Ksenon Ark Lambaları:

Ksenon-ark lambaları, sürekli ve flaşlı güneş benzetecileri için en yaygın lamba türüdür (Petrasch J. 2007). Bu lambalar, ışığın iyonlaşmış, yüksek basınçlı xenon gazı üzerinden bir elektrik arkı aracılığıyla üretildiği yüksek yoğunluklu deşarj (HID) lambalarının bir çeşididir. Bu lambalar, yüksek yoğunluklar sunmakta ve büyük ölçüde güneş ışığına uyum gösteren filtrelenmemiş bir tayf sağlamakta olup, güç farklılıkları nedeniyle önemli bir tayfsal denge kayması yaşanmaması onların tercih edilme sebeplerindendir.

Ksenon ark lambadan yüksek yoğunluklu ışın elde etmek mümkündür. Ancak, ksenon ark lambalarının tayfi, birçok istenmeyen keskin atomik geçiş zirveleri ile karakterize edilir ve genel olarak kızılötesi dalga boylarında daha güçlü bir emisyon sergilemesi, bazı tayfsal olarak duyarlı uygulamalar için sorun oluşturur. Tayftaki bu zirveleri genellikle cam filtreler kullanılarak filitrelenmektedir. Bununla birlikte, ksenon lambaları, yüksek enerji tüketimi, sürekli bakım gereksinimi, kısa ömür, yüksek maliyet, güç kaynağı dalgalanmalarına karşı hassasiyet, yüksek basınçlı gaz aracılığıyla işletilmesi nedeniyle ampul patlama riski ve UV radyasyondan kaynaklanan ozon üretimi nedeniyle ozon solunum tehlikesi gibi birçok dezavantaj taşımaktadır.

2.3. LAZER IŞIĞI:

Lazer (Işığın uyarılmış yayılım ışıması ile güçlendirilmesi; Laser, Light amplification through stimulated emission of radiation-) şeklinde dilimize çevrilebileceği sözcüklerin baş harflerinden oluşur.

2.3.1 Lazerin Tarihçesi:

Lazerin teorisi ilk olarak 1917 yılında Einstein tarafından öne sürülmüş ve ilk lazer, 1960 yılında Theodore Maiman tarafından Charles Townes ve Arthur L. Schawlow'un teorilerine dayanarak üretilmiştir. Lazerin mikrodalga frekanslarında çalışan türü olan "maser" (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ise 1953 de Townes tarafından bulunmuştur (Bertolotti M. 2004).

1917: Albert Einstein, Planck'ın radyasyon yasasını kullanarak ve elektromanyetik radyasyonun emilmesi ve salınımı için Einstein katsayıları kavramını tanıtarak lazerler için teorik temeli attı.

1928: R.W. Ladenburg, uyarılmış salınım ve negatif emilimin ilk teorik tanımını sağladı.

1947: W.C. Lamb ve R.C. Rutherford deneysel olarak uyarılmış salınımı gösterdi.

1950: Alfred Kastler, 1952'de Brossel, Kastler ve Winter tarafından gösterilen optik uymayı önerdi.

1960: Theodore Maiman, sentetik bir yakut kristali ve bir flaş lambası kullanarak 694 nm'de darbeli kırmızı lazer radyasyonu üreten ilk pratik lazeri gösterdi.

1960: İranlı bilim adamları Javan ve Bennett, helyum ve neon gazlarının bir karışımını kullanarak ilk gaz lazerini yarattılar.

1962: R.N. Hall, 850 nm'de radyasyon yayan, galyum arsenitten (GaAs) yapılan ilk diyot lazeri gösterdi. Aynı yılın sonlarında Nick Holonyak ilk yarı iletken görünür ışık yayan lazeri geliştirdi.

2.3.2.Uyarılmış Salınım ve Nüfusun Tersinmesi (Popülasyon İncersiyonu)

1917'de Albert Einstein “uyarılmış salınım” ilkesini tanımlayarak kuantum fiziği alanına ıığır açan bir katkıda bulundu. Çalışmaları lazerlerin gelişimi için teorik bir temel oluşturdu. Albert Einstein'ın basit prensiplerden ıığır açan teoriler türetme yeteneği, bilimsel kariyeri boyunca çalışmalarında görölmektedir. Evrensel hız önermesinden özel göreliliği formüle etti; eşdeğerlik ilkesinden genel göreliliği geliştirdi ve istatistiksel teorilerden enerji parçacıklarını keşfetti (Orszag M. 2016).

Fotoelektrik etki makalesi olarak da bilinen 1905 tarihli radyasyon alanının kuantizasyonu üzerine yazdığı makalede, Einstein basit istatistiksel teoriler kuantum teorisinin temelini attı. 1909'da istatistiksel dalgalanmaların parçacık-dalga ikili doğasını göstererek, tamamlayıcılık ilkesini önceden haber verdi.

1917’de tanıttığı radyasyon teorisi, kuantum elektrodinamiği, kuantum optiği, maserler, lazerler ve atom soğutma ile boşluk kuantum elektrodinamiği alanlarına uzanan önemli bir katkıdır. Elektromanyetik tayf boyunca radyasyondan türetilen kozmik görüntülerin temel süreçlerini açıklar.

1905’teki enerji kuantizasyon çalışması, Max Planck’ın kuantum hipotezinin fiziksel bir temelini sağladı ve Planck’ın orijinal siyah cisim radyasyonu teorisinden farklı olarak hemen fiziksel sonuçlar verdi. Sonrasında Einstein’ın termal radyasyon ve madde ile radyasyon arasındaki kuantum etkileşimlerini araştırması, modern kuantum fiziğinin ve kozmosun anlayışımızın yolunu açtı.

Durağan durumlar gibi basit kavramları, Wien yer değiştirme yasası ve Boltzmann dağılımı gibi klasik prensiplerle birleştirerek, Einstein ışınım süreçlerinin kapsamlı bir açıklamasını ve fotonların özelliklerini oluşturdu. Uyarılmış Salınım: Einstein’ın içgörüsü, çok sayıda atomun aynı uyarılmış durumda olması halinde, doğru enerjiye sahip başıboş bir fotonun bir atomu başka bir foton yayması için uyurabileceğiydi. Bu süreç daha sonra tüm atomlar boyunca basamaklanarak fazla enerjilerini düzenli bir şekilde serbest bırakacaktı.

Einstein’ın çalışması, Max Planck’ın bir osilatörün (titreşen bir atom gibi) enerjisinin ayrık değerler alması gerektiğini belirten kuantum hipotezi üzerine inşa edildi. Einstein bu fikri ışığın elektromanyetik salınımlarına genişleterek foton kavramını ortaya attı. Parçacık yaklaşımının sonuçları o zamanlar hala belirsizdi, ancak Einstein’ın denklemleri madde-ışık etkileşimini anlamının yolunu açtı. Günümüze geldiğimizde ise lazerler barkod tarayıcılardan fiber-optik iletişime kadar her yerde kullanılmaktadır.

Üstelik Einstein, atomların radyasyon alanıyla dengeye ulaşmak için radyasyonla etkileşime girdiği üç süreç önerdi. Bu süreçler muhtemelen sistem içindeki farklı enerji durumlarının popülasyonlarında bir denge sağlamak için atomlar tarafından emilimi, salınımı ve muhtemelen uyarılmış radyasyon salınımını içerir.

Özetle, atomlardaki durağan durum popülasyonları ile radyasyon alanı arasındaki denge, Boltzmann dağılımının karşılıklı etkileşimi, kara cisim radyasyonunun tayfsal yoğunluğu ve sistem içinde Einstein tarafından önerilen üç etkileşim süreci aracılığıyla korunur.

Uyarılmış bir atom daha yüksek bir enerji durumunda bulunur ve temel durumuna dönmeye hazırdır. Normalde bu geçiş kendiliğinden gerçekleşir ve belirli bir enerjide bir foton açığa çıkarır. Bununla birlikte, aynı enerjiye sahip gelen bir fotonun varlığında, uyarılmış atom, gelen fotonla enerji ve faz bakımından aynı olan ikinci bir foton yayması için uyarılır. Bu, lazer çalışmasının anahtarıdır.

Bununla birlikte, uyarılmış salınım süreci, nüfusun tersine çevrilmesi olarak bilinen özel bir koşul gerektirir. Bu durum, uyarılmış durumdaki atom sayısı, doğal olarak dengede bulunmayan bir durum olan temel durumdaki sayıyı aştığında meydana gelir. Bu tersine çevirme, atomları daha yüksek enerji seviyelerine yükselten elektriksel deşarj, optik uyarım veya kimyasal reaksiyonlar gibi çeşitli uyarma mekanizmalarıyla elde edilir.

Uyarılmış salınım gerçekleştiğinde, yeni yayılan fotonlar basitçe çevreye salınmaz. Bunun yerine, herhangi bir lazer sisteminin kritik bir bileşeni olan bir optik rezonatör içinde dikkatlice yönlendirilir ve güçlendirilirler. Bir optik rezonatör tipik olarak birbirine paralel yerleştirilmiş iki aynadan oluşur ve yayılan fotonların ileri geri sıçrayarak uyarılmış atomlarla etkileşime girdiği bir boşluk oluşturur.

Aynalar, fotonların çoğunun boşluk içinde sıkışıp kalmasını sağlayacak şekilde yüksek yansıtma özelliğine sahip olarak tasarlanmıştır. Fotonlar ve uyarılmış atomlar arasındaki bu tekrarlanan etkileşim, ışık yoğunluğunu artırarak uyumlu bir ışının oluşmasına yol açar. Aynalar arasındaki mesafeyle belirlenen rezonans koşulu, ışığın yalnızca belirli dalga boylarının güçlendirilmesini sağlayarak lazer çıkışının dar bir çizgi genişliğine sahip olmasını sağlar.

Çizelge 2.7. Kendiliğinden ve uyarılmış salınımın özellikleri

Kendiliğinden salınım	Uyarılmış salınım
Bohr kendiliğinden salınım fikrini önerdi	Einstein uyarılmış salınım kavramını önerdi
Kendiliğinden salınımında ek foton gerekmez	Uyarılmış salınımında çok miktarda foton gerekir
Yayılan ışımaya çok renklidir.	Yayılan ışımaya tek renklidir.
Yayılan ışımaya kararsızdır.	Yayılan ışımaya kararlıdır.
Yayılan ışımaya zayıftır.	Yayılan ışımaya güçlüdür.
Yayılan ışımaya daha düşük bir yönlülük derecesine sahiptir.	Yayılan ışımaya önemli derecede yönlülüğe sahiptir.

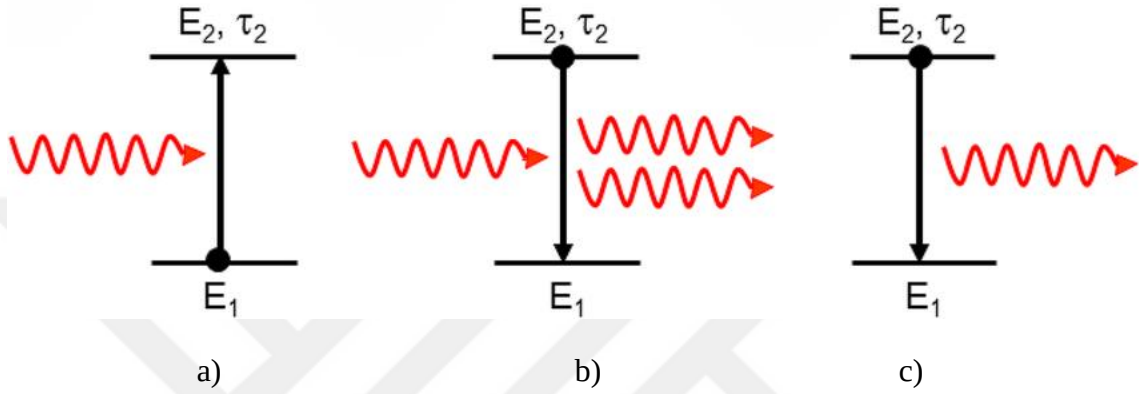
Lazer fiziğinin gelişimi, endüstriyel üretimden tıbbi teşhis ve temel araştırmalara kadar uzanan uygulamalarla çok sayıda alanda devrim yaratmıştır. Malzeme işlemede lazerler, yüksek güç yoğunlukları ve küçük noktalara odaklayabilme yetenekleri sayesinde çeşitli malzemelerin hassas kesimi, kaynağı ve yüzey işlemlerinde kullanılır.

Tıpta lazerler, hassas cerrahi uygulamalarında, cilt gençleştirme ve dermatolojik tedavilerde, iç dokuların dışarıdan görselleştirildiği optik uyum tomografi (OCT) gibi tanısal görüntüleme teknikleri de dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu uygulamaların yanında, lazerler bilimsel araştırmalarda çok önemli bir rol oynamaktadır. Moleküler yapıları ve dinamikleri incelemek için spektroskopide, mesafeleri ölçmek için interferometride, hücresel süreçleri ve hücre altı yapıları görselleştirmek için gelişmiş mikroskopi tekniklerinde kullanılırlar.

2.3.3.Kendiliğinden Salınım:

Kendiliğinden salınım süreci, çeşitli bilimsel ve teknolojik uygulamalarda çok önemli bir rol oynayan temel bir enerji dönüşüm mekanizmasıdır (Bach R. 2002). Uyarılmış bir elektronun veya molekülün daha düşük bir enerji seviyesine bozunarak bir foton saldıgı bu olay, diğer fotonların etkileşimi olmadan doğal olarak meydana gelir. Kendiliğinden salınım ömrü olarak bilinen bu bozunmanın ortalama süresi, ilgili özel malzeme ve enerji seviyelerine bağlı olarak nano saniyeden birkaç saniyeye kadar önemli ölçüde değişebilir.



Sekil. 2.10 a) Emilim, b) Uyarılmış salınım, c) Kendiliğinden salınım

Kendiliğinden salınım atomlar, iyonik bileşikler, moleküllerden oluşan katılarda, sıvılarda ve gazlarda gözlemlenebilir. Bir elektron daha düşük bir enerji seviyesine bozunduğunda açığa çıkan enerjinin korunması gerekir ve ısıya, mekanik titreşimlere veya elektromanyetik fotonlara dönüştürülebilir. Yayılan fotonun enerjisi, elektronun başlangıç ve son enerji seviyeleri arasındaki enerji farkıyla doğru orantılıdır.

Çizelge 2.8. Kendiliğinden salınımın enerji kaynağına göre sınıflandırılması

Salınım türü	Enerji kaynağı
Fotoluminesans	Optik Elektromanyetik dalgalar
Kimyasal Lüminesans	Kimyasal reaksiyonlar
Elektrolüminesans	Uygulanan voltaj
Sonoluminesans	Ses dalgaları
Biolüminesans	Biyolojik işlemler

Bir elektronun daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılmasının birkaç yolu vardır ve ortaya çıkan kendiliğinden salınım süreçleri, uyarımı başlatan enerji kaynağına göre sınıflandırılabilir. Karanlıkta parlayan malzemelerde olduğu gibi, ilk enerji kaynağı optik olduğunda fotoluminesans meydana gelir. Kimyasal lüminesans, parlak çubuklarda

görüldüğü gibi, kimyasal bir reaksiyonun başlangıç enerjisini sağladığı süreçtir. Elektrolüminesans, ışık yayan diyotlarda (LED'ler) gözlemlendiği gibi, elektrik voltajının uygulanmasından kaynaklanan ışık salınımıdır. Sonolüminesans, ses dalgaları tarafından sağlanan enerjinin sonucudur, katodolüminesans ise hızlandırılmış elektronların hedef malzeme üzerindeki etkisinden dolayı ışığın yayılmasıdır. Son olarak biyolüminesans, ateşböcekleri gibi canlı organizmalarda meydana gelen ışığın kendiliğinden yayılmasıdır.

Kendiliğinden salınım süreçlerinin anlaşılması ve kontrolü, çeşitli teknolojik uygulamaların geliştirilmesinde çok önemli olmuştur. Optoelektronik alanında, kendiliğinden salınım, lazerlerin çalışmasında hayati bir rol oynar; burada fotonların uyarılmış salınımı, ışığın güçlendirilmesi için birincil mekanizmadır. Ayrıca ekranlarda, aydınlatmada ve iletişim teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan ışık yayan diyotların çalışması için kendiliğinden salınım gereklidir.

2.3.4. Emilim:

Emilim süreci, optik ve enerji dönüşümü alanında temel bir olgudur (Rinne O. 2009). Foton formundaki optik enerjinin elektronların, atomların veya moleküllerin iç enerjisine dönüştürüldüğü mekanizmayı açıklar. Bu ilgi çekici süreç, emilen enerjinin elektriğe dönüştürüldüğü güneş pillerinden foto detektörlere kadar çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır.

Bir foton emildiğinde taşıdığı enerji, atom içindeki bir elektronun daha düşük bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine geçişine neden olur. Enerjiyi emen elektronlar katıları, sıvıları, gazları ve plazmaları oluşturan atomların parçası olabilir. Bu elektronlar izole edilmiş nötr atomlarla, iyonik bileşiklerle veya karmaşık organik moleküllerle ilişkili olabilir. Ayrıca, enerjiyi emen elektronlar, her biri kendine özgü elektronik özelliklere sahip olan iletken, yalıtkan veya yarı iletken malzemelerde bulunabilir.

Emilecek foton enerjilerinin aralığı oldukça geniştir; görünür tayfadan çok daha yüksek veya daha düşük enerjilere kadar uzanır. Örneğin, temel durumdaki izole edilmiş nötr neon atomları durumunda, elektronlar 2p enerji seviyesini işgal eder, ancak 3s seviyesini işgal etmez. Bu iki seviye arasındaki enerji aralığı yaklaşık 1,96 eV'dir ve bu, 632,8 nm dalga boyuna sahip kırmızı bir fotonun enerjisine karşılık gelir. Bu enerjinin bir fotonu neon gazına çarparsa soğurulabilir ve neon atomunun bir elektronu daha yüksek enerji seviyesine uyarılabilir. Daha düşük enerjili fotonlar emilmezken, daha yüksek enerjili fotonlar izin verilen enerji seviyelerinin mevcudiyetine bağlı olarak emilebilir.

Benzer şekilde, yarı iletken galyum fosfit (GaP), 560 nm dalga boyuna sahip yeşil bir fotonun enerjisine karşılık gelen 2,2 eV'lik bir enerji aralığına sahiptir. Bu enerjinin bir fotonu bir galyum fosfit parçasına çarparsa soğurulabilir ve malzeme içindeki bir elektronun uyarılmasına yol açabilir.

Fotonların emilmesi ve ardından enerjilerinin iç enerjiye dönüştürülmesinin, bilim ve teknolojinin çeşitli alanları için derin etkileri vardır. Örneğin güneş pillerinde ve fotodetektörlerde, uyarılmış yük taşıyıcıları malzeme içinde daha serbestçe hareket edebildiğinden emilen enerji elektriğe dönüştürülür. Bu süreç, bu cihazların çalışmasının

merkezinde yer alır ve ışığın verimli bir şekilde kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar.

Sonuç olarak soğurma süreci, optik enerjinin elektronların, atomların veya moleküllerin iç enerjisine dönüştürüldüğü temel bir mekanizmadır. Bu olgu, ilgili malzemelerin enerji düzeyleri ve elektronik özellikleri tarafından yönetilir ve enerji dönüşümünden optik algılamaya kadar çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynar.

2.3.5. Kara Cisim Radyasyonu:

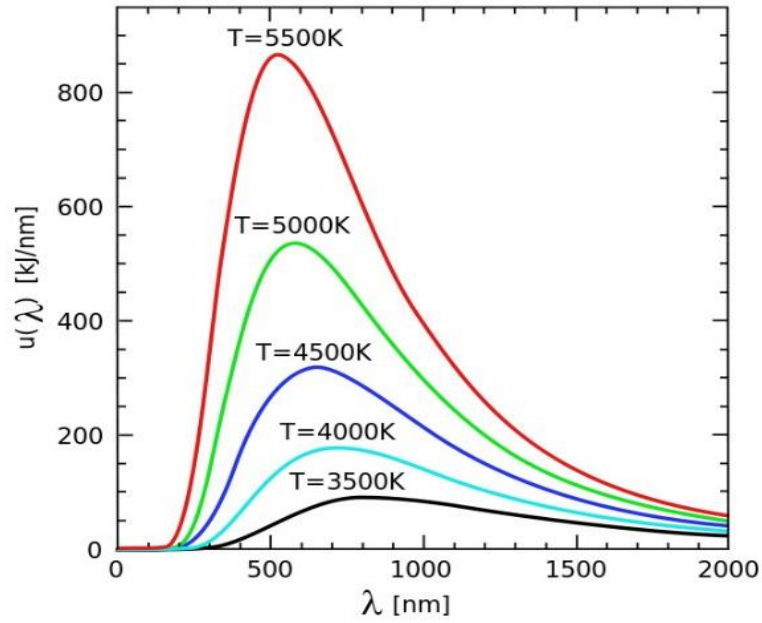
Fizik alanında, kara cisim ışıının incelenmesi uzun zamandan beri maddenin ve enerjinin temel doğasına ışık tutan büyüleyici ve tamamlayıcı bir bileşen olmuştur. Bir nesne mutlak sıfırın üzerindeki bir sıcaklığa ısıtıldığında meydana gelen bu olay, ışığın temel parçacıkları olan fotonların kendiliğinden yayılmasıyla belirgindir. Bu sürecin inceliklerini anlamak, yalnızca elektronların atomların içindeki davranışlarına dair paha biçilmez bilgiler sağlamakla kalmaz, aynı zamanda evren anlayışımızda devrim yaratan bir alan olan kuantum mekaniğinin temel taşlarından biri olarak da hizmet eder.

Alman fizikçi Max Planck'ın, kara cisim ışıının enerji yoğunluğunu frekansın bir fonksiyonu olarak doğru bir şekilde tanımlayan çığır açan bir formül elde etmesiyle 1900 yılı fizik tarihinde önemli bir dönüm noktası oldu (Nauenberg M. 2016). Planck'ın enerjinin yalnızca ayrı, nicelenmiş miktarlarda yayılabileceği veya emilebileceği varsayımına dayanan çalışması, enerjiyi sürekli bir olgu olarak gören zamanın hakim klasik teorileriyle tam bir tezat oluşturuyordu. Işık hızı, Planck sabiti ve Boltzmann sabiti gibi bir dizi temel sabiti içeren Planck formülü, yalnızca mevcut deneysel verilerle uyumlu olmakla kalmadı, aynı zamanda kuantum mekaniğinin gelişiminin önünü de açtı. Fiziksel dünyaya dair anlayışı değiştirdi. Birim bant genişliği için tayf enerji yoğunluğu u (J.s/m³ cinsinden)

$$u = \frac{8\pi f^2}{c^3} \frac{hf}{e^{(hf/k_B T)} - 1} \quad (9)$$

Eşitlik (9) de c ışık hızı, h Planck sabiti, k_B Boltzman sabiti, f Herz cinsinden frekans T ise kelvin cinsinden sıcaklıktır. u 'nun λ (nm) cinsinden yazılması daha aşina olduğundan $\lambda = c/f$ konularak u da (kJ/nm) biriminde elde edilir.

Bir siyah cisim radyatörü tarafından yayılan fotonlar nispeten geniş bir dalga boyu aralığına sahiptir ve bu bant genişliği sıcaklığa bağlıdır. Şekil 2.9 farklı sıcaklıklardaki (3500, 4000, 4500, 5000 ve 5500 K) siyah cisim radyatörleri için dalga boyuna bağlı olarak birim bant genişliği başına enerji yoğunluğunu göstermektedir. Oda sıcaklığı yaklaşık 300 K'ye karşılık gelir. Görünür fotonlar 400 nm ile 650 nm arasında dalga boyuna sahiptir. Şekilde, daha yüksek sıcaklıklardaki siyah cisim kaynaklarının hem daha fazla foton yaydığı hem de yayılan fotonların büyük bir bölümün görünür tayf bölgesinde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.11. Kara cisim ışıması tayfı.

Kara cisim radyasyonu süreci, bir nesnenin atomlarındaki elektronların termal uyarılmasının bir sonucudur. Mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklıklarda, bu elektronlardan bazıları temel durumlarının üzerindeki enerji seviyelerine yükseltilir ve daha düşük enerji durumlarına geri dönerken, kendiliğinden salınım süreci yoluyla fotonlar yayarlar. Mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklığa sahip herhangi bir nesnede doğal olarak meydana gelen bu foton salınımı, kara cisim radyasyonu olarak adlandırılır.

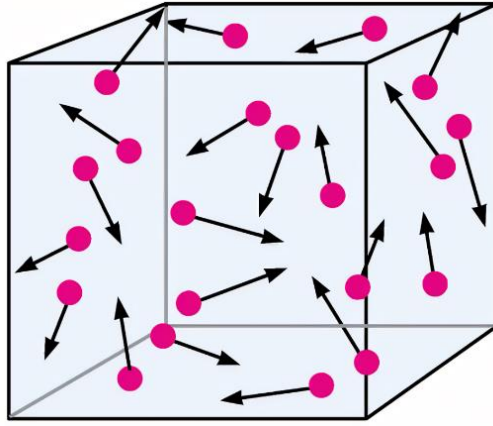
Kara cisim radyatörü tarafından yayılan fotonların özellikleri, nesnenin sıcaklığı ve yayılan ışığın dalga boyu da dahil olmak üzere bir dizi faktör tarafından belirlenir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, bir kara cisim radyatörünün birim bant genişliği başına enerji yoğunluğu sıcaklıktan büyük ölçüde etkilenir; daha yüksek sıcaklıktaki nesneler daha fazla sayıda foton salar ve bu fotonların daha büyük bir kısmı görünür ışık tayfı içine düşer.

Büyük patlamanın kalıntısı olduğuna inanılan kozmik mikrodalga arka plan radyasyonu, belirli bir sıcaklığa kadar soğumuş bir evrenin kara cisim radyasyonu olarak modellenebildiğinden, bu olay özellikle evrenin evrimini anlamamızla ilgilidir. (Yaklaşık 2,7 Kelvin)

Kara cisim ışımasının incelenmesi, fiziksel dünyanın anlaşılmasına önemli katkılar sağlamakla kalmamış, aynı zamanda astrofizikten malzeme bilimine kadar geniş bir yelpazede pratik uygulamalara da yol açmıştır. Verimli ışık kaynaklarının tasarımı, gelişmiş kızılötesi görüntüleme sistemleri ve termal yönetim çözümleri gibi alanlarda kara cisim radyasyonunun prensipleri temel bir rol oynamaktadır. Bu prensiplerin anlaşılması, modern teknolojinin birçok alanında, örneğin uydu teknolojisi, tıbbi görüntüleme ve enerji üretimi gibi sektörlerde, önemli teknolojik gelişmelere imkan tanımıştır.

2.3.6. Enerji seviyeleri popülasyonu:

1900 yılında Alman fizikçi Max Planck, bir boşluk içindeki elektromanyetik alanın tayf enerji yoğunluğunu türetti. Çığır açan çalışması, elektromanyetik tayfın farklı dalga boyları boyunca enerjinin dağılımını doğru bir şekilde tanımlayan matematiksel bir ifade sağladı. Planck'ın daha sonra Planck yasası olarak bilinen türevi, kara cisim radyasyonunun anlaşılmasında önemli bir dönüm noktası olmuş ve kuantum mekaniğinin gelişiminin temelini atmıştır (Müller I. 2007).



Şekil 2.12. Karacisim tayfında T sıcaklığına sahip gaz molekülleri

$$p(\omega) = \left(\frac{dE}{d\omega} \right) \frac{1}{v} = \frac{\hbar}{c^3 \pi^2} \frac{\omega^3}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \quad (10)$$

Bir gazdaki tek bir molekülün temel $|g\rangle$ veya uyarılmış $|e\rangle$ durumda olma olasılığı, istatistiksel mekanikte ilk kez 1860 yılında tanımlanan temel bir kavram olan Maxwell-Boltzmann dağılımı tarafından açıklanmıştır. Bu dağılım, termal dengedeki bir sistem içinde farklı enerji seviyelerini işgal eden parçacıkların göreceli olasılığını tanımlar. Bir molekülün belirli bir durumda olma olasılığı, durumlar arasındaki enerji farkı, sistemin mutlak sıcaklığı ve sistemin toplam enerjisi tarafından belirlenir. Bu dağılımı anlamak, gazların ve diğer termodinamik sistemlerin davranışını moleküler düzeyde analiz etmek için çok önemlidir.

$$P(E_g) = \frac{e^{-E_g/k_B T}}{Z}, P(E_e) = \frac{e^{-E_e/k_B T}}{Z} \quad (11)$$

Verilen ifade, söz konusu molekülün bir temel durum $|g\rangle$ (g-ground, temel) ve bir uyarılmış durum $|e\rangle$ (e-excited, uyarılmış) içeren basit iki seviyeli bir sistemden daha karmaşık bir kuantum durum yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Normalleştirme sabiti Z , molekülün olası durumlarından herhangi birinde bulunma olasılıklarının toplamının bir olmasını sağlar. Bu, molekülün temel ve uyarılmış hallerin ötesinde ek hallerde bulunabileceğini ve molekülün ne temel hal ne de uyarılmış hal olmayan bir

halde bulunmasının mümkün olduğunu gösterir. Molekülün tam kuantum durum yapısını anlamak, davranışını ve etkileşimlerini doğru bir şekilde tanımlamak için gereklidir.

$$\frac{P(E_e)}{P(E_g)} = e^{-(E_e-E_g)/k_B T} = e^{-\hbar\omega/k_B T} \Rightarrow \omega = \frac{E_e - E_g}{\hbar} \quad (12)$$

Şekil 2.12 deki kutuda N molekül varsa, temel $|g\rangle$ ve uyarılmış $|e\rangle$ durumları (nispeten düşük sıcaklıklarda)

$$N_g = NP(E_g), N_e = NP(E_e) \quad (13)$$

Böylece uyarılmış ve taban durum sayılarının oranı (14):

$$\frac{N_e}{N_g} = e^{-\hbar\omega/k_B T} \quad (14)$$

2.3.7. Oran Eşitlikleri:

Kuantum mekaniği ilkeleri uyarınca, atomik enerji durumlarının nüfus dinamikleri, soğurma ve salınım süreçleri arasındaki hassas denge tarafından yönetilir. Özellikle, fotonların atomlar tarafından soğurulması elektronları temel durumdan $|g\rangle$ uyarılmış duruma $|e\rangle$ yükseltir, böylece $|e\rangle$ durumunun popülasyonunu artırır ve buna bağlı olarak temel durumun nüfusunu azaltır. Tersine ister kendiliğinden ister uyarılmış mekanizmalar yoluyla olsun, foton salınımı uyarılmış halin $|e\rangle$ popülasyonunu azaltırken temel halin $|g\rangle$ nüfusunu yeniler. Ayrıca hem soğurma hem de uyarılmış salınım süreçlerinin, nüfustan geçen foton sayısı ile doğrudan ilişkili olan gelen elektromanyetik (EM) alanın enerji yoğunluğuyla orantılı olduğu bilinmektedir. Bu temel varsayımlar altında, sırasıyla $N_g(t)$ ve $N_e(t)$ olarak gösterilen temel durum ve uyarılmış durum popülasyonlarının zamansal gelişimi ışık-madde etkileşimini yöneten dinamikleri anlamak için kapsamlı bir matematiksel çerçeve sağlayan bir dizi birleşik diferansiyel denklemle tanımlanabilir (Marcuse D. 1983).

$$\frac{dN_g}{dt} = A_{eg}N_e - B_{ge}\rho(\omega)N_g + B_{eg}\rho(\omega)N_e \quad (15)$$

kendiliğinden
salınım oranı

soğurma
oranı

uyarılmış
salınım oranı

$$\frac{dN_e}{dt} = -A_{eg}N_e + B_{ge}\rho(\omega)N_g - B_{eg}\rho(\omega)N_e \quad (16)$$

Burada sadece $|g\rangle$ ve $|e\rangle$ arasındaki geçişleri göz önüne aldığımızda (17)

$$\frac{d}{dt}(N_g + N_e) = 0 = \frac{dN_g}{dt} = -\frac{dN_e}{dt} \quad (17)$$

Kararlı durumdaki bir sistem için (18)

$$\frac{dN_g}{dt} = -\frac{dN_e}{dt} = 0 \quad (18)$$

Tabi ki bu durumda soğurma ve salınım süreçleri devam etmekte ama bunlar birbirini nötrlemektedir (19), dolayısıyla:

$$A_{eg}N_e - B_{ge}\rho(\omega)N_g + B_{eg}\rho(\omega)N_e = 0 \quad (19)$$

$\rho(\omega)$ için çözüldüğünde

$$\rho(\omega) = \frac{\left(\frac{A_{eg}}{B_{eg}}\right)}{\left(\frac{B_{ge}}{B_{eg}}\right)\left(\frac{N_g}{N_e}\right) - 1} \quad (20)$$

Termal denge özel durumunda

$$\frac{N_e}{N_g} = e^{-\hbar\omega/k_B T} \quad (21)$$

olur ve

$$\rho(\omega) = \frac{\left(\frac{A_{eg}}{B_{eg}}\right)}{\left(\frac{B_{ge}}{B_{eg}}\right)e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \quad (22)$$

Termal dengede (22) elde edilir. (22) termal dengede geçerlidir (ki bu sabit durumun özel bir durumudur) ve bu nedenle herhangi bir sıcaklık için Planck'ın tayf yoğunluk formülüne uymalıdır (23):

$$\frac{\left(\frac{A_{eg}}{B_{eg}}\right)}{\left(\frac{B_{ge}}{B_{eg}}\right)e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} = \frac{\hbar\omega^3}{c^3\pi^2} \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \quad (23)$$

Bunun gerçekleşebilmesi içinde tek koşul:

$$B_{ge} = B_{eg} \equiv B \quad ve \quad A_{eg} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} B \equiv A \quad (24)$$

(24) ile elde edilen A ve B Einstein katsayıları olarak adlandırılır. Böylece oran eşitliği (25) ile ifade edilir

$$\frac{dN_g}{dt} = AN_e - B\rho(\omega)N_g + B\rho(\omega)N_e \quad (25)$$

2.3.8. Lazer:

Bazıları $N_g(t)$ temel durumda ve bazıları $N_e(t)$, uyarılmış durumda olan birçok molekülden oluşan gaza ışık gönderirsek, uyarılmış moleküller foton yayar (uyarılmış veya kendiliğinden salınım yoluyla) ve temel durumda olanlar fotonları emer. Kazanç elde etmek için soğurulandan daha fazla foton yayılması gerekir. Yaratılan fotonların sayısındaki toplam değişim N_g 'daki değişimle aynıdır; bu nedenle, kazanç elde etmek için gereken koşul $dN_g/dt > 0$ olmasıdır. Bu ise:

$$\frac{dN}{dt} > 0 \Rightarrow AN_e + B\rho(\omega)(N_e - N_g) > 0 \quad (26)$$

olması gerektiği anlamına gelmektedir. Ancak bu, kendiliğinden salınımdan kaynaklanan fotonları da içerecektir ve bu fotonlar kararlı bir şekilde toplanmaz. O halde, kararlı fotonların sayısını arttırmak için varılan sonuç:

$$B\rho(\omega)(N_e - N_g) > 0 \Rightarrow N_e > N_g \quad (27)$$

Bu koşul nüfus tersinmesi (population inversion) olarak adlandırılır (Halavanau A. 2020). Kazanç ortamında nüfus tersinmesi elde etmek lazer çalışması için çok önemlidir.

$$\frac{N_e}{N_g} = e^{-\hbar\omega/k_B T} < 1 \quad (28)$$

Kazanç ortamında nüfus tersinmesine nasıl ulaşabilir ki bu (27) koşulu nedeniyle gaz ısıtılarak gerçekleştirilemez. Çünkü termal dengede nüfus tersinmesi oluşamaz. Bir şekilde moleküllerin uyarılması gerekmektedir. Parçacıkları kazanç ortamında uyarmanın çeşitli yolları vardır. Bu, başta optik uyarma veya elektriksel uyarma olmak üzere çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Optik uyarımda, harici bir kaynaktan gelen ışık, kazanç ortamındaki elektronları daha yüksek bir enerji durumuna uyarır. Örneğin, üç seviyeli bir lazer sisteminde, elektronlar temel durumdan daha yüksek bir enerji durumuna uyarılır ve daha sonra çok kararlı bir duruma bozunarak bir nüfus tersinmesini oluştururlar. Elektrikli uyarımda, elektronları uyarmak için bir elektrik akımı kullanılır. Bu yöntem genellikle yarı iletken lazerlerde kullanılır. Her iki yöntem de uyarılmış durumda temel durumdan daha fazla elektron olmasını sağlayarak uyarılmış salınımı ve lazer etkisini mümkün kılar.

İki seviyeli bir sistemde, emilim ve salınım süreçleri arasındaki denge kendiliğinden salınım ile bozulur ve uyarılmış durum atomlarının sayısının temel durum atomlarının sayısından daha az olduğu $N_e < N_g$ durumuna yol açar. Lazer için gerekli olan nüfus tersinmesini elde etmek, uyarılmış salınımın uyarım emiliminden farklı bir dalga boyunda gerçekleşmesi koşuluna bağlıdır. Sonuç olarak, emilim ve salınım dalga boylarının gerekli şekilde ayrılmasını sağlayabilmek ve lazer elde etmek için en az üç enerji seviyesi gereklidir.

2.8.3.1.Üç Seviyeli Lazer:

Lazer operasyonunun ilkeleri kuantum mekaniğine ve atom veya moleküllerdeki enerji durumlarının uyarımına dayanır. Üç seviyeli bir lazer sisteminde süreç, elektronları temel durumdan (seviye 0) daha yüksek bir enerji durumuna (seviye 2) uyararak uyarım ışığının emilmesiyle başlar (Taira 1997). Bu uyarılmış elektronlar 2. seviyede kalmazlar, ancak aşırı enerjilerini ışık yerine ısı olarak serbest bıraktıkları fonon etkileşimleri gibi ışıınımsız yollarla hızlı bir şekilde daha düşük bir enerji durumuna (seviye 1) geçerler. Bu geçiş, lazer eylemi için gerekli olan temel durumdan (seviye 0) daha fazla elektronun uyarılmış durumda (seviye 1) olduğu bir durum olan popülasyonun tersine çevrilmesi için çok önemlidir.

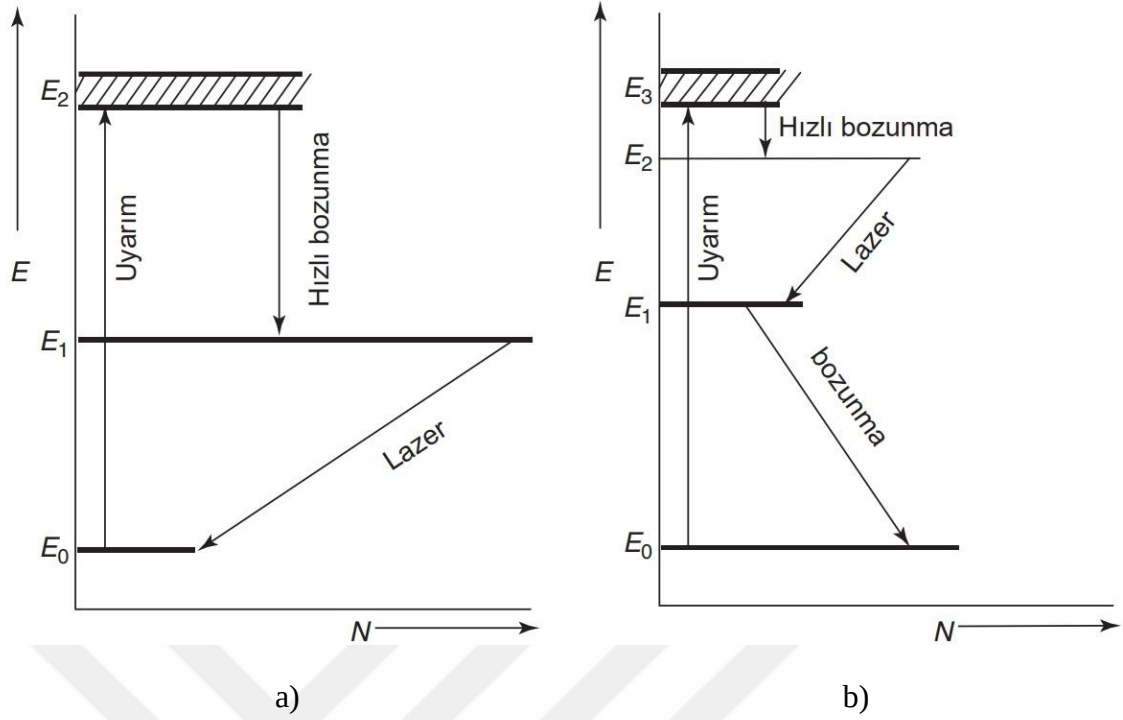
Bu sürecin verimliliği çok önemlidir çünkü popülasyonun tersine dönmesini sürdürmek için gereken uyarım enerjisi miktarını belirler. Üç seviyeli bir sistemde, enerji açısından maliyetli olabilen bu tersinmeyi gerçekleştirmek için atomların veya moleküllerin yarısından fazlasının uyarılması gerekir. Dört seviyeli lazer sisteminin avantaj sağladığı nokta burasıdır. Dört seviyeli bir sistemde, uyarım ışığı elektronları temel durumdan (seviye 0) daha da yüksek bir enerji durumuna (seviye 3) yükseltir ve bu daha sonra hızla daha düşük bir enerji durumuna (seviye 2) bozunur.

Buradaki temel fark, düşük lazer seviyesinin (seviye 1) temel durumdan yeterince uzakta olması, termal popülasyon olasılığını azaltması ve dolayısıyla nüfusun tersine çevrilmesini sağlamak ve sürdürmek için daha az enerji gerektirmesidir.

Bu geçişlerin dinamikleri, lazer ortamının büyük ölçüde değişebilen spesifik özelliklerinden etkilenir. Bazı ortamlar, lazer dalga boyuna bağlı olarak üç seviyeli veya dört seviyeli sisteme daha yakın özellikler sergileyebilir. Ek olarak, söz konusu enerji seviyeleri tamamen ayrı değildir ancak lazerin verimliliğini ve çıkışını etkileyebilecek termal titreşimler gibi çeşitli faktörler nedeniyle genişletilebilir.

Özetle, lazer sistemlerinin tasarımı ve işletimi karmaşıktır ve ister sürekli ister darbeli olsun, istenen lazer eylemini elde etmek için enerji durumları, geçişler ve ortam özellikleri arasında dikkatli bir denge gerektirir. Üç seviyeli ve dört seviyeli bir sistem arasındaki seçim, özel uygulamaya ve gerekli verime bağlıdır; dört seviyeli sistem, popülasyonun tersine çevrilmesi için daha düşük eşik değeri nedeniyle genellikle daha avantajlıdır.

Gelen uyarım ışığı temel durumdan (seviye 0) seviye 2'ye geçiş tarafından emilir. 2. seviyedeki popülasyon, ışıınımsız bir geçiş yoluyla 1. seviyeye rahatlar. Popülasyonun yarısından fazlası temel durumdan hareket ettirebiliyorsa, üst ve alt lazer seviyeleri olan 1 ile 0 seviyeleri arasında bir popülasyon tersine çevrilmesi kurulabilir. Ancak bu, popülasyonun tersine çevrilmesini sağlamak için önemli miktarda uyarım enerjisi gerektirir.



Şekil 2.13 a) Üç seviyeli lazer, b) Dört seviyeli lazer

2.3.8.2.Dört Seviyeli Lazer:

Uyarım geçişi temel durumdan (seviye 0) seviye 3'e kadar gerçekleşir ve daha sonra seviye 2'ye düşer. Seviye 1, temel durumun yeterince üzerindeyse, seviye 2'deki tek bir elektron, üç seviyeli bir sisteme göre çok daha az uyarım enerjisi gerektiren bir nüfus tersinmesi oluşturur (Digonnet M.1990). Aynı zamanda 1. seviyedeki nüfusun hızla temel duruma bozunması döngünün devamını sağlar.

$$\rho_k(\omega) \gg \frac{A}{B} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \quad (29)$$

Seviye 3 uyarıldığında, hızlı bir şekilde 2 seviyesine gevşeyerek uyarıma geri salınımı önler ve seviye 3'te düşük bir popülasyonu korur. Bu, 2 seviyesinde, uyarılmış durumda temel durumdan daha fazla atomun bulunduğu bir nüfusun tersine çevrilmesine izin verir. Lazer elde etmek için popülasyonun en az yarısının tersine çevrilmesi gerekir, bu da lazer eşiği olarak bilinen önemli miktarda uyarım gücü gerektirir. Bu kırılma eşiği ρ_k (29) Einstein katsayıları ve enerji yoğunluğu arasındaki ilişki ile belirlenir.

2.3.8.3. Eşik Kazancı Katsayısı ve Optik Rezonatör:

Bir lazerin çalışabilmesi için, ortamdaki atomların uyarım ve emilim süreçleriyle uyumlu fotonların üretilmesi gerekir. Eşik kazanım katsayısı, bu süreçte kritik bir rol oynar çünkü bu katsayı, lazer ortamındaki kazanımın, kayıplarla dengelendiği noktayı belirler.

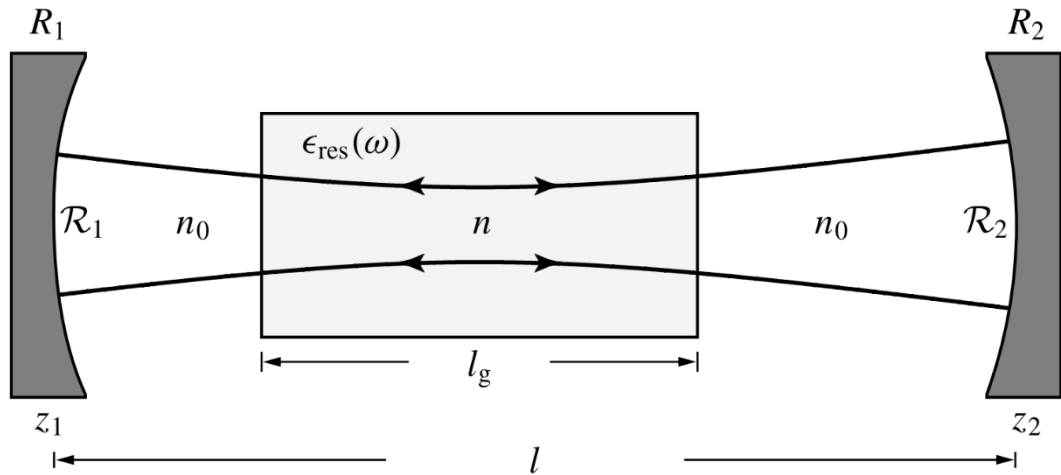
Kazaç eşiği bağıntısında (29) $g_{eşik}$ kazanç eşiği, α_0 optik kayıp R_1 ve R_2 aynaların yansıtma gücü, l ise kazanç ortamının uzunluğudur. Eğer $R_1 R_2 < 1$ koşulu

sağlanıyorsa, sağ taraftaki her iki terim de pozitif olduğu için, bu durum gerekli eşik kazanç parametresini artıran her iki terimin de etkili olduğunu gösterir (Björk G. 1994). Bu bağlamda, kazanç parametresi $g_{eşik}$ 'in asgariye indirilmesi, düşük dağıtılmış kayıplar ile yüksek yansıtıcılığa sahip aynalar gerektirdiğinden, bu koşulları sağlayan tasarımlar üzerinde yoğunlaşmak önemlidir.

Bununla birlikte, l 'nin paydada yer alması, kazanç ortamının uzatılmasıyla gerekli eşik kazancının azalacağını düşündürse de bu genel olarak geçerli bir durum değildir. Çünkü l 'nin artışı ile α_0 değerinin genellikle difraksiyon kayıpları nedeniyle artması, gerekli eşik kazancının daha karmaşık bir bağımlılığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, sistem dinamiklerinin ve optik parametrelerin bir bütün olarak göz önünde bulundurulmasını zorunlu kılan bir olgudur.

Eşik kazanım katsayısının belirlenmesinde iki ana unsur dikkate alınır: ortamdaki atomlarının uyarılabilirliği ve kayıpların miktarı. Bu bağlamda, toplam kazanç katsayısı, birim uzunluk başına çıkarılan foton sayısını ifade ederken, kayıplar ise lazer ortamında meydana gelen enerji kayıplarını temsil eder. Lazerin etkili bir şekilde çalışabilmesi için, toplam kazancın belli bir eşiği aşması ve bu aşamada kayıpların en aza indirilmesi gerekmektedir.

Optik boşluk olarak da bilinen bir lazer rezonatörü, bir lazer sisteminin çok önemli bir bileşenidir (Ananov I. 1990). Işığı bir döngü içinde hapseden ve bir kazanç ortamından her geçişte yükselten bir dizi aynadan oluşur. Rezonatörün tasarımı, lazerin çıkış gücü, ışın kalitesi ve dalga boyu gibi özelliklerini belirlemek için hayati önem taşır. Rezonatör gibi gelişmiş yazılımlar, ışın kalitesi ve kararlılık gibi faktörleri dikkate alarak lazer rezonatörlerini tasarlamak ve optimize etmek için kullanılabilir.



Şekil 2.14 Aynalar ve optik dengeleyici boşluktan oluşan lazer kazanç ortamı

$$g_{eşik} = \alpha_0 - \frac{1}{2l} \ln(R_1 R_2) \quad (30)$$

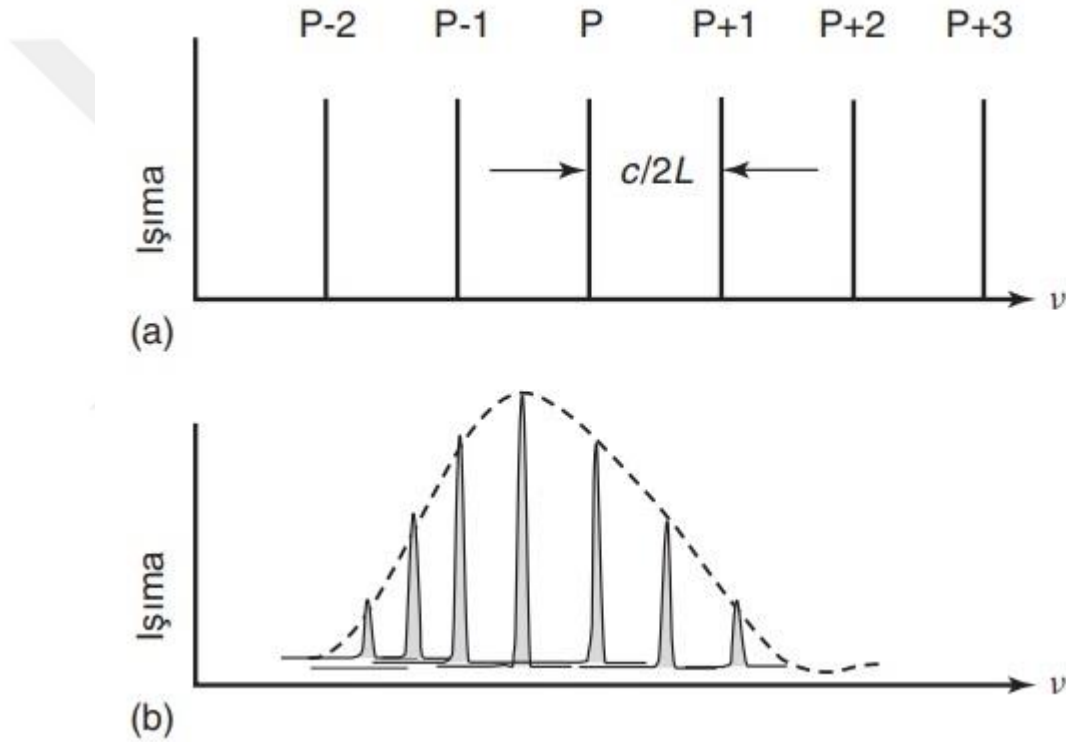
Rezonatör, her biri belirli uygulamalar için kendi avantajlarına sahip olan doğrusal veya halka kurulumları dahil olmak üzere çeşitli şekillerde yapılandırılabilir.

2.3.8.4. Lazer Modları

Lazerlerin farklı modları, lazer ışınının nasıl yayıldığı ve odaklandığı konusunda önemli bir etkiye sahiptir. Bunlar aksenal modlar ve çapraz modlardır.

2.3.8.4.1. Aksenal Modlar

Aksenal modlar, lazerlerin uzunluğu boyunca belirli bir düzen içinde yayılan ışıklı durumları ifade eder.



Şekil 2.15 Lazer Aksenal modları a) Temel gösterim b) Lazerin Çizgi genişliği boyunca gösterim

Bu modlar, lazerin optik rezonatöründe, genellikle uzamsal bir düzlemde belirli bir dalga boyuna sahip ışık dalgalarının birbirine etkileşimi sonucu oluşur. Aksenal modlar, lazerin temel frekansı ve harmonik frekanslarıyla ilişkilidir (Nesterov A, 2000).

Aksenal modlar, genellikle uzunlamasına modlar olarak da adlandırılır. Bu modlar, lazerin rezonatör uzunluğuna bağlı olarak belirli bir sayıda bulunabilir ve her bir mod, belirli bir frekansta titreşir. Aksenal modlar, temel mod (TE0) ve farklı harmonikler (TE1, TE2, vb.) içerir. Bu modlar, lazer ışını oluşturmak ve kontrol etmek için kritik dönemeçlerdir.

Eksenel Modların Özellikleri:

Frekanslar: Lazerin rezonatör uzunluğu ile doğru orantılıdır. Uzunluk arttıkça, mod frekansı daha düşük olur.

Kararlılık: Eksenel modlar oldukça istikrarlıdır ve bu durum lazerin çalışma koşullarına göre değişiklik göstermez.

Enerji Dağılımı: Eksenel modlar genellikle yüksek enerji yoğunluğu sağlar; bu da bazı uygulamalarda avantaj yaratır.

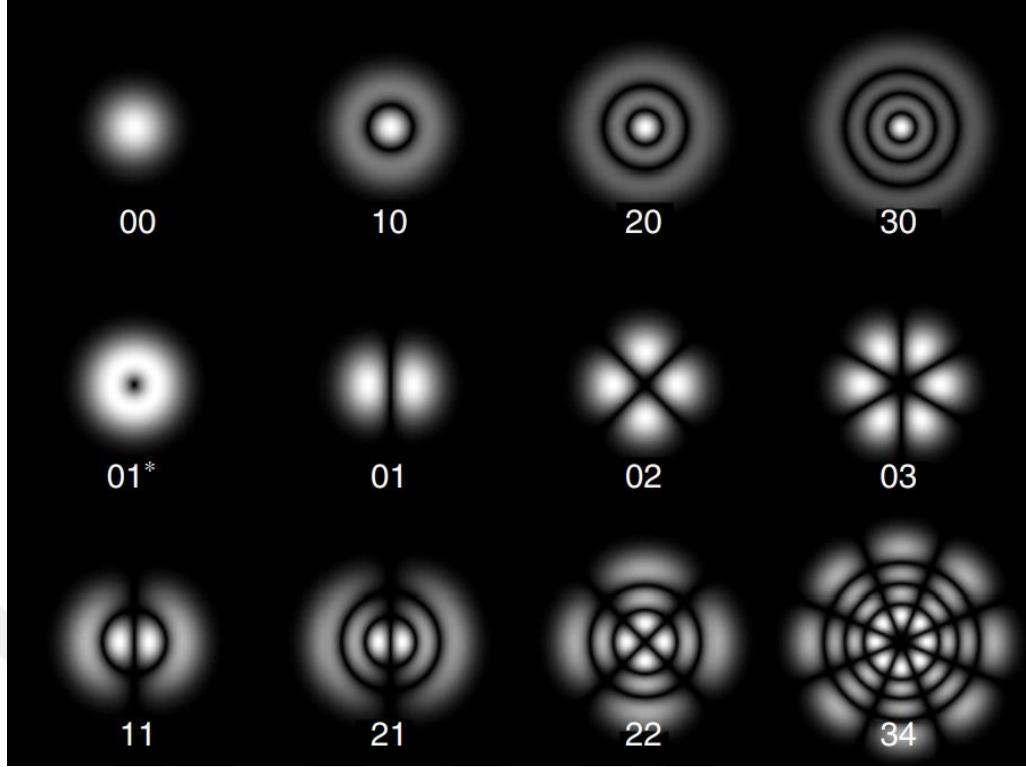
Eksenel modlar, özellikle telekomünikasyon, mühendislik ve bilimsel araştırmalarda geniş bir uygulama yelpazesi bulur. Yüksek enerji gerektiren uygulamalarda ve hassas ölçümlerde, eksenel modların sağlamlığı ve enerji verimliliği oldukça değerlidir.

2.3.8.4.2.Çapraz Modlar:

Lazer çapraz modları, lazer ışınının kesitindeki uzamsal yoğunluk dağılımını tanımlar ve rezonatörün geometrik şekli ve boyutları tarafından belirlenir (Hasnanin 1990) . Rezonatörün genişliği, lazer çapraz modlarını belirlemede önemli bir rol oynar. Daha geniş bir rezonatör, daha yüksek bir temel mod büyüklüğüne ve daha büyük bir temel mod alanına sahip olacak, bu da ışın büyüklüğünün daha büyük olmasına ve daha yüksek modları desteklemesine olanak tanıyacaktır. Rezonatör genişliği azaldığında, temel mod alanı da azalır ve bu da daha küçük bir ışın büyüklüğüne ve daha düşük modları desteklemesine yol açar. Ayrıca, rezonatör genişliği, çapraz modların frekans aralığını ve modlar arasındaki ayırmayı da etkiler. Rezonatör genişliği arttıkça, çapraz modların frekans aralığı azalır ve modlar arasındaki ayırım artar. Bu, daha geniş bir rezonatörün, daha yüksek mod sıralarıyla daha fazla çapraz modu destekleyebileceği ve daha yüksek çözünürlük ve güç seviyeleri elde edilebileceği anlamına gelir. Rezonatör genişliğinin lazer çapraz modlarını kontrol etme yeteneği, optik uygulamalarda önemli bir etkiye sahiptir, çünkü bu modlar ışın kalitesi, güç çıkışı ve çözünürlük gibi çeşitli lazer özelliklerini etkiler.

Çapraz modlar, lazerin dik yönünde, yani lazer ışınının yayılma yönüne dik olan düzlemdeki ışık dalgalarının davranışını ifade eder. Bu modlar, lazerin çapına ve yapılandırmasına bağlı olarak oluşur. Çapraz modlar, ışığın yoğunluğunun uzamsal dağılımını belirler ve genellikle temel mod ve yüksek mertebe modları olarak ikiye ayrılır.

Lazer çapraz modları, lazer ışınının kesitindeki uzamsal yoğunluk dağılımını tanımlar ve rezonatörün geometrik şekli ve boyutları tarafından belirlenir. Rezonatörün genişliği, lazer çapraz modlarını belirlemede önemli bir rol oynar. Daha geniş bir rezonatör, daha yüksek bir temel mod büyüklüğüne ve daha büyük bir temel mod alanına sahip olacak, bu da ışın büyüklüğünün daha büyük olmasına ve daha yüksek modları desteklemesine olanak tanıyacaktır. Rezonatör genişliği azaldığında, temel mod alanı da azalır ve bu da daha küçük bir ışın büyüklüğüne ve daha düşük modları desteklemesine yol açar.



Şekil 2.16 Lazer Çapraz Modları

Ayrıca, rezonatör genişliği, çapraz modların frekans aralığını ve modlar arasındaki ayırmayı da etkiler. Rezonatör genişliği arttıkça, çapraz modların frekans aralığı azalır ve modlar arasındaki ayırım artar. Bu, daha geniş bir rezonatörün, daha yüksek mod sıralarıyla daha fazla çapraz modu destekleyebileceği ve daha yüksek çözünürlük ve güç seviyeleri elde edilebileceği anlamına gelir. Rezonatör genişliğinin lazer çapraz modlarını kontrol etme yeteneği, optik uygulamalarda önemli bir etkiye sahiptir, çünkü bu modlar ışın kalitesi, güç çıkışı ve çözünürlük gibi çeşitli lazer özelliklerini etkiler.

Çapraz modlar, lazerin dik yönünde, yani lazer ışınının yayılma yönüne dik olan düzlemdeki ışık dalgalarının davranışını ifade eder. Bu modlar, lazerin çapına ve yapılandırmasına bağlı olarak oluşur. Çapraz modlar, ışığın yoğunluğunun uzamsal dağılımını belirler ve genellikle temel mod ve yüksek mertebe modlar olarak ikiye ayrılır.

Çapraz modlar, lazerin çapında meydana gelen değişiklikler nedeniyle oluşur ve bu değişiklikler, lazer ışınının dalga cephesi üzerinde belirgin desenler yaratır. Temel mod genellikle simetrik bir yapıda iken, yüksek mertebe modlar daha karmaşık desenler oluşturabilir. (Şekil 2.16)

Çapraz Modların Özellikleri:

Dalgaların Dağılımı: Çapraz modlar, ışığın belirli bir düzlemde nasıl yayıldığını belirler ve bu durum, lazerin performansı üzerinde doğrudan etkilidir.

Enerji Yapısı: Çapraz modlar, lazer ışınının dağılımına bağlı olarak farklı enerji yapıları oluşturabilir. Bu çeşitlilik, lazerin farklı uygulamalara daha uygun hale getirilmesine olanak tanır.

Çapraz modlar, özellikle görüntüleme sistemleri, malzeme işleme ve medikal uygulamalar gibi alanlarda önemli bir rol oynar. Özellikle yüksek mertebe modların kullanımı, belirli biçim ve desenlerin elde edilmesine izin verir. Bu modlar, özellikle lazer işleme ve otomasyon sistemlerinde, kesme ve kaynak işlemlerinde kullanılır. Yüksek mertebe modlar, belirli yüzey şekillerinin elde edilmesini sağladığı gibi, lazerle yapılan rezonanslı uygulamalarda da etkili olur.

2.3.8.4.3. Eksenel ve Çapraz Modlar Arasındaki Farklar:

Eksenel ve çapraz modlar, lazerler içerisinde farklı yönlerde çalışmaları nedeniyle birbirlerinden oldukça farklıdırlar. Bu modların karşılaştırılması, lazer teknolojisinin uygulanabilirliğini artırmak adına önemlidir.

Yönelim: Eksenel modlar, lazerin dikey ekseninde düzenlenirken; çapraz modlar yatay düzlemdeki dağılımı ifade eder.

Dalga Boyu ve Frekans: Eksenel modlar, frekansa dayanırken, çapraz modlar, uzaysal yapı ile ilişkilidir.

Kullanım Alanları: Eksenel modlar genellikle enerji ve veri iletimi için daha çok kullanılırken, çapraz modlar, görüntüleme ve hassas malzeme işleme gibi uygulamalarda öne çıkar. Eksenel modlar, enerji verimliliği ve stabilite sağlarken, çapraz modlar, uzaysal yapı ve çeşitli uygulamalar açısından avantaj sağlamaktadır.

2.3.8.5. Lazer Çizgi Genişliği:

Lazer çizgi genişliği, lazerin renk saflığının veya tek renkliliğinin bir ölçüsü olan bir lazer ışınının tayftaki çizgi genişliğini ifade eder. Çizgi genişliği ne kadar darsa, lazer o kadar monokromatiktir

Lorentz Çizgi Genişliği:

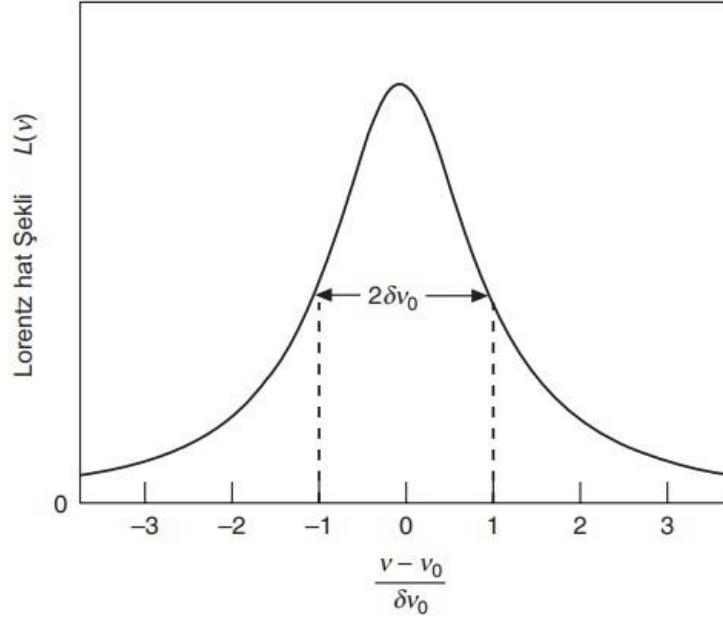
Çizgi genişliği tipik olarak, lazerin salınım tayfının genişliğini ışık şiddetinin tepe noktasına göre yarısı olan bir yoğunluk seviyesinde tanımlayan yarı maksimumda tam genişlik (FWHM) ile ifade edilir.

Çizgi genişliğini etkileyebilecek faktörler arasında lazer boşluğunun kararlılığı, lazer ortamının kalitesi ve dış çevre koşulları yer alır. Lazer teknolojisindeki ilerlemeler, en ileri bilimsel araştırmalar ve çeşitli teknolojik uygulamalar için gerekli olan son derece dar çizgi genişliklerine sahip lazerlerin geliştirilmesine yol açmıştır.

$L(v)$ Lorentz Çizgi Genişliği fonksiyonu

$$L(v) = \frac{\delta v_0 / \pi}{(v - v_0)^2 + \delta v_0^2} \quad (31)$$

(31) şeklinde ifade edilir.



Şekil 2.17 Lazer Çizgi genişliği

Lorentz çizgi genişliği, uyarılmış durumların sonlu ömrü nedeniyle spektral çizgilerin doğal genişlemesinden kaynaklanır. Uyarılmış bir atom düşünün: sonsuza kadar orada kalmaz, sonunda temel duruma geri döner. Belirsizlik ilkesi tarafından yönetilen bu geçiş, yayılan frekansta doğal bir yayılma yaratarak Lorentzian çizgi şekline yol açar.

Schawlow–Townes Çizgi Genişliği:

Bir foton, foton-çözünme süresi τ_c sırasında kendiliğinden emisyonla lazer enerji düzeyine bağlanır, bu da tam olarak sonsuz spektral uyum faktörü Λ , foton sayısı φ ve çıkış gücü P_o 'a sahip ideal dört seviyeli bir sürekli dalga lazerin ulaşılamaz noktasında gerçekleşir ki bu esnada burada kazanç kayıplara eşit olur (Pollnau M., 2020) dolayısıyla Schawlow–Townes çizgi genişliği:

$$\Delta\nu_L = \frac{2\pi\hbar\nu_L(\Delta\nu_c)^2}{P_o} \quad (32)$$

Öte yandan Schawlow-Townes çizgi genişliği, bir lazer boşluğu içindeki kendiliğinden salınım gürültüsünün neden olduğu genişlemeyi tanımlar. Bu gürültü, yayılan ışıktaki rastgele dalgalanmalar yaratarak lazerin uyumunu sınırlar ve çizgi genişliğini artırır.

Lorentz ve Schawlow-Townes çizgi genişlikleri arasındaki temel fark kökenlerinde yatmaktadır: Lorentz doğal atomik özelliklere odaklanırken, Schawlow-

Townes lazer boşluğunun etkisiyle ilgilenir. Bu, Lorentz çizgi genişliğinin yayan türe özgü olduğu, Schawlow-Townes çizgi genişliğinin ise doğrudan lazer tasarımına ve çalışma koşullarına bağlı olduğu anlamına gelir.

2.3.8.6. Lazer Türleri

Lazerler kazanç ortamının yapısına göre

- a) Katı hal lazerler
- b) Gaz lazerler
- c) Yarı iletken lazerler olmak üzere

Üç ana grupta incelenebilirler.

2.3.8.6.1. Katı Hal Lazerler:

Katı hal lazerleri, son elli yıldır teknolojinin birçok alanında devrim yaratan, ışığı üretmek ve yönetebilmek için kullanılan önemli bir cihazdır (Powell R. 1998). Bu lazerlerin, geleneksel gaz lazerlerinden ve sıvı lazerlerinden farklı olarak, ışığı yayan ortamlarını sağlam bir katı malzeme halinde bulundurması, onları daha dayanıklı, bütüncül ve çok yönlü hale getirir.

Katı hal lazerlerinin kalbinde, enerjiyi emen eden ve ışığı yayan bir lazer ortamı bulunur. Bu ortam, genellikle itriyum alüminyum garnet (YAG) gibi bir kristalin, neodimyum (Nd), itriyum (Yb) gibi bir nadir toprak elementini içeren bir katı hal çözeltisi şeklindedir. Lazer ortamı, bir optik rezonatör içinde yer alır, bu da iki aynadan oluşur; biri tamamen yansıtıcı, diğeri kısmen yansıtıcıdır.

Lazer ortamına bir flaş lambası veya diyot lazer gibi bir enerji kaynağı uygulandığında, atomlar uyarılmış durumlara geçerler. Uyarılmış haldeki atomlar, uyarılmış durumlarından daha düşük enerji seviyelerine dönerken fotonlar yayarlar. Bu fotonlar, rezonatöre yansıtılır ve lazer ortamında daha fazla uyarılmış atomu uyatarak bir zincir reaksiyonu başlatır. Bu işlem, rezonatörden çıkan uyumlu, tek renkli ve yönlendirilmiş bir ışın oluşturmak üzere yoğunlaşır.

Katı hal lazerleri, sahip oldukları çeşitli avantajlar nedeniyle çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları:

Yüksek Güç ve Enerji: Katı hal lazerleri, bütüncül yapıları nedeniyle yüksek güç ve enerji çıkışları sağlayabilirler. Bu özellikler, malzeme işleme, lazer kesim, lazer kaynak ve lazer kazıma gibi uygulamalarda kullanılır.

Dar Çizgi Genişliği: Katı hal lazerleri, dar bir çizgi genişliği üretme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, lazer spektroskopisi, lazer tarama mikroskopisi ve tıp gibi alanlarda hassas ölçümler ve hassas analizler için önemlidir.

Çeşitli Dalga Boyları: Farklı lazer ortam ve uyarılma şemaları kullanılarak, katı hal lazerleri çeşitli dalga boylarında ışık üretebilirler. Bu, farklı malzemeler için özel uygulamalar yaratılmasını sağlar. Örneğin, göz cerrahisi için 1064 nm dalga boyunda

çalışan YAG lazerleri kullanılırken, cilt tedavileri için 532 nm dalga boyunda çalışan Nd:YAG lazerleri kullanılır.

Güvenilirlik ve Dayanıklılık: Katı hal lazerleri, gaz veya sıvı lazerlere kıyasla daha dayanıklı ve güvenilirdir. Katı lazer ortamı, daha az hassastır ve darbelere ve titreşimlere karşı daha dirençlidir. Bu özellikler, lazerlerin zorlu ortamlarda kullanılmasını sağlar.

Boyutları ve Taşınabilirlik: Katı hal lazerleri, bütüncül yapıları sayesinde taşınabilir uygulamalar için uygundur. Bu, tıpta, sanayide ve askeri alanda taşınabilir lazer sistemlerinin kullanımına olanak tanır.

Katı hal lazerleri, çeşitli geliştirmelere yol açan sürekli gelişen bir teknolojidir. Örneğin, lazer diyetlerinin kullanımı, katı hal lazerlerinin daha küçük, daha verimli ve daha düşük maliyetli olmasını sağlamıştır. Ayrıca, yüksek güçlü lazerlerin ve çok kısa (femto sn) darbe lazerlerinin geliştirilmesi, bilimsel araştırma ve tıp gibi alanlarda yeni ufuklar açmıştır.

2.3.8.6.2. Gaz Lazerler:

Gaz lazerleri, modern teknolojinin birçok alanında önemli bir rol oynamaktadır. Bu tür lazerler, gaz halindeki bir maddeyi kullanarak ışık üreten lazer sistemleridir (Endo M 2018). Gaz lazerleri, geniş bir dalga boyu aralığında yüksek yoğunlukta ışık üretebildikleri için hem endüstriyel hem de bilimsel alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Gaz Lazerlerinin Çalışma Prensipleri:

Gaz lazerleri, temel olarak üç ana bileşenden oluşur: lazer ortamı, enerji kaynağı ve optik resonatör. Lazer ortamı, genellikle bir veya birden fazla gaz karışımından oluşur. Bu gazlar, lazerin ne tür bir ışık üreteceğini belirler. Enerji kaynağı, gaz moleküllerini uyarak onların lazer ışığı yaymasını sağlar. Genellikle elektrik akımı veya bir başka enerji kaynağı kullanılır. Optik resonatör ise lazer ışığının gücünü artırmak için kullanılır ve genellikle iki ayna ile oluşturulur. Bu aynalardan biri tamamen yansıtıcı, diğeri ise yarı yansıtıcıdır.

Gazlar, lazerin çalışması için uyarıldığında, enerji seviyelerindeki geçişler sonucunda fotonlar (ışık parçacıkları) yaymaya başlar. Bu fotonlar, optik resonatördeki aynalar arasında gidip gelir; bu süreç, daha fazla fotonun yaratılmasına yol açar. Sonuç olarak, gaz lazerleri, oldukça yoğun ve uyumlu (eş fazda) bir ışık kaynağı üretir.

Gaz lazerleri çeşitli türlere ayrılabilir. Bunlardan bazıları şunlardır:

Karbon Dioksit (CO₂) Lazerleri: En yaygın gaz lazerlerinden biridir. Genellikle 10.6 mikron dalga boyunda lazer ışığı üretir ve bu nedenle kesme, kaynak yapma ve diğer endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Helyum-Neon (He-Ne) Lazerleri: Bu lazer, düşük güce sahip olup genellikle 632.8 nanometre dalga boyu ile bir kırmızı ışık yayar. Helyum ve neon gazlarının karışımını kullanır. Eğitim ve optik deneylerde yaygın olarak kullanılır.

Argon Lazerleri: Genellikle 488 ve 514 nanometre dalga boylarında mavi-yeşil ışık üreten argon lazerleri, özellikle biyomedikal uygulamalarda ve lazer gösterilerinde sıkça tercih edilir.

YAG Lazerleri: Nd veya YAG bazlı gaz lazerleri, genellikle 1064 nanometre dalga boyunda güçlü lazerlerdir ve cerrahi uygulamalar, estetik işlemler ve malzeme işleme gibi alanlarda kullanılır.

Karbondiyoksit Lazerleri: Yüksek güçlü CO₂ lazerleri, kesim ve kaynak işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle metal ve plastik işleme endüstrilerinde etkili bir şekilde çalışır.

Gaz lazerlerinin uygulama alanlarına bazı örnekler:

Endüstriyel Uygulamalar: Gaz lazerleri, kesme, kaynak, markalama ve yüzey işleme gibi birçok endüstriyel süreçte kullanılmaktadır. CO₂ lazerler, metal ve diğer malzemelerin hassas kesimi için idealdir.

Tıbbi Uygulamalar: Lazerler, dermatolojide, göz cerrahisinde ve diş hekimliğinde yaygın olarak kullanılır. Örneğin, göz cerrahisinde kullanılan excimer lazerler, göz lensinin şeklinin değiştirilmesine yardımcı olur.

Bilimsel Araştırmalar: Gaz lazerleri, laboratuvarlarda deneyler ve ölçümler için kullanılır. Özellikle optik deneylerde ve spektroskopik uygulamalarda önemlidir.

Eğlence ve Gösteriler: Helyum-neon lazerleri ve argon lazerleri, lazer gösterileri ve eğlence endüstrisinde izleyici deneyimini artırmak için kullanılır.

İletişim: Gaz lazerleri, özellikle yüksek hızlı veri iletimi için optik fiber sistemlerinde kullanılmaktadır.

2.3.8.6.3. Yarı İletken Lazerler:

Yarı iletken lazerler, modern dünyamızın olmazsa olmaz bir parçası haline gelmiş, günlük hayatımızı etkileyen, küçük boyutlu ve güçlü ışık kaynaklarıdır (Sennaroğlu A. 2017). Bu teknolojinin gelişimi, iletişimden tıba, bilimsel araştırmalardan eğlenceye kadar birçok alanda devrim yarattı.

Lazerlerin keşfi, 1960 yılında Theodore Maiman'ın ilk çalışan rubin lazerini geliştirmesiyle başladı. Ancak, yarı iletken lazerlerin gelişimini sağlayan ilk adım, 1962 yılında Robert Hall'ın GaAs (galyum arsenit) kristalinde ışınım yayılımını gözlemlemesiyle gerçekleşti. Bu keşif, yarı iletkenlerin lazer olarak kullanılabileceğine dair ilk kanıtı sundu.

1960'ların sonunda ve 1970'lerin başında, yarı iletken lazerlerdeki önemli gelişmeler, düşük güçlü lazerlerin ticari olarak üretilmesini mümkün kıldı. Özellikle, hetero yapıların geliştirilmesi, lazerlerin verimliliğini ve dayanıklılığını artırdı. Bu ilerlemeler, lazerin fiber optik iletişim gibi yeni alanlarda kullanılmasına olanak sağladı.

1980'lerin başında, "kuantum kuyusu" lazerleri adı verilen yeni bir yarı iletken lazer türü geliştirildi. Bu lazerler, daha yüksek verimlilik ve daha düşük eşik akım değerleri sağladı. Aynı dönemde, mavi ve morötesi lazerlerin geliştirilmesi, daha yüksek çözünürlüklü optik depolama ve biyomedikal görüntüleme gibi yeni uygulamaların kapısını açtı.

Yarı İletken Lazerlerin Çalışma Prensibi

Yarı iletken lazerler, yarı iletken malzemelerden yapılan bir "p-n" bağlantısında ortaya çıkan kuantum mekaniği prensiplerine dayanır. "p" tipi yarı iletken, elektron eksikliği olan deliklere sahipken, "n" tipi yarı iletken fazladan elektron içerir. Bu iki tip yarı iletken bir araya getirildiğinde, elektronlar "n" tipi yarı iletkeninden "p" tipi yarı iletkenine hareket eder ve delikler ters yönde hareket eder. Bu hareket, "p-n" bağlantısı denilen bir bölge oluşturur ve bu bölgede yük taşıyıcılar birikir.

Lazer ışığı üretmek için, "p-n" bağlantısına bir elektrik akımı uygulanır. Bu akım, elektronları "n" tipi yarı iletkeninden "p" tipi yarı iletkenine doğru hareket etmeye zorlar. Elektronlar "p" tipi yarı iletkenindeki deliklerle birleşerek ışık fotonları yayarlar. Bu fotonlar, lazer boşluğu adı verilen bir rezonatör içinde yansır ve bir araya gelir, böylece lazer ışığı üretilir.

Yarı iletken lazerlerde, ışık emisyonunu kontrol etmek için optik rezonatörler kullanılır. Bu rezonatörler, ışığın lazer boşluğunda birden fazla kez yansımalarını sağlayarak, lazer ışığının yoğunluğunu ve yönünü artırır.

Yarı iletken lazerler, farklı yapılarına, malzemesine ve çalışma özelliklerine göre birçok türe ayrılır:

Tek Eklemlili Lazerleri: Bu lazerler, aynı yarı iletken malzemeden üretilen "p-n" bağlantısını kullanır. Tek eklemlili lazerler genellikle düşük verimlilik ve sınırlı uygulama alanına sahiptir.

Çok Eklemlili Lazerleri: Bu lazerler, farklı yarı iletken malzemelerden oluşan "p-n" bağlantısını kullanır. Çok eklemlili lazerler, tek eklemlili lazerlerin kıyasla daha yüksek verimlilik ve daha iyi performans gösterir.

Kuantum Kuyusu Lazerleri: Bu lazerler, iki farklı yarı iletken malzeme arasında ince bir kuantum kuyusu tabakası kullanır. Kuantum kuyusu lazerleri, daha dar bir ışık emisyon tayfı ve daha yüksek verimlilik sağlar.

Kuantum Noktası Lazerleri: Bu lazerler, boyutları birkaç nanometre olan kuantum noktalarına dayanır. Kuantum noktası lazerleri, geniş bir dalga boyu aralığında çalışabilir ve çok küçük boyutlu olabilirler.

Yarı İletken Lazerlerin Uygulama Alanları:

İletişim: Fiber optik iletişim sistemlerinde, veri iletimi için yüksek hızlı lazer ışığı kullanılmaktadır.

Depolama: Bütüncül disk (CD) ve Blu-ray disk gibi optik depolama cihazlarında, verileri okumak ve yazmak için lazer ışığı kullanılır.

Tıp: Lazerler, cerrahi, teşhis ve tedavi gibi çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılır.

Sanayi: Lazerler, malzeme işleme, kesme, delme, kaynak ve ölçüm gibi sanayi uygulamalarında kullanılır.

Eğlence: Lazer işaretçileri, lazer gösterileri ve lazer ışınli tarama cihazları gibi çeşitli eğlence uygulamalarında kullanılır.

Bilimsel Araştırma: Lazerler, spektroskopi, mikroskopi ve diğer bilimsel araştırmalarda kullanılır.

Yarı İletken Lazerlerin Geleceği

Yarı iletken lazer teknolojisi, hızla gelişmekte olup, daha yüksek verimlilik, daha küçük boyutlar ve daha düşük maliyet gibi avantajlar sunan yeni lazerlerin geliştirilmesiyle gelecekte daha da yaygınlaşması bekleniyor. Özellikle, aşağıdaki alanlarda önemli gelişmeler bekleniyor:

Yeni Malzemeler: Daha yüksek verimlilik ve daha düşük enerji tüketimi sağlayan yeni malzemelerin kullanımı.

Nano Teknoloji: Nanometre ölçekli lazerlerin geliştirilmesi, daha yüksek çözünürlüklü ve daha özelleştirilmiş uygulamalar sağlayabilir.

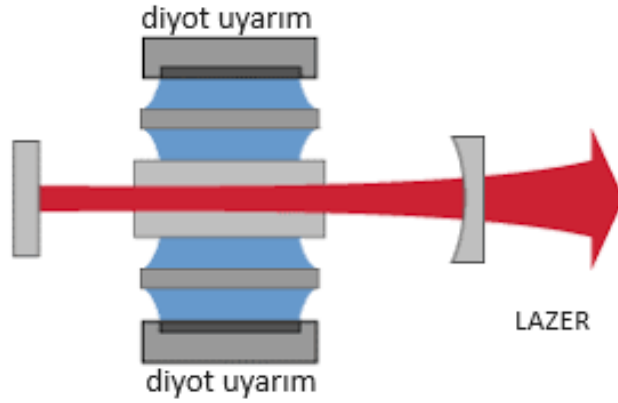
Tıbbi Uygulamalar: Lazerlerin kullanımı, kanser tedavisi, biyomedikal görüntüleme ve ilaç teslimi gibi alanlarda daha önemli çözümler sunabilir.

2.3.8.6.4. Diyot Uyarımlı Katı Hal Lazerleri:

Yarı iletken lazerlerin bir türü olan diyot uyarımlı katı hal lazerleri, modern lazer teknolojisinin önemli bir parçası olarak öne çıkmaktadır. Bu tür lazerler, belirli uygulamalarda yüksek verimliliği ve mükemmel lazer ışığı kalitesini birleştirerek geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır.

Çalışma Prensipleri

DPSS lazerleri, belirli bir dalga boyunda lazer ışığı üretmek için belirli bir malzeme olan katı hal kristallerini kullanır (Izawa Y. 1999) . Bu lazerler, bir diyot lazer aracılığıyla sağlanan enerji ile çalışır. Diyot lazer, elektrik akımının içinden geçmesiyle ışık üreten yarı iletken bir cihazdır. Bu ışık daha sonra, lazer ortamı olarak bilinen, genellikle Nd, erbiyum (Er) veya YAG gibi nadir toprak metalleri katılmış kristaller olan katı bir maddeye yönlendirilir.



Şekil 2.18 Diyot Uyarımlı Lazer

Uyarılma işlemi, döngüsel bir enerji transferi ile başlar. Diyot lazer, belirli bir dalga boyunda ışık yayarak katı hal lazer ortamına enerji verir. Bu enerji, kazanç ortamı içindeki atomları uyarır ve bu atomlar, enerjilerini serbest bırakma isteği ile daha yüksek enerji düzeylerinden daha düşük enerji düzeylerine dönerken lazer ışığı üretir. Bu ışık, kazanç ortamında yansıtıcı ayna sistemi aracılığıyla yoğunlaştırılır ve lazer çıkış olarak dışarı verilir.

Diyot uyarımlı katı hal lazerlerinin temel bileşenleri şunlardır:

Diyot Lazer: Işık kaynağıdır ve uyarma işlemini başlatır. Uygun dalga boyunda enerji üreterek lazer ortamını uyarır.

Lazer Ortamı: Genellikle nadir toprak metalleri katkılı kristal veya camdan oluşur. Bu ortam, enerjiyi depolamak ve serbest bırakmak için tasarlanmıştır.

Yansıma Aynaları: Lazer ışığının yoğunlaştırılmasına yardımcı olur ve ışığın lazer ortamı içinde dolaşarak daha fazla güçlendirilmesine olanak tanır. Bir ayna tam yansıtıcı iken, diğeri kısmi yansıtıcıdır.

Soğutma Sistemi: Lazer bileşenlerinin aşırı ısınmasını önlemek için gereklidir. Genellikle sıvı veya hava ile soğutma sistemleri kullanılır.

Kontrol Sistemi: Lazerin çalışma parametrelerini ayarlamak için kullanılır. Güç, dalga boyu ve modülasyon özellikleri bu sistem ile kontrol edilir.

DPSS lazerlerinin, diğer lazer türlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır:

Yüksek Verimlilik: Diyot lazerlerin enerji dönüşüm verimliliği, geleneksel uyarma yöntemlerine göre daha yüksektir.

Daha Küçük ve Hafif Olması: Bu lazerler daha bütüncül ve hafif bir tasarıma sahiptir, bu da taşınabilirliklerini artırır.

Yüksek İstikrar: Lazer ışığı kalitesi son derece yüksek olup, dalga boyu kararlılığı sağlar.

Geniş Uygulama Alanı: Medikal, endüstriyel ve askeri alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Uzun Ömür ve Düşük Bakım: Diyot lazerlerin uzun ömrü ve düşük bakım gereksinimi, işletme maliyetlerini azaltır.

Diyot uyarımlı katı hal lazerleri, çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır:

Medikal Uygulamalar: DPSS lazerleri, lazerle cerrahi uygulamalar, dermatolojik tedaviler ve diş hekimliğinde çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Endüstriyel Uygulamalar: Metal kesim, kaynak, gravürleme ve malzeme işleme gibi endüstriyel süreçlerde sıklıkla tercih edilmektedir.

Haberleşme: Optik iletişim sistemlerinde veri iletimini sağlamak için kullanılır.

Araştırma ve Geliştirme: Bilimsel araştırmalarda ve lazer spektroskopisi gibi alanlarda önemli bir rol oynamaktadır.

Askeri ve Güvenlik Uygulamaları: Hedef tespiti ve yönlendirme sistemleri gibi askeri uygulamalarda kullanılmaktadır.

Diyot uyarımlı katı hal lazerleri, sağlam yapı ve yüksek performanslarıyla modern lazer teknolojisinin başlıca bileşenlerindendir. Çalışma prensipleri, bileşenleri ve avantajları ile birçok endüstride farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ve artan talep ile birlikte, DPSS lazerlerinin gelecekte daha fazla alanı kapsayarak, lazer teknolojisindeki yenilikçi gelişmelere katkı sağlaması beklenmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ve araştırmalar, bu lazerlerin performansını artırmaya ve yeni uygulama alanları bulmaya devam edecektir.

2.3.8.6.5. Sürekli ve Darbeli Lazerler:

Sürekli Lazerler ve Uygulamaları

Sürekli lazerler (continuous laser, CL), çalıştıkları sırada sürekli bir ışık akışı sağlamak üzere tasarlanmış sistemlerdir (Kowalski F. 1988) . Bu lazerler, genellikle gaz, sıvı veya katı bir ortamda çalışabilirler. Sürekli lazerler, yüksek güç çıkışı ve istikrarlı bir dalga boyu sağlarlar. Bu özellikleri sayesinde, endüstriyel kesim, kaynak yapımı ve tıbbi uygulamalar gibi birçok alanda kullanılır.

Sürekli lazerlerin en yaygın türlerinden biri, CO₂ lazeridir. Bu lazerler, özellikle metal, ahşap ve plastik gibi malzemeleri kesmek ve şekillendirmek için kullanılır. Ayrıca, tıbbi uygulamalarda da gündemdedir çünkü doku içerisindeki suyu etkili bir şekilde hedef alarak cerrahi işlemler sırasında hassasiyet sağlar.

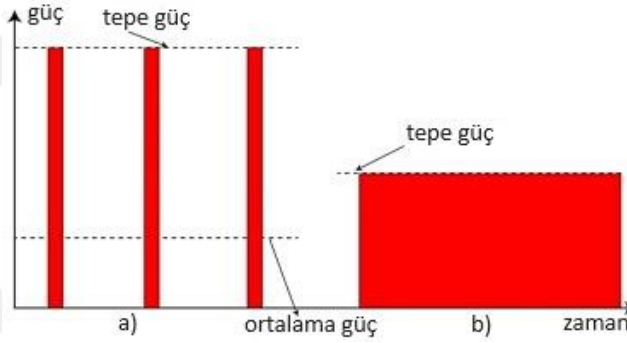
Daha ileri düzeydeki sürekli lazerlerde, yüksek güç seviyelerine ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu durum, daha kalın materyallerin kesimi ve daha hızlı üretim süreçleri için avantaj sağlamaktadır. Ancak, sürekli lazerlerin en büyük sınırlaması, belirli bir noktada sonra ısınma oluşumudur.

Darbeli Lazerler ve Avantajları

Darbeli lazerler (pulsed laser, PL), ışık darbeleri şeklinde çalışan sistemlerdir. Bu lazerler, çok kısa süreli ışık darbeleri üretmekte, böylece yoğun enerji aktarımı gerçekleştirmektedir (Willmott P). Darbeli lazerlerin en önemli özelliklerinden biri, kısa süreli yüksek enerji yoğunluğudur. Bu özellik, bu tür lazerleri birçok uygulama için ideal hale getirmektedir.

Özellikle, "Q-anahtarlama" ve "mod-kilitleme" gibi teknikler kullanılarak, çok kısa ve yüksek güçte ışık darbeleri elde edilebilir. Q-anahtarlama, lazerin ışığı tek bir darbe halinde yaymasına olanak tanırken, mod-kilitleme ise sürekli bir dalga seli oluşturur. Bu, lazer ışığını çok kısa süreli darbelerle oluşturabilir.

Darbeli lazerlerin sağlık alanındaki uygulamaları oldukça geniştir. Örneğin, dermatolojik tedavilerde cilt lekelerinin azaltılması veya lazer epilasyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.19 a) Darbeli lazer, b) Sürekli lazer

Bunun yanı sıra, darbeli lazerler endüstriyel uygulamalarda da üstün performans göstermektedir; özellikle metal işleme ve yönlendirme sistemi gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir.

2.3.8.7. Lazer Işığının Üstün Özellikleri:

Bu özellikler, lazer teknolojisinin tıptan endüstriye, iletişimden eğlenceye kadar geniş bir yelpazede uygulanmasını sağlamaktadır (Hecht J. 1998).

a) Tek Renklilik: Lazer ışığının en belirgin özelliklerinden biri tek renkliliktir. Tek renklilik, lazer ışığının tek bir dalga boyunda ve dolayısıyla tek bir renk tonunda yayılması anlamına gelir. Örneğin, bir lazerle üretilen dar çizgi genişliğindeki ışığın dalga boyu özellikle spektroskopi ve lazer spektroskopisi gibi bilimsel alanlarda katkı sağlar; çünkü bu sayede madde yapıları ve bileşenleri hakkında hassas bilgiler elde edinilebilir.

b) Uyum (Faz Uyumu): Uyum lazer ışığının en önemli özelliklerinden biridir ve ışığın dalgalarının fazlarının uyumlu olduğu anlamına gelir. Uyum, lazer ışığının zaman ve uzay boyunca sabit bir faz ilişkisi içinde olduğu için, işleme uygulamalarında yüksek hassasiyet sağlamaktadır. Ayrıca, uyum sayesinde lazerler, büyük mesafeler boyunca bile belirli bir yoğunluk ve açıklıkta kalabilmektedir. Bu özellik, özellikle lazer interferometri

gibi alanlarda kritik öneme sahiptir. Lazer interferometreleri, çok hassas ölçümler yapma yetenekleri sayesinde, fiziksel değişkenlerin belirlenmesinde oldukça değerlidir.

c) Yüksek Güç ve Yoğunluk: Lazer ışığı, diğer pek çok ışık kaynağına göre daha yüksek güç ve yoğunluk sunabilir. Bu durum, lazerin kazanç ortamındaki ışığı yoğunlaştırıp odaklayabilme özelliğinden kaynaklanır. Yüksek yoğunluk, lazerlerin endüstriyel kesme ve kaynaklama uygulamalarında kullanılmasını sağlar; örneğin, metal parçaların kesilmesi veya birleştirilmesi süreçlerinde lazerler, geleneksel yöntemlere göre daha etkili ve temiz sonuçlar sunar. Bu sayede üretim süreçleri hızlanmakta ve maliyetler düşmektedir.

d) Kolimasyon: Lazer ışığının bir diğer önemli özelliği, yüksek derecede kolimasyon (paralel ışık demeti) sunmasıdır. Kolimasyon, ışığın belirli bir yönelimin doğal olarak dağılmadan yayılması anlamına gelmektedir. Lazer ışığı, odaklandığında oldukça dar bir ışık demeti oluşturur ve bu özellik, lazerlerin hedefe yönelik uygulamalarda yüksek hassasiyetle çalışmasına imkan tanır. Kolimasyon, özellikle hedefleme, ölçüm ve iletişim sistemlerinde kritik öneme sahiptir.

e) Yüksek Performans: Diğer ışık kaynaklarının aksine lazer teknolojisi kısa sürede tam performansla çalışmaya hazır hale gelir. Bu özellik, lazerin belirli alanlarda, özellikle bilgi aktarımı ve iletişimde etkinliğini artırır. Örneğin, fiber-optik iletişim sistemlerinde lazerler, verilerin iletimini mümkün olan en yüksek oranlarda gerçekleştirmek için kullanılır. Bu sayede, internet hızları ve veri transferleri önemli ölçüde artış göstermektedir.

2.3.8.8. LED ve DPSSL arasındaki farklar:

LED'ler elektrik enerjisini elektrolüminesans adı verilen bir süreçle doğrudan ışığa dönüştüren yarı iletken cihazlardır. Enerji verimlilikleri, uzun ömürleri ve kompakt boyutları nedeniyle aydınlatma uygulamalarında, ekranlarda, göstergelerde ve tabelalarda yaygın olarak kullanılırlar. Öte yandan, DPSSL'ler kristal veya cam gibi bir kazanç ortamını uyarmak için pompa kaynağı olarak yarı iletken bir diyot kullanan katı hal lazerlerdir (Mancera D. 2103). DPSSL'ler yüksek güç çıkışları, dar çizgi genişlikleri ve hassas ışın kaliteleriyle bilinir ve bu da onları bilimsel araştırmalar, tıbbi işlemler ve endüstriyel kesim için ideal hale getirir.

LED'ler ve DPSSL'ler arasındaki temel farklardan biri emisyon tayflarında yatmaktadır. LED'ler tipik olarak kullanılan yarı iletken malzemeye bağlı olarak birden fazla dalga boyuna sahip geniş tıfıylı ışık üretir. Bu da onları renksel geriverimin kritik olmadığı genel aydınlatma amaçları için uygun hale getirir. Buna karşılık, DPSSL'ler kazanç ortamının özellikleri tarafından belirlenen belirli dalga boylarında kararlı ışık yayar. DPSSL'lerin bu monokromatik yapısı, yüksek spektral saflık ve yayılan ışık üzerinde hassas kontrol elde etmelerini sağlar.

LED'ler ve DPSSL'ler arasındaki bir diğer önemli fark da elektrik enerjisini ışık çıkışına dönüştürme verimlilikleridir. LED'ler, enerjiyi ısı olarak israf etmedikleri için geleneksel akkor ampullere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek verimliliğe sahiptir. Bununla birlikte, DPSSL'ler pompa gücünü verimli bir şekilde ışığa dönüştürerek daha da yüksek optik verimlilikler elde edebilir.

2.3.8.9. Optik İkinci Harmonik Oluşumu:

Optik ikinci harmonik oluşumu (Second Harmonic Generation-SHG), 1960'lı yıllarda ilk kez gözlemlendiğinde, bilim adamlarının dikkatini çekti. Tarihinde dikkate değer bir gelişme, 1961 yılında, fizikçi Peter Franken'in ikinci harmonik olayını ilk kez gözlemleyerek, bu olayı bilimsel topluma sunması olmuştur. Franken, kuvars kristaline düşen lazer ışığında, ikinci harmonik ışınımın oluştuğunu göstermiştir (Franken P 1961).

Optik ikinci harmonik oluşumu, ışık-madde etkileşimine dayanır. Bir ışık dalgası, bir maddeye düştüğünde, madde içindeki elektronların hareketini değiştirir. Eğer madde, ikinci derecede doğrusal olmayan optik yapıdaysa ikinci harmonik ışınım meydana gelir. Böylece, giriş ışık dalgasının frekansı ω iken, ikinci harmonik ışınım frekansı 2ω olur.

Bu oluşum çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Bunların arasında, lazer teknolojisinde, doğrusal olmayan optikteki uygulamaları, ileri kimyasal teknoloji ve biyoteknolojideki çalışmalarda kullanılır. Örneğin, ikinci harmonik üretimi, lazer ışıklarına daha yüksek güç vererek, malzeme biliminde kullanımını sağlar. Ayrıca, doğrusal olmayan optikteki uygulamaları, yüksek hızlı veri aktarımında, optik iletişim sistemlerinde ve optik saklama cihazlarında kullanılır.

Doğrusal olmayan optik, bir malzemenin uygulanan elektrik alanına tepkisi alanın kendisiyle orantılı olmadığında ortaya çıkar ve çeşitli sonuçlara yol açar. Doğrusal optikte, bir ışık dalgası bir molekülle etkileşime girerek molekülün titreşmesine ve ardından kendi ışık dalgasını yaymasına neden olur. Bu süreç aynı zamanda moleküler enerji seviyeleri açısından da geçerlidir.

Doğrusal olmayan optik etkilerin ortaya çıkmasının temel nedenlerinden biri, uygulanan elektrik alanına malzemenin tepkisinin doğrusal olmamasında yatmaktadır. Bu doğrusal olmama, elektronik polarizasyon, kafes titreşimleri ve çizgita kuantum mekaniksel etkiler dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan kaynaklanabilir. Yoğun bir ışık dalgası bu tür doğrusal olmayan bir malzeme ile etkileşime girdiğinde frekans karışımı, harmonik üretim ve optik parametrik güçlendirme gibi olaylara yol açan tepkileri tetikleyebilir.

$$P_k = \epsilon_0 (\chi_{ik}^{(1)} E_i + \chi_{ijk}^{(2)} E_i E_j + \chi_{ijkl}^{(3)} E_i E_j E_k + \dots) \quad (33)$$

Burada P polarizasyon, E elektrik alan, χ birimi olmayan duyarlılık katsayısı ϵ_0 dielektrik Katsayısıdır. (33) deki dalga denklemini basitleştirmek amacıyla x eksenli tek boyutta (34) ü yazarsak:

$$\frac{\partial E}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (34)$$

Polarizasyon P , elektrik alan E ile arasında (35) vardır:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (35)$$

ve yerine konulduğunda (36) ki burada [...] kısmı $\chi(\omega)$ ifade etmektedir

$$P(t) = \varepsilon_0 \left[\frac{Ne^2 / \varepsilon_0 m_e}{2\omega_0(\omega_0 - \omega - j\Gamma)} \right] E(t) \quad (36)$$

Böylece dalga denklemleri (36)

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial}{\partial t^2} (\varepsilon_0 \chi E) \Rightarrow \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{(1 + \chi)}{c_0^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (37)$$

şeklinde yazılabilir, çünkü $\frac{1}{c_0^2} = \varepsilon_0 \mu_0$ dur. Görüldüğü gibi eğer $\frac{1}{c^2} = \frac{(1+\chi)}{c_0^2}$ i tanımlayabilirsek $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{(1+\chi)}{c_0^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$ homojen, yani dalga vakum uzaydaki şekline dönüşür. Burada $\sqrt{1 + \chi}$ kırılma indisi olarak adlandırılır, n ile gösterilir.

(33) denklemini tekrar gözden geçirirsek

$$P = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \chi^{(4)} E^4 \dots] = P_{doğ} + P_{doğ-olm} \quad (38)$$

Polarizasyonun doğrusal ve doğrusal olmayan bölümleri (39) görülür

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 P_{non-lin}}{\partial t^2} \quad (39)$$

Doğrusal kısma önceki gibi kırılma indisindeki artış şeklinde yaklaşılabılır ve

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \chi^{(2)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (E^2) + \varepsilon_0 \mu_0 \chi^{(3)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (E^3) + \dots \quad (40)$$

$\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ genellikle küçük değerlerde olduklarından ihmal edilir. Peki E nin büyük olduğu durumlarda, örneğin lazer ışınımı karşısında ne olur? Bu durumda

$$E(t) = E_0 e^{j\omega t} + E_0^* e^{-j\omega t} \quad (41)$$

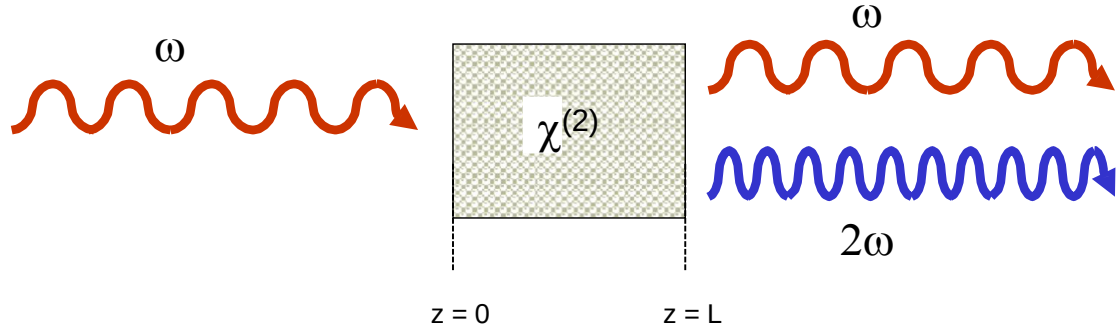
$$E(t)^2 = E_0^2 e^{2j\omega t} + 2|E_0|^2 + E_0^{*2} e^{-2j\omega t} \quad (42)$$

(42) denkleminde karşımıza gelen $e^{2j\omega t}$ ve $e^{-2j\omega t}$ terimleri frekansın 2ω şeklinde ikiye katlandığı durumu ortaya koyar.

Özetle ikinci derece polarizasyon $P^{(2)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} (E_{gelen})^2$ yapısıyla 2ω şeklinde frekans katlaması yani ikinci harmoniğin oluşmasını sağlar. $\chi^{(3)} E^3$ bileşeni 3ω frekanslı üçüncü harmoniğin oluşmasına, $\chi^{(4)} E^4$ ise 4ω frekansına sahip dördüncü harmoniğin oluşmasına neden olur.

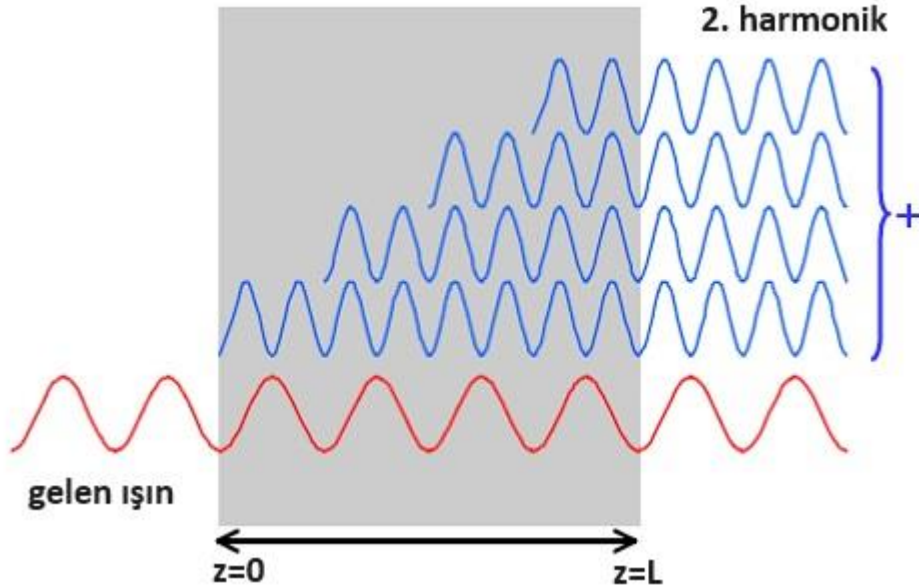
İkili harmonik üretimi sürecinde, ω hemde 2ω frekanslı yayılan dalgaların faz uyumluluğu, kritik bir öneme sahiptir. Bu iki frekansın, sönümleyici müdahaleyi engellemek amacıyla aynı fazda bulunması gerekmektedir. Bu bağlamda, SHG sinyalini bir perturbasyon olarak düşünmek mümkündür; dolayısıyla, iki farklı frekansta bulunan ışınların birleştirilmesi, aralarındaki faz farkı nedeniyle birbirlerini sönümlendirmemeleri

şartıyla gerçekleşebilir. Bu faz uyumu sağlandığında, SHG sürecinin etkinliği artacak ve elde edilen ikinci harmonik ışının verimliliği önemli ölçüde yükselecektir. Bu da, nanoyapılar ve optoelektronik uygulamalar için kritik öneme sahip olan yüksek kaliteli ikinci harmonik ışınların üretilmesi açısından elzemdir.



Şekil 2.20. ω frekansıyla gelen lazer ışını doğrusal olmayan $\chi^{(2)}$ duyarlılık katsayılı ortamdan geçince ω ve 2ω ışınlarının oluşumu.

Gelen dalga yoğunluğu belirli bir seviyeye ulaştığında ve ortamın doğrusal olmayan özellikleri devreye girdiğinde, bu dalganın belirli frekanslarının iki katı frekansta yeni bir dalga meydana gelir (Şekil 2.20). İkinci harmonik üretim doğrusal olmayan optikte, ışık dalgaları bir malzeme içindeki atom veya moleküllerin elektrik dipol momentleri ile etkileşime girdiğinde, frekansı iki katına çıkarılmış yeni ışık dalgaları üretilir. Bu durumda, toplam çıktı, malzeme içerisinde bulunan her bir dipolün her konumdaki etkisinin Şekil 2.21 de görüldüğü gibi toplamıdır.



Şekil 2.21 İkinci Harmonik Üretim ve Dipol Dalgalarının Toplanması

Malzemenin içindeki her dipol, gelen ışığın elektrik alanına tepki gösterir ve bu tepki, kendi konumuna ve yapısına bağlı olarak değişir. Dolayısıyla, her bir dipolün

oluşturduğu katkı, malzemenin genel özellikleri ile ilişkili olarak farklılık gösterir. Bu durum, toplam çıktının hesaplanmasında birleşim kavramını da gündeme getirir. Her konumda bulunan dipollerin bireysel katkılarının birleşimi, toplam ikinci harmonik üretim çıktısını belirler

Başlangıçta sıfır olan ikinci harmonik dalga yoğunluğu, bu sürecin doğal bir sonucu olarak, ışının ilerlemesi ile artış göstermeye başlar. (Şekil 2.17). Bu durum, özellikle lazer sistemlerinde veya optik iletişimde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. İkinci harmonik dalga, genellikle daha kısa dalga boylarında yayılarak, farklı optik ve elektronik uygulamalarda kullanılabilecek yeni ışık kaynakları sağlar.



Şekil 2.22 Işın doğrusal olmayan ortam boyunca yayıldıkça şiddeti azalır ve 2. harmonik dalganın şiddeti (başlangıçta sıfır) artar.

Bir doğrusal olmayan ortamda ışık yayıldığında, yoğunluğun azalması, ışının yayıldığı ortamın emilim ve saçılma özellikleri ile doğrudan ilişkilidir.

Yoğunluğu çok yüksek olan bir ışın, ortam molekülleri ile etkileşime girdiğinde, bu moleküllerin birbirlerini etkileyerek ışığın dalga boyunun değişmesine yol açar. Optik olarak doğrusal olmayan ortamlar, ışığın şiddetinin değişmesiyle birlikte optik özelliklerinin değiştiği malzemeler olarak tanımlanabilir. Bu durum, ışının yayılması sırasında enerjinin ve yoğunluğun nasıl etkilendiğini anlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle, ışın yayıldıkça yoğunluğu azalırken, başlangıçta sıfır olan ikinci harmonik dalga yoğunluğunun artışı gözlemlenir. Bu durum şekil 2.22 de görülmektedir.

Bu durumda gelen ışığın doğrusal olmayan ortam içinde katettiği $z=L$ yolu Şekil 2.21 da görüldüğü gibi daha çok ikinci harmonik üretilmesine katkı sağlayacaktır. Yayılım mesafesi ile bu toplamda artacak dolayısıyla ikinci harmoniğin şiddeti de artmış olacaktır.

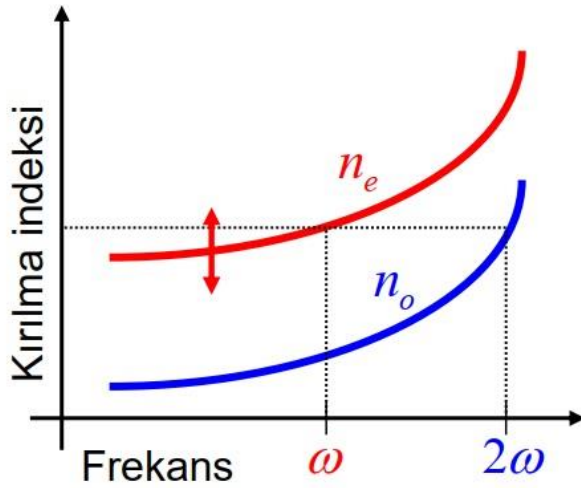
2.3.8.9.1. İkinci Harmonik Dönüşümü için Kullanılan Kristaller:

Kristaller, optik alanında önemli bir rol oynayan malzemelerdir ve özellikle ikinci harmonik dönüşümü süreçlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Dmitriev V. 2013). İkinci harmonik dönüşümü, bir lazerin temel dalga boyunu iki katına çıkararak daha kısa dalga boylarında ışık elde etme işlemidir.

Optik Olarak Doğrusal Olmayan Kristal Örnekleri:

Bizmut Triborat -BiBO (BiB_3O_6)

BiBO kristali, 600–1500 nm aralığındaki ışınlarla etkileşmek için kullanılır. Bu kristalin özellikle yüksek SHG verimliliği ve geniş faz eşleşmesi yelpazesi, onu lazer sistemlerinde popüler bir seçim haline getirmiştir. BiBO, aynı zamanda düşük yapısal renklenme ve iyi optik karakteristiklere sahiptir.



Şekil 2.23 İkinci harmonik üretiminde kullanılan kristaller çift kırılma indisine sahiptir

Baryum Borat BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$)

BBO kristali, 410–2000 nm aralığında temel uyarım sağlamak için kullanılmaktadır. Bu kristal, hem yüksek SHG verimliliği hem de geniş faz eşleşme bant genişliği sunarak, lazer sistemlerinde çokça tercih edilmektedir. BBO'nun yüksek optik saydamlığı ve düşük emilim kaybı, onu lazer uygulamalarında cazip kılmaktadır.

Lityum İodat (LiIO_3)

LiIO_3 , 570–4000 nm aralığındaki temel uyarım için kullanılan başka bir önemli kristaldir. Bu kristal, geniş bir optik aralığa sahip olmasından ötürü oldukça çok yönlüdür. LiIO_3 , özellikle doğrusal olmayan optikteki uygulamalarda ve çeşitli optik cihazların üretiminde yaygın olarak kullanılır.

Potasyum Niobat (KNbO₃)

Potasyum niobat, 800–1100 nm dalga boyları arasında, sıklıkla 860 veya 980 nm’de temel uyarım sağlayan bir diğer önemli kristaldır. KNbO₃, yüksek optik dönme ve yapısal stabilitesi sayesinde SHG uygulamalarında tercih edilmektedir. Ayrıca, dönüştürme süreçleri sırasında yüksek efisit bir performans sunmaktadır.

Potasyum Titanil Fosfat KTP (KTiOPO₄) ve KTA

KTP ve onun varyantı KTA, 984–3400 nm dalga boyu aralığında temel uyarım sağlayan başka önemli kristallerdir. Bu kristaller, çok iyi doğrusal olmayan optik özellikleriyle tanınır ve bu nedenle lazer sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Dönemsel Kutuplu Kristaller (PPLN)

Dönemsel kutuplu kristaller, özellikle PPLN, yaklaşık 1000–2000 nm aralığında temel uyarım sağlayan gelişmiş bir yapıdır. Bu kristallerin faz eşleşim özelliği, belirli dalga boyarı için iyileştirilmiş ve böylece artırılmış SHG verimliliği sunmaktadır.

Diyotla Uyarımlı Katı Hal Lazerleri İçin Kristal Örnekleri

1064 nm giriş dalga boyu için monopotasyum fosfat (KDP), lityum triborat (LiB₃O₅), CsLiB₆O₁₀ ve baryum borat (BBO) gibi kristaller kullanılmaktadır. Bu kristaller, bu özel dalga boylarında yüksek verimlilikle çalışmaktadır.

1319 nm dalga boyu için ise KNbO₃, BBO, monopotasyum fosfat (KDP), LiIO₃, LiNbO₃ ve potasyum titanyl fosfat (KTP) gibi kristaller tercih edilmektedir. Bu kristaller, SHG süreçlerinde yüksek etkililiği sağlamaktadır.

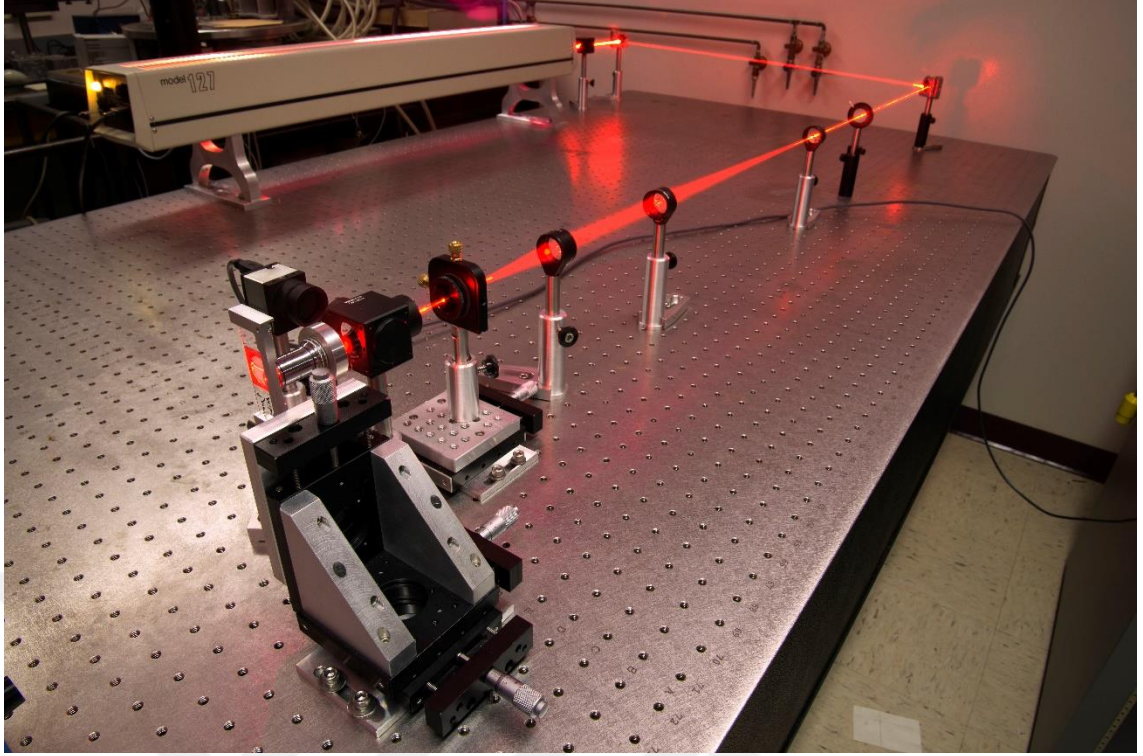
2.3.9. Lazer Optik Laboratuvarı

Lazer optik laboratuvarında lazer optik masası, optik yansıtıcılar, mercekler, optik filtreler, ışın bölücüleri ile optik test ve kalibrasyon ekipmanları bulunur. Lazer kaynakların güçleri göz önüne alındığında odada duman ve yangın sensörleli ile otomatik yangın söndürme düzenekleri de bulunur.

2.3.9.1 Lazer optik laboratuvarı Masası

Lazer optik laboratuvar masası, modern optik deneylerin ve araştırmaların yapılabilmesi için özel olarak tasarlanmış bir çalışma alanıdır. Bu masalar, lazer teknolojisinin sürekli gelişimi ile bilimsel araştırmalar ve endüstriyel uygulamalar için kritik öneme sahiptir.

Lazer optik laboratuvar masaları, çeşitli optik bileşenlerin düzenlenmesi, montajı ve test edilmesi için gerekli olan istikrarlı bir platform sağlar. Lazer optik laboratuvar masalarının özellikleri:



Şekil 2.24 Lazer optik laboratuvarı masası

Stabilite

Lazer optik laboratuvar masalarının en önemli özelliklerinden biri stabiledir. Optik deneylerde en ufak bir titreşim veya hareket, elde edilen sonuçların geçerliliğini ciddi şekilde etkileyebilir. Bu nedenle, ilgili masalar genellikle yoğun bir malzemeden yapılmış olup, titreşimi minimize etmek için çeşitli mühendislik teknikleri kullanılarak tasarlanır.

Ayarlanabilirlik

Başka bir önemli özellik ise ayarlanabilirliktir. Lazer optik deneylerinde, çeşitli optik bileşenlerin konumlandırılması kritik öneme sahiptir. Lazer optik laboratuvar masaları genellikle delikli yüzeylere sahip olup, bu delikler sayesinde farklı bileşenlerin konumları değiştirilebilir. Bu esneklik, deneylerin gereksinimlerine uygun ayar imkanları sunar.

Fonksiyonellik

Laboratuvar masaları aynı zamanda birçok farklı optik bileşeni bir araya getirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Lazerler, aynalar, mercekler ve dedektörler gibi bileşenler üzerinde çalışabilmek için gerekli montaj aparatları ve destek sistemleri ile birlikte gelirler. Bu sayede, kullanıcılar karmaşık optik sistemleri kolayca kurabilir ve test edebilirler.

Tasarım ve Malzemeler

Lazer optik laboratuvar masalarının tasarımı, genellikle kullanıcının ihtiyaçlarına ve laboratuvarın özelliklerine göre özelleştirilebilir. Masaların yapısal malzemeleri genellikle alüminyum, paslanmaz çelik veya özel kompozit malzemelerden oluşur. Bu malzemeler hem dayanıklılık hem de hafiflik açısından avantajlar sunar.

Özellikle yüzey pürüzlülüğü, optik deneylerde son derece önemlidir. Masanın üst yüzeyi mümkün olduğunca düz olmalı ve genellikle özel yüzey kaplamaları ile desteklenir. Bu kaplamalar, ışığın yansımalarını azaltarak daha yüksek hassasiyetle deneylerin yapılmasını sağlar.

Kullanım Alanları

Lazer optik laboratuvar masaları, birçok farklı disiplinde kullanılmaktadır. Bu disiplinler arasında fizik, mühendislik, teleskopi ve biyomedikal araştırmalar yer almaktadır. Özellikle optik iletişim, lazer teknolojileri ve spektroskopi gibi alanlarda önemli rol oynamaktadır.

a. Bilimsel Araştırma

Akademik araştırmalarda, lazer optik laboratuvar masaları, bilim insanlarının deneyler yapmasına olanak tanır. Optik teorilerinin test edilmesi, yeni lazer teknolojilerinin geliştirilmesi ve optik bileşenlerin performanslarının değerlendirilmesi için bu masalara sıkça başvurulur.

b. Endüstriyel Uygulamalar

Lazer teknolojisindeki gelişmeler, endüstride de geniş uygulama alanlarına yol açmıştır. Lazer kesim, lazerle kaynak yapma ve lazerle ölçüm gibi proseslerde, optik laboratuvar masaları test ve kalibrasyon için kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda, yüksek hassasiyet ve güvenilirlik önemli olduğu için laboratuvar masalarının rolü daha da artmaktadır.

c. Eğitim

Fizik ve mühendislik programlarında öğrencilere lazer teknolojisi ve optik prensipleri hakkında eğitim verilmesi, lazer optik laboratuvar masalarının kullanımı ile zenginleştirilmektedir. Öğrenciler, gerçek deneyler yaparak teorik bilgilerini pekiştirir ve bu sayede uygulamalı öğrenme imkanı elde ederler.

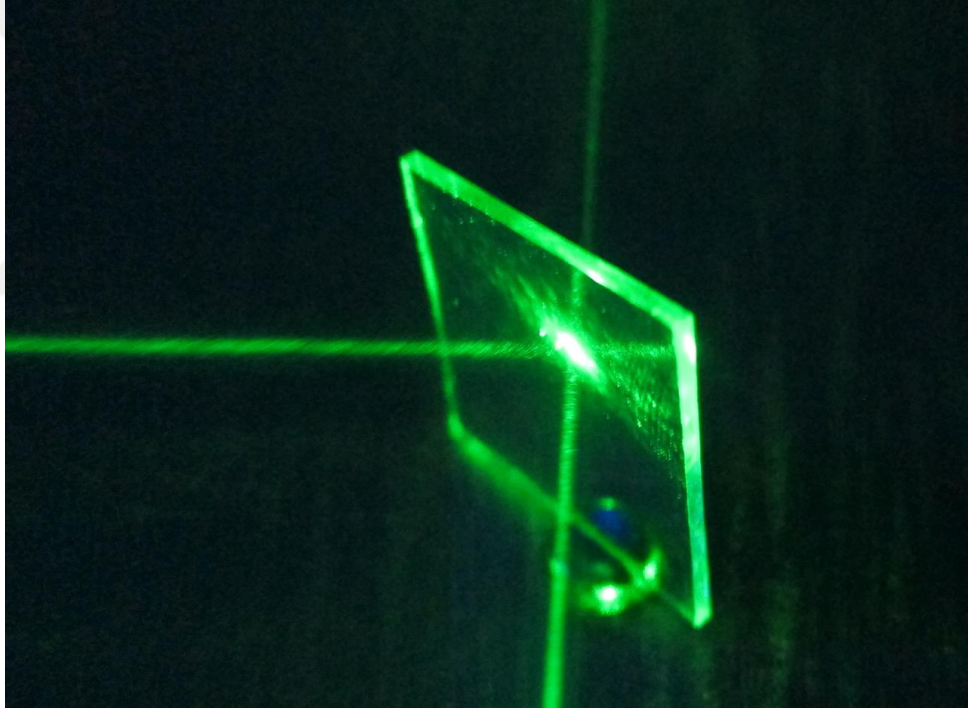
2.3.9.2 Optik Yansıtıcılar ve Mercekler :

Optik deneylerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan diğer önemli ekipmanlar arasında yansıtıcılar ve mercekler yer almaktadır. Yansıtıcılar, lazer ışığının yönünü değiştirmek veya ışığın belirli bir alanda odaklanmasını sağlamak için kullanılır. Özellikle, dielektrik yansıtıcılar, belirli dalga boylarındaki ışığı seçici bir şekilde iletme veya yansıtma özellikleri sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir.

Mercekler ise, ışığın odaklanmasını veya dağıtılmasını sağlamak için kullanılan optik elemanlardır. Konveks ve konkav mercekler, gelen ışığın yönünü değiştirmek ve görüntü oluşturmak için kullanılır. Farklı mercek tasarımları, uygulamanın gereksinimlerine göre seçilir. Örneğin, bir spektrometre için yüksek çözünürlüklü mercekler kullanılırken, basit bir görüntüleme uygulaması için daha basit mercekler yeterli olabilir.

Optik Filtreler: Optik laboratuvarlarında kullanılan bir diğer önemli ekipman türü ise optik filtrelerdir. Optik filtreler, belirli dalga boylarındaki ışığın geçişine izin verirken diğer dalga boylarındaki ışığı bloke etmektedir. Bu özellikleri sayesinde, filtreler spektroskopik analizlerde, lazer sistemlerinin kalibrasyonunda ve görüntüleme uygulamalarında önemli bir rol oynar. Genellikle belli bir limitle yüksek ya da düşük geçirgen şeklinde adlandırılırlar. Örneğin 500 nm düşük geçir filtre 500 nm ye kadar olan dalga boylarını geçirirken daha yüksek olanları geçirmez.

Işın Bölücüler: Işık bölücüler, bir lazer ışınını iki ya da daha fazla miktarda bölmek için kullanılan optik ekipmanlardır.



Şekil 2.25 Işın bölücü

Interferometrelerde ve holografik uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Yüksek hassasiyet gerektiren deneylerde, ışığın doğru bir şekilde bölünmesi, elde edilen verilerin güvenilirliği açısından önem taşır. Işın bölücüler elektrikteki dirençler gibi de düşünülebilir. Üzerlerine yapılacak yansıtıcı kaplamalarla lazerin şiddetini istenilen her oranda bölebilirler.

Yansıma İle Çalışan Işın Ayırıcılar: Kısmi saydam aynalar kullanarak lazer ışınını belirli bir yüzde oranında yansıtır ve geçirirler. Genellikle, lazer uygulamalarında daha fazla ışın şiddeti çeşitliği sağlamak için kullanılırlar. Örneğin %25 lik yansıtma özelliği

olan bir bölücü 1 mW lık bir lazer ışınını 0,250 mW ını yansıtırken 0,750 mW ını da geçirir. Bu sayede tek bir kaynaktan çıkan lazer ışını bir deneyin farklı noktalarında farklı güçlerde kullanılabilir.

Kırıcılık İle Çalışan Işın Ayırıcılar: Işığı kırarak farklı yönlere yönlendiren prizmalardır. Genellikle optik sistemlerde yönlendirme amacıyla kullanılırlar.

Dikey ve Yatay Işın Ayırıcılar: Işığın yönünde değişiklik yaratarak, lazer ışınlarının hangi yönlerde ayrılacağını belirler.

Frekansa Göre Ayırıcılar: Farklı dalga boylarındaki lazer ışınlarını ayırmak için tasarlanmış cihazlardır. Genellikle spektroskopi uygulamalarında tercih edilir.

2.3.9.3 Optik Test ve Kalibrasyon Ekipmanları:

Bir lazer optik laboratuvarında, ekipmanların doğru bir şekilde çalıştığını ve istenen sonuçları sağladığını doğrulamak için test ve kalibrasyon ekipmanları da bulunur. Optik güçmetreler, lazer gücünü ölçmek için kullanılırken, spektrometreler, lazerin dalga boyunu belirlemek için gereklidir. Bunun yanı sıra, interferometreler, optik elemanların kalite kontrolü ve araştırma süreçlerinde yaygın olarak kullanılan önemli cihazlardır.

Kalibrasyon işlemleri, deneyin tekrarlanabilirliği ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Hatalı kalibrasyon, yanıltıcı sonuçlar elde edilmesine yol açabilir ve bu da araştırma veya geliştirme süreçlerini olumsuz etkileyebilir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. TEORİK ÇALIŞMALAR

3.1.1 Kıyaslanan Cihaz Q-SUN XE-3 XENON Güneş Benzeteçi:

Kıyaslanan cihaz (KC), Q-SUN XE-3 XENON güneş benzeteçi (Şekil 3.1) Polisan Kimya AŞ kalite kontrol birimi bünyesinde dış cephe boya, kaplama ve yalıtım ürünlerinin kalite kontrol testlerinde kullanılmaktadır. Aşağıdaki bilgilerin tamamı firma ar-ge bölümünden gelmiş ve aynen paylaşılmıştır.



Şekil 3.1. KC, Q-SUN XE-3 XENON ksenon ark kaynaklı güneş yaşlandırma benzeteçi

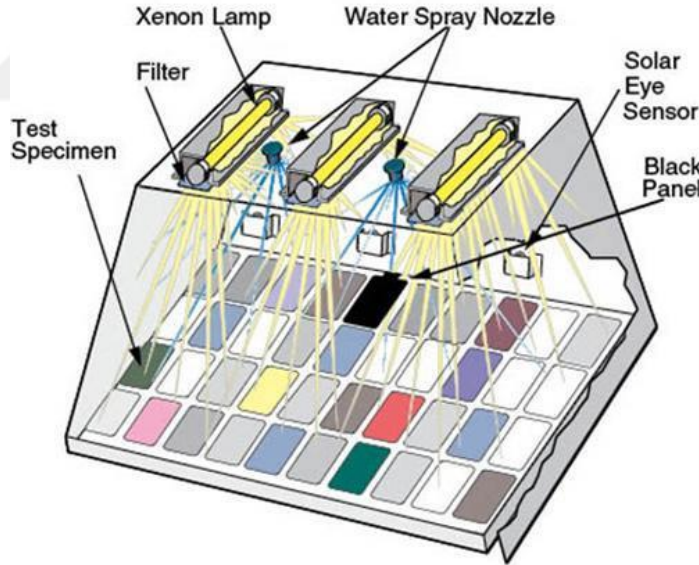
Cihaz modeli Q-sun XE-3 ve ASTM G155 (Ksenon Ark – Metal olmayan

malzemeler için test cihazları standardı ve yönetmeliği uyarınca çalışmaktadır. Cihaz farklı test metotları ile çalışabilmekte olup, standart olarak kullanılan döngü aşağıdaki gibi tekrar etmektedir. (Çizelge 3.1.)

Çizelge 3.1. KC Test döngü açıklaması

G155, Tablo X3.1, Döngü 1 (ayrıca 102/18 döngüsü olarak da bilinir)					
Filtre: DAYLIGHT – Q		UV Sensör: 340nm		Siyah Panel: Yalıtımsız	
		Sprey: 7 saniye açık, 53 saniye kapalı			
STEP	FONKSİYONU	IŞIK ŞİDDETİ	BP SICAKLIK	HAVA SICAKLIĞI	NEM
					ZAMAN
1	IŞIK	0.35 W/m2	63°C	48°C	30%
2	IŞIK + SPREY	0.35 W/m2	63°C	48°C	30%
3	FİNAL ADIMI STEP 1 E GİT				

Ksenon ark test cihazları, ultraviyole (UV), görünür ışık ve kızılötesi (IR) dahil olmak üzere güneş ışığının tüm tayfını üretir. Ksenon aslında güneş ışığının kendisini yeniden üretme girişimidir. Q-SUN (ksenon ark) ve QUV (floresan UV), en yaygın kullanılan hızlandırılmış yaşlandırma test cihazlarıdır. Ksenon test odası, ultraviyole (UV), görünür ışık ve kızılötesi (IR) dahil olmak üzere güneş ışığının tüm tayfını üretir. Ksenon arkı aslında 295 nm - 800 nm arasındaki güneş ışığının kendisini taklit etme işlemidir.



Şekil. 3.2 KC güneş benzeteçi pozlama kabini

Farklı tayflara sahip farklı lamba türleri vardır. UVA-340 lambalar, kritik kısa dalga UV bölgesinde güneş ışığının mevcut en iyi benzeteçini sağlar. UVA-340'ın tayfsal güç dağılımı (SPD), güneş ışığının kesilmesinden yaklaşık 360 nm'ye kadar çok yakın bir şekilde güneş ışığıyla eşleşir. UV-B lambaları da QUV'de yaygın olarak kullanılmaktadır. Tipik olarak UV-A lambalardan daha hızlı bozulmaya neden olurlar, ancak güneş enerjisi

kesintisinin altındaki kısa dalga boyu çıktıları birçok malzeme için gerçekçi olmayan sonuçlara neden olabilir.

3.1.1.2 Boya Numunelerinin Teste Hazırlanması:

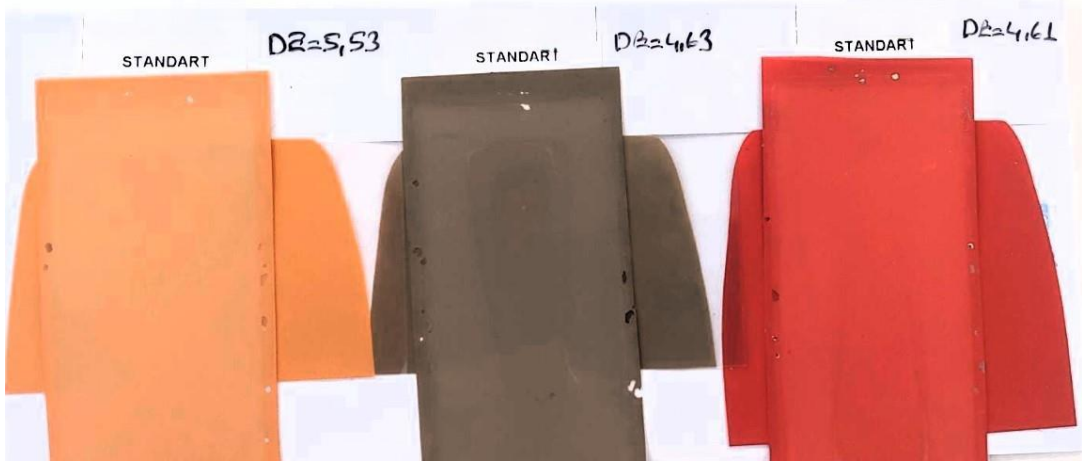
- i. Teste alınacak boya asetata 150 μm film kalınlığında olacak şekilde çift olarak çekilir.
- ii. Her 2 asetat çekimi şartlandırma odasında (23 °C ; %50 bağıl nemde) 1 hafta kürlendirilir.
- iii. Q-sun testine başlamadan L,a,b değerleri not edilerek kaydedilir.
- iv. 1 hafta -168 saat- tamamlandığında asetatlar çıkarılarak soğuması beklenir, teste giren renkler şartlandırmada bekleyen renkler standart alınarak tekrar L,a,b değeri okunur ve hesaplanır. Gözlede kontrol sağlanır.
- v. Bu döngü 4'ü tamamlayana kadar tekrar edilir ve arşivlenir.
- vi. Genel olarak boya cinsine ve renge göre değişmekle beraber 1 haftalık test sürecinin yaklaşık 1 seneyi karşılık geldiği kabul edilir.



Şekil 3.3 Boya test numunesi yerleşime örnek

Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

El tipi spektrofotometre ile şartlandırma odasında tutulan standart ve cihazda yaşlandırılan test



Şekil 3.4 Orta PVC bir boyada koyu renklerde 4 döngüsonrası gözlemlenen solma ve yaşlanma



Şekil 3.5 Orta PVC bir boyada açık renklerde 4 döngüsonrası gözlemlenen solma ve yaşlanma Panellerinin her döngü sonrası L,a,b değerleri okunarak kaydediler.

- L – Açıklık (lightness) koordinatı (L=0 siyahı gösterir ve L=100 beyazdır)
- a – kırmızı/yeşil koordinatıdır, +a kırmızıyı, – a ise yeşili belirtir
- b – sarı/mavi koordinatıdır ve +b sarıyı, -b ise maviyi belirtir.

Çizelge3.2. Hesaplama Çizelgesine örnek

STANDART		L	A	B	DE	ÇALIŞMA		L	A	B	DE
	Q-SUN	77,46	-4,71	17			Q-SUN	77,88	-4,63	17,75	
	LAB	77,46	-4,71	17			LAB	77,88	-4,63	17,75	
	Q-SUN	77,81	-4,06	13,83			Q-SUN	78,24	-3,91	14,5	
	LAB	77,53	-4,63	16,96	3,19		LAB	77,91	-4,53	17,77	3,35
	Q-SUN	77,76	-3,95	13,67			Q-SUN	78,53	-3,71	13,91	
	LAB	77,46	-4,64	16,91	3,33		LAB	77,82	-4,54	17,75	3,99
	Q-SUN	77,94	-3,8	14,29			Q-SUN	78,65	-3,58	14,57	
	LAB	77,47	-4,76	16,98	2,89		LAB	77,97	-4,67	17,77	3,45
	Q-SUN	77,89	-3,53	14,87			Q-SUN	78,8	-3,3	14,97	
	LAB	77,39	-4,64	16,93	2,39		LAB	77,85	-4,56	17,76	3,11

3.1.2. FemtoPro Sanal Evren Lazer Optik Laboratuvarı:

Çalışmaların ilk aşamasında FemtoPro sanal evren lazer optik laboratuvarında sanal gerçeklik gözlükleri ile lazer optik bilhassa ikinci harmonik üretimi üzerinde çalışmalar yapılmış, daha sonraki aşamalar olan teorik modelleme ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için deneyim sağlanmıştır.

Femtopro eğitim öğretim amacıyla ultra hızlı bir lazer laboratuvarının etkileşimli bir benzeteci olup Gauss lazer ışını yayılımının, ultra kısa optik darbelerin, tipik optik elemanlar tarafından modülasyonunun; doğrusal ve doğrusal olmayan ışık-madde etkileşiminin hesaplanması ve görselleştirilmesi için fiziksel modellere uygulanmıştır. (Brixner T. 2023)

FemtoPro, Julius-Maximilians-University (JMU) of Würzburg tarafından geliştirilen bir sanal evren lazer laboratuvarıdır (Müller S 2022). Kullanıcılar VR gözlükleri takar ve sanal evren lazer laboratuvarında optik elemanları kontrol ederler. Bu platformda, adım adım rehberleri takip ederek karmaşık lazer deneylerini güvenli bir şekilde kurabilir ve çalıştırılabilir. FemtoPro, yapay zeka destekli optik ve fotonik deneyler yapmak için sanal bir laboratuvar ortamı sunar. FemtoPro'da gerçekleştirilebilecek bazı deneyler:

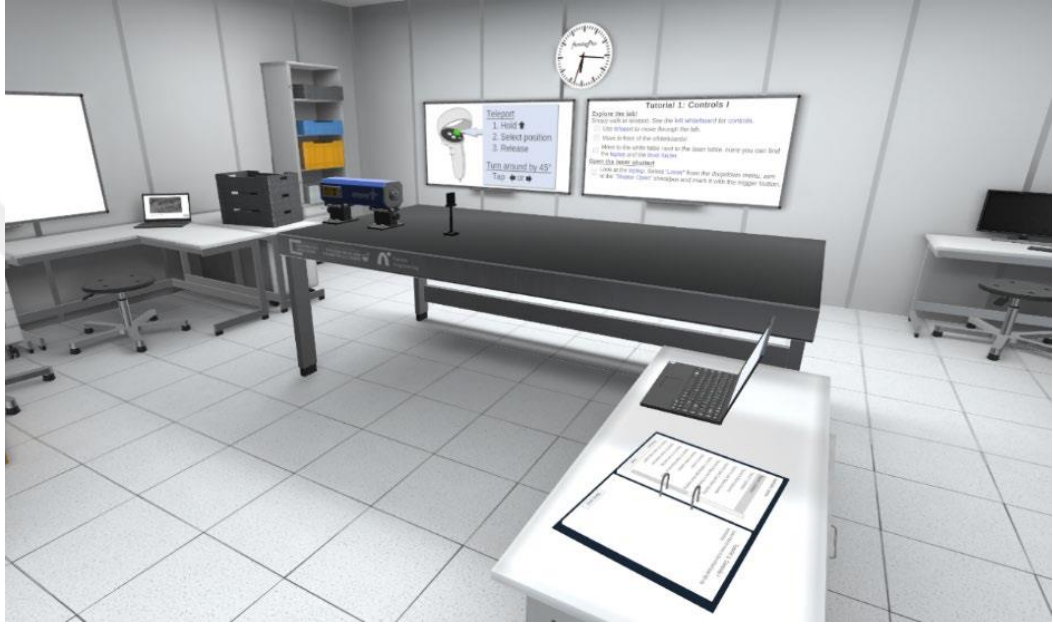
Işık Kırılması Deneyleri: Farklı ortamlarda ışığın kırılma açısını incelenebilir. Prizmalar, cam levhalar ve lensler kullanarak ışığın yolunu değiştirilebilir

Difraksiyon ve Girişim Deneyleri: Işık dalgalarının birbirleriyle etkileşimi gözlemlenebilir. İki yarı saydam yüzey arasında girişim desenleri oluşturabilir veya tek bir yarı saydam yüzeyden geçen ışığın difraksiyonu incelenebilir.

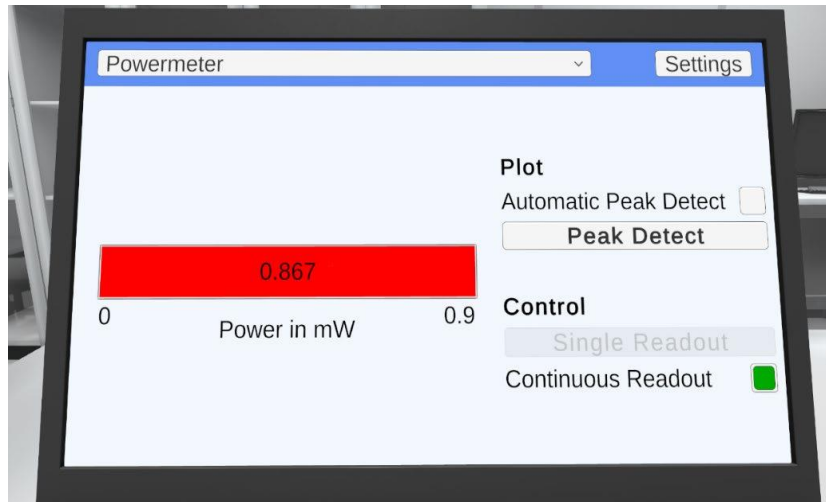
Optik Elemanlarla Çalışmak: FemtoPro’da bulunan optik elemanları (örneğin lensler, aynalar, prizmalar) kullanarak ışığın yönünü değiştirilebilir. Böylece, optik sistemlerin nasıl çalıştığını anlaşılır.

Lazer Deneyleri: Sanal bir lazer kullanarak ışık demetinin özelliklerini incelenebilir. Lazer ışığının odaklanması, polarizasyonu, ikinci harmonik üretimi ve tayfi hakkında sayısız deneyler yapılabilir.

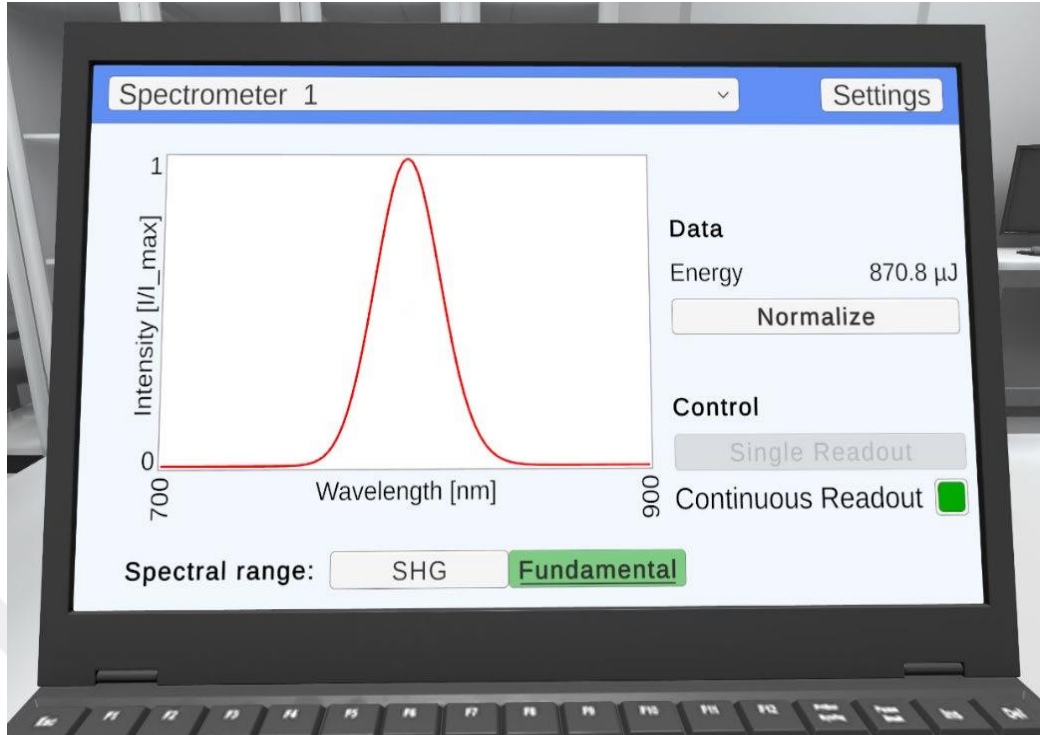
Kurulum: Bir sanal gerçeklik uygulaması olan femtoPro'yu başarıyla kurmak ve çalıştırmak için belirli ön koşulların karşılanması gerekir.



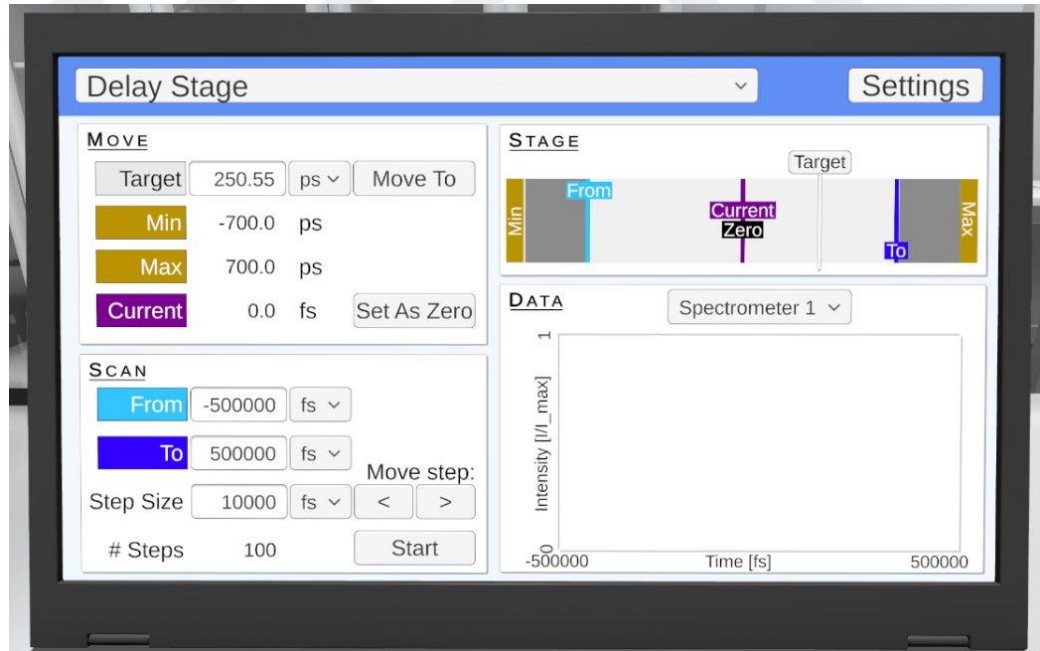
Şekil 3.6 FemtoPro sanal evren optik laboratuvarı



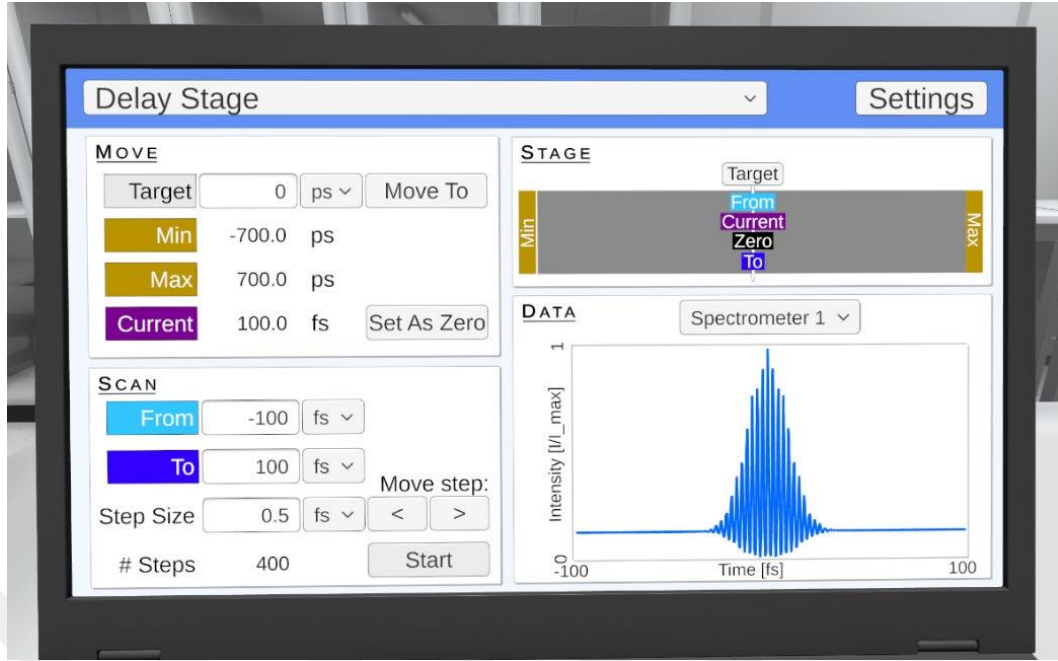
Şekil 3.7 Sanal evren optik laboratuvarı güç metre



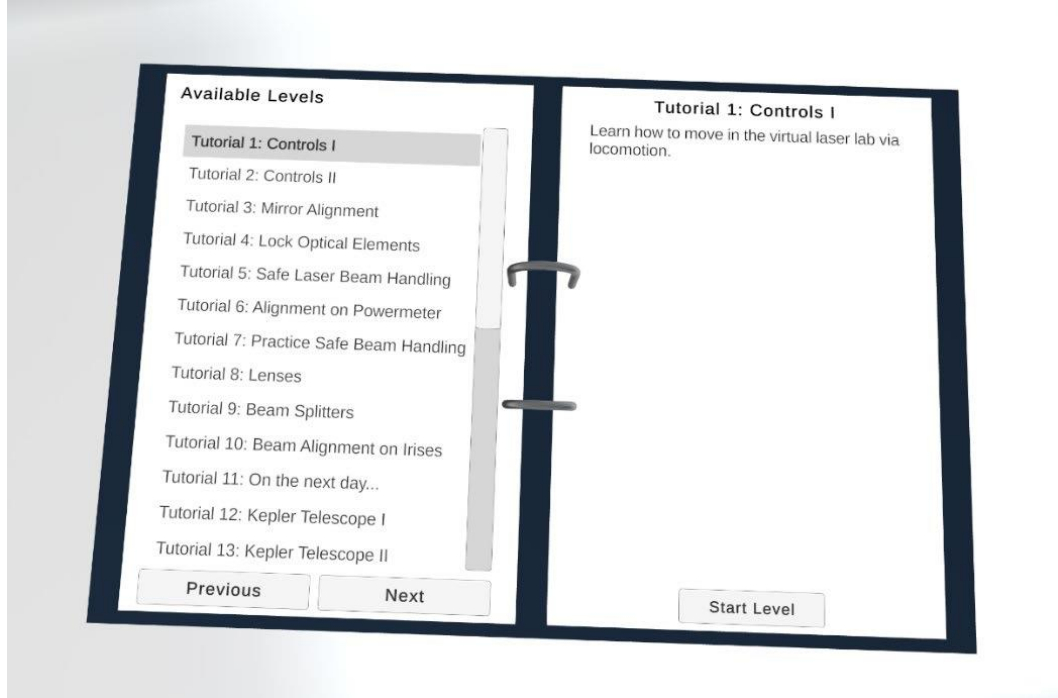
Şekil 3.8 Sanal evren optik laboratuvarı spektrometre



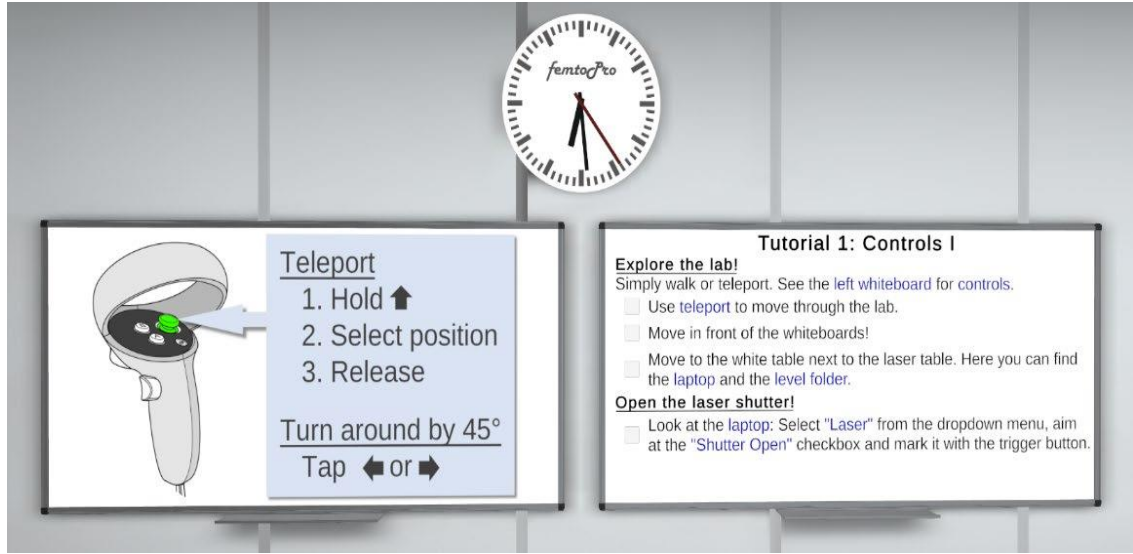
Şekil 3.9 Sanal evren optik laboratuvarı gecikme platformu



Şekil 3.10 Sanal evren optik laboratuvarı gecikme platformu uygulaması

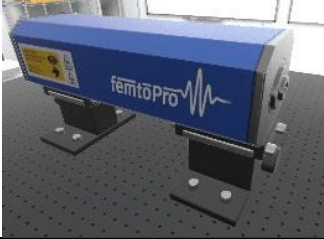
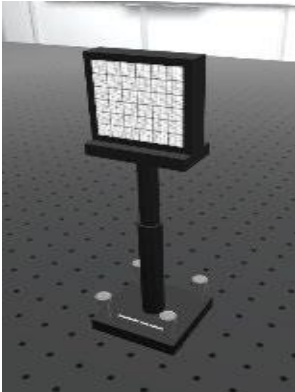


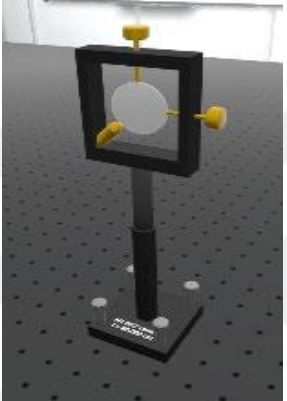
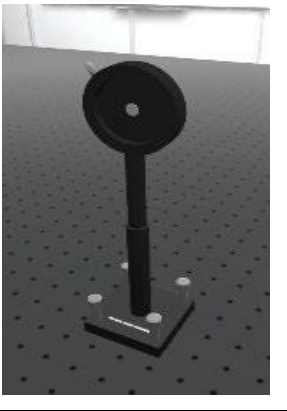
Şekil 3.11 Sanal evren optik laboratuvarı eğitim ve uygulama seçenekleri

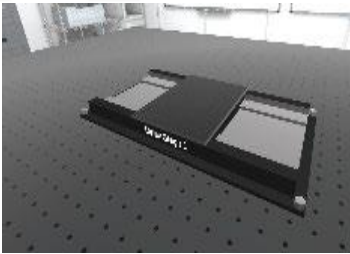
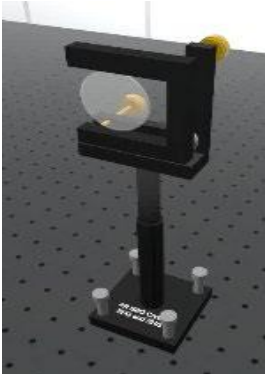


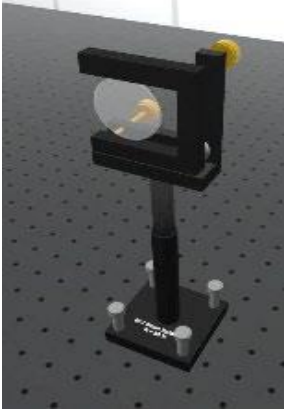
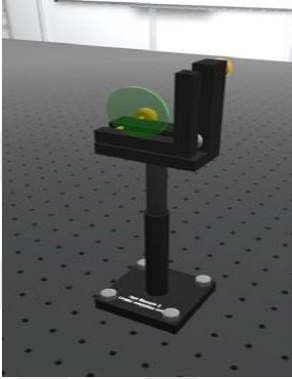
Şekil 3.12 Sanal evren optik laboratuvarı kontroller

Çizelge 3.3. Laboratuvardaki araçlar ve özellikleri

ÜRÜN	RESİM	TANIM
LAZER		800 nm'de ortalanmış, odaklanmamış 5 mm'lik bir ışın çapına sahip, 15-30 fs süreli (maksimum yarı genişlikte tam genişlik) darbeler üretir.
IŞIN KESİCİ		Lazer ışınını durdurur. Milimetre ızgarası ışın yarıçapını tahmin etmek için kullanışlıdır. Engelleyicinin yüksekliği ve dönüş açısı ayarlanabilir.

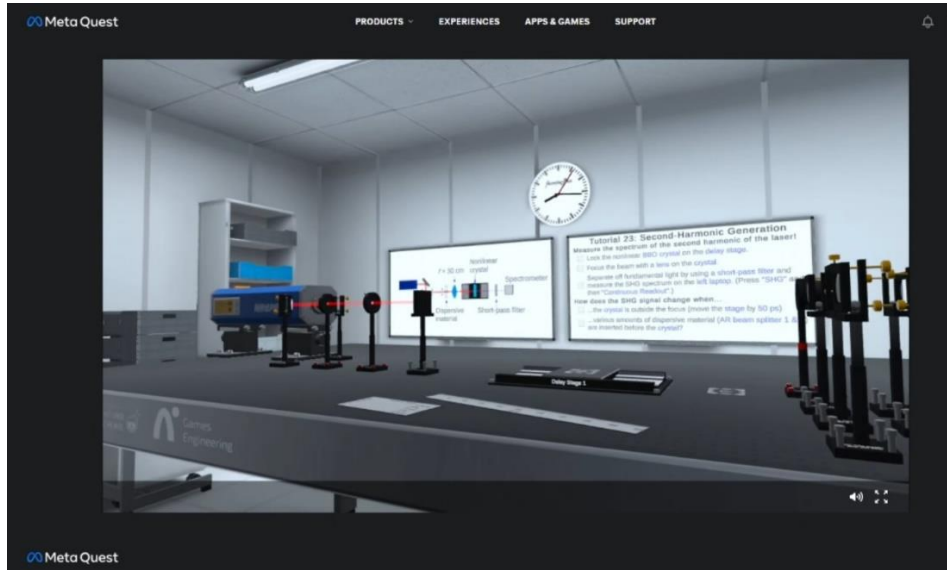
AYNA		Işını diğer yönlere yönlendirir. Aynalar, düzlemsel ("düz") aynaların yanı sıra dışbükey ve içbükey aynalar olarak da mevcuttur. Yükseklik ve kaba dönüş ayarlanabilir. Ayrıca, yansıyan ışının yönünü dikey düzlemde ve yatay düzlemde üst ve alt vidalarla hassas şekilde hizalanabilir.
LENS		Odak uzunluğunun işaretine bağlı olarak ışını odaklar veya odak dışı bırakır (pozitif: odaklama, negatif: odak dışı). Yükseklik ve dönüş ayarlanabilir. Pirinç vidalar merceğin tutucu içindeki konumunu kontrol eder (üst vida: dikey konum, yan vida: yatay konum).
İRİS		Işın çapını azaltır ve hizalamayı izler. İrisler, çift olarak kullanıldığında tekrarlanabilir bir ışın yolu sağlamada kullanışlıdır. Yükseklik ve dönüş ayarlanabilirken iris açıklığının çapı, gri kolun kısırtma hareketi kullanılarak hareket ettirilmesiyle değiştirilebilir.
IŞIN BÖLÜCÜ		Yarı yansıtıcı bir ayna görevi görür. Bir lazer ışını iki ışına bölebilir (bir iletilen ışın, bir yansıyan ışın) veya ışınları yeniden birleştirebilir. Yükseklik, dönüş ve ince hizalama ayarlanabilir (aynalara benzer).

GÜÇMETRE		Gelen bir lazer ışınının ortalama optik gücünü ölçer. Yükseklik ve dönüş ek olarak giriş açıklığının çapı da değiştirilebilir (iris gibi). Gelen birkaç ışın için, uzaysal ışın özellikleri, karşılıklı ışın örtüşme faktörleri ve açısal uyumsuzluk dikkate alınarak girişim simüle edilir.
SPEKTROMETRE		Gelen bir lazer ışınının dalga boyu yoğunluk tayfını ölçer. Yükseklik, dönüş ve giriş açıklığı ayarlanabilir (iris gibi). Güç ölçere benzer ancak siyah dedektör muhafazası kullanır. Gelen birkaç ışın için, uzamsal ışın özellikleri, karşılıklı ışın örtüşme faktörleri ve açısal uyumsuzluk dikkate alınarak tayfsal girişim simüle edilir.
HAREKET PLATFORMU		Platforma bağlı optik öğeleri hareket ettirir. Bu, lazer darbeleri arasında değişken zaman gecikmelerinin oluşturulabileceği optik gecikme çizgilerini uygulamak için kullanılır.
İKİNCİ HARMONİK KRİSTALLERİ		BBO kristalleri darbe şekli gibi femtosaniye darbe özelliklerini hesaba katarak giriş lazer ışınının frekansını iki katına çıkarır. Max kazanç 50%

DALGA BOYU FİLTRESİ		Lazer tayfının bir kısmını bloke ederken diğer kısmı şeffaftır. Dalga boyu filtreleri, alçak geçiren filtreler (belirli bir dalga boyunun altında iletim), yüksek geçiren filtreler (belirli bir dalga boyunun üzerinde iletim) veya bant geçiren filtreler (belirli bir dalga boyu aralığında iletim) olarak mevcuttur.
BİYOMOLEKÜ-LER NUMUNE		Bireysel optik özelliklere sahip bir molekülün çözeltisi. femtoPro, Franck-Condon modelini kullanarak birinci dereceden optik yanıtı simüle eder. Moleküler özellikler parametrelendirilir ve belirli bir özelliğin tayfsal yanıt üzerindeki etkisini araştırmak için değiştirilebilir.

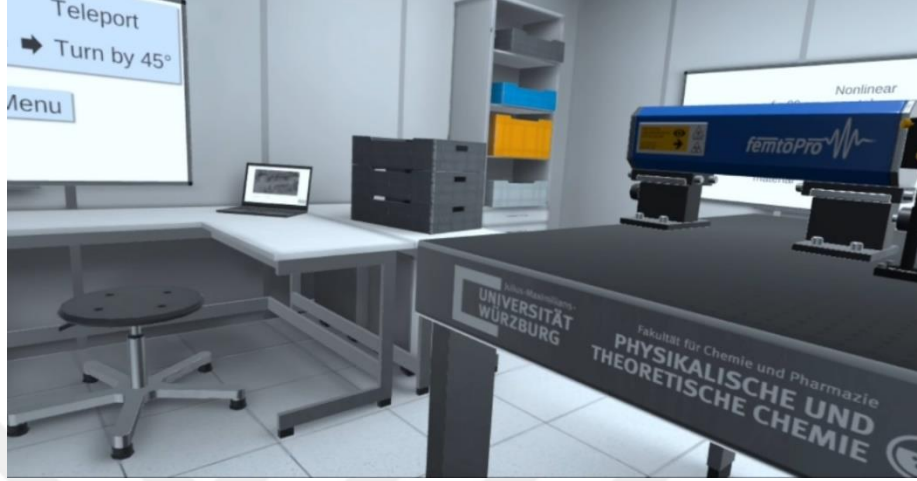
3.1.2.1 FemtoPro sanal evren laboratuvar deneyleri:

Würzburg Üniversitesince geliştirilen sanal laboratuvar (şekil 3.13) fiziksel laboratuvar düzeneklerinin getirdiği sınırlamalar olmadan, lazer güneş benzeteci



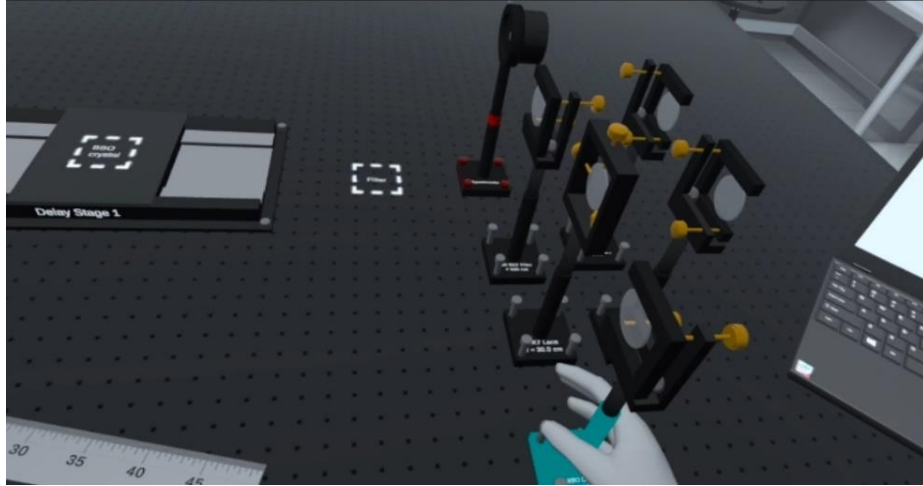
Şekil 3.13 FemtoPro sanal evren optik laboratuvarı deney ortamı

düzeneginde kullanılacak tasarımlar denenmiştir. Böylece yeni fikirler üzerinde çalışılmış, teorik modellerin tasarlanması ve deneysel kurulumu geçiş için gerekli adımlar kolaylıkla test edilmiştir. Ek olarak, laboratuvarın sanal yapısı deneylerin hızlı bir şekilde yinelenmesine ve iyileştirilmesine olanak tanımış, araştırma sürecini hızlandırarak daha sağlam sonuçlar alınmasına katkı sağlamıştır.



Şekil 3.14. FemtoPro Würzburg Üniversitesi'nce geliştirilmiştir.

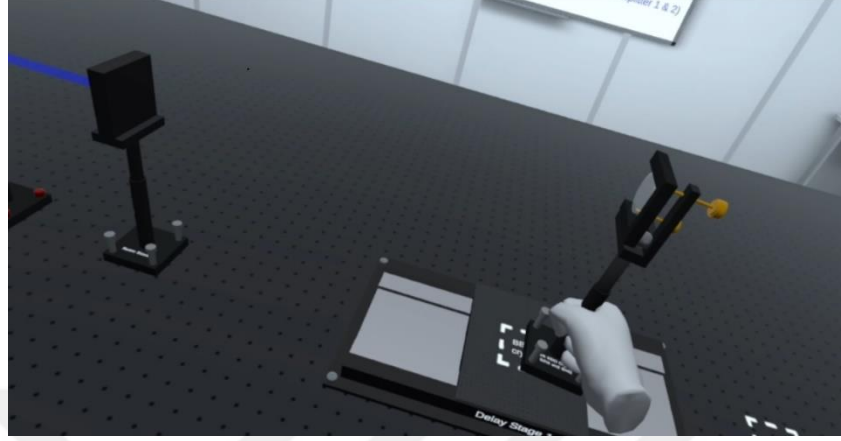
Dahası, FemtoPro sanal optik lazer laboratuvarı, geleneksel laboratuvar düzeneklerine (şekil 3.15) uygun maliyetli bir alternatif sunar. Pahalı donanım ve sarf malzemelerine olan ihtiyaç böylece ortadan kaldırılmıştır. Gelişmiş optik araçlara erişimin bu şekilde gerçekleştirilebilmesi benzeteçin tasarım ve üretimi için bir fırsat olmuştur.



Şekil 3.15. Sanal evrende gereken optik elemanların seçilmesi

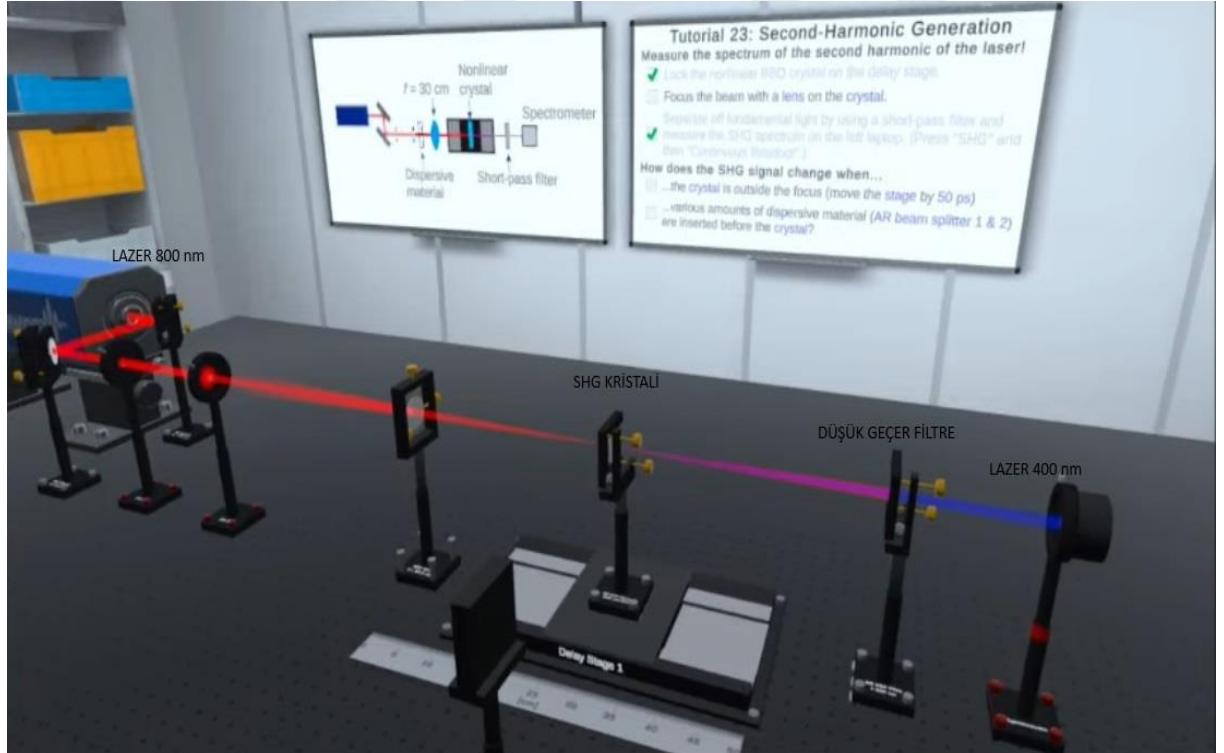
Uygulamalar açısından bu sanal ortam sadece benzeteçin geliştirilmesiyle kısıtlı olmayıp başka araştırma alanları içinde bir potansiyele sahiptir. Optik ve fotonikteki temel çalışmalardan telekomünikasyon ve tıbbi görüntülemedeki pratik uygulamalara kadar, bu teknoloji keşif için çok çeşitli olanaklar sunmaktadır.

Şekil 3.16 da SHG kristali yerleştirilirken görülmektedir. Aynı şekilde sanal laboratuvarı karmaşık optik olayları araştırmak, belirli optik özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirmek veya gerçek dünya uygulamaları için yenilikçi cihazlar tasarlamak için de kullanılabilir.



Şekil 3.16. Sanal evrende optik elemanları yerleştirme

Genel olarak, Würzburg Üniversitesi'nin FemtoPro sanal optik lazer laboratuvarı, optik araştırmaları alanında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Şekil 3.17 de SHG kristali kullanılarak ikinci harmoniğin üretilmesi deneyi gerçekleştirilmiştir. Lazer kaynaktan 800 nm olarak alınan ışın optik elemanlar ile yansıtılarak SHG oluşturmak üzere BBO kristali üzerine odaklanmıştır.



Şekil 3.17. Sanal evrende ikinci harmonik oluşum deneyi

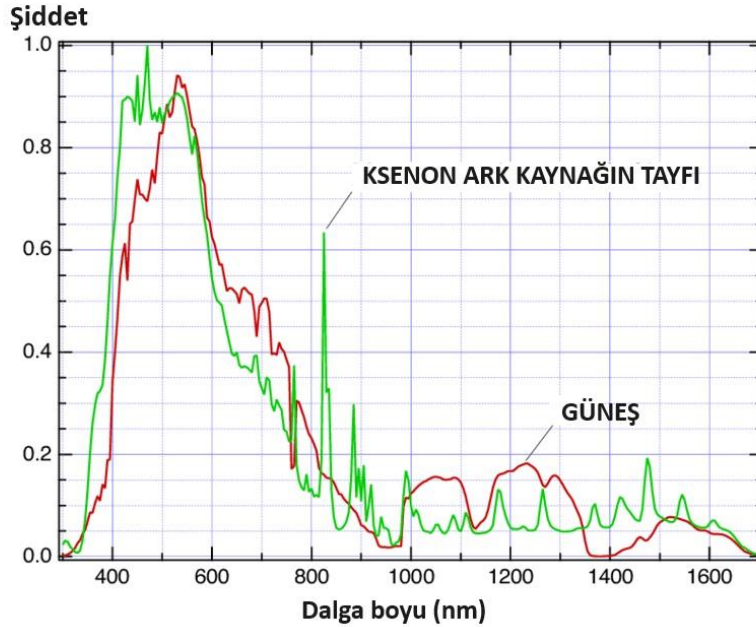
Kristalden sonra hem 800 hem de 400 nm dalga boylarına sahip iki ayrı ışın demeti elde edilmiştir. Bu iki ışın 500 nm düşük geçer filtre üzerine düştüğünden 800 nm elenerek 400 nm'lik ışının spektrometre ile ölçümü yapılmıştır.

Bu çalışmalar neticesinde teorik modelleme için önemli bir bilgi birikimi ve altyapı oluşturulmuştur. Teorik modellemede kullanılması gereken aynalar, lensler, SHG kristalleri, ışın bölücüler, düşük veya yüksek geçer filtreler gibi optik elemanlar ve lazer kaynakları tespit edilerek teorik modellemeye geçilmiştir.

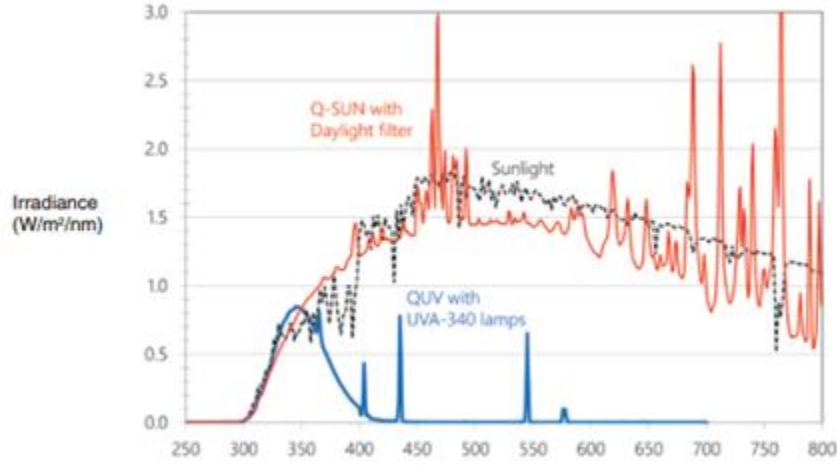
Sonuç olarak, Würzburg Üniversitesi'nin FemtoPro sanal optik lazer laboratuvarı, araştırmacıların optikte deneyleri nasıl yürüttüklerini yeniden tanımlayan, bir araçtır. Sürükleyici simülasyon imkanları, çalışmamız olan benzeteç dışındaki pek çok optik araştırma alanlarında keşif ve keşif için katkı sunmaktadır. Bu teknoloji gelişmeye ve yeteneklerini genişletmeye devam ettikçe, ışık ve uygulamalarına ilişkin anlayışı derinlemesine şekillendirecek optik araştırmalarında katkı sunacaktır.

3.1.3 Teorik Modelleme

Sanal evren çalışmalarından elde edilen deneyimlerle Lazer güneş benzeteçini deneysel olarak yapabilmek üzere öncelikle teorik şartların belirlenmesi ve gereken hesaplamaların yapılarak modellemenin oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 3.18 da görülen güneşin ve ksenon ark kaynağın tayfları (Reber G. 2005) ve Şekil 3.19 KC ait tayflar incelenmiştir. Bu sayede lazer benzeteçin uyması gereken tayf yapısı daha da netleşmiştir. Tayfa bakarak lazer benzeteçin hangi standarda uyması gerektiği ortaya konmuştur. Bu modelleme hem yeryüzü hemde uydu irtifası benzeteçi için modellenmiştir.



Şekil 3.18 Güneş ve Ksenon Ark lambanın tayfları



Şekil 3.19. Güneş (siyah noktalı) ve KC (kırmızı) ait tayf (EK 4)

3.1.3.1 Lazer Benzeteç İçin Uygun Tayf Standartı Belirleme:

Öncelikle lazer benzeteç için hangi standarta ait tayfın referans alınacağına karar verilmelidir. Yaşlandırma ve hızlandırarak yaşlandırma cihazlarında güneş tayfına benzerliği nedeniyle temelde ksenon ark kaynakları kullanılmaktadır. PV testi amaçlı benzeteçlerin atmosfer içi dünya yüzeyi standardı olan AM1.5G ile uydular için belirlenmiş atmosfer dışı AM0 standardı tayf oranları ile yaşlandırma benzeteçleri için geçerli standartlara ait tayf açılımlarında farklılıklar olduğu görülmektedir. (Çizelge 2.4, 2.5, 2.6). Örneğin AM1.5 da UV dikkate alınmazken ASTM G155 de UV oranı %11 dir. AM1,5’deki bu durumun PV panelleri koruma amaçlı kaplanan UV filtreleri (Almarzooqi N. 2023, Poulek V. 2012) nedeniyle UV bandında elektrik üretememelerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

PV güneş panelleri testi için üretilen benzeteçler güneş şiddeti ve tayfına en yakın değerlerde ışırma yapmalıdır. Bu benzeteçlerin ışırmasına maruz bırakılacak PV panelin UV dışında kalan, görünür ve IR bantlarında en yüksek verimle elektrik üretimi yapması beklendiği halde yaşlandırma amaçlı benzeteçler için en önemli aralık tayfın UV bandırır.

Bir diğer ilginç durum ise yaşlandırma benzeteçi standartlarında da UV bandı çok detaylı incelenirken görünür ve IR bantlarının detaylandırılmamış olduğudur. Çizelge 2.5 ve 2.6 da, % 11 lik UV bandı detaylı belirtilirken görünür band için 400-700nm % 72 değeri verilip IR bandına yer verilmemiştir. Dolayısıyla burada güneş tayfındaki IR oranı $100-(11+72)=\%17$ olarak hesaplanabilmektedir. Bunun IR salınımının foto termal etkilerinin ksenon-ark kaynağın tayf benzerliği ve benzeteçlerin ısı kontrolü sayesinde karşılanacağından ötürü olduğu düşünülebilir. (Çizelge 3.1 ısı değerleri ve Şekil 3.2 güneş gözü algılayıcı).

Yaşlandırma ve hızlandırarak yaşlandırma benzeteçlerine bir bakıma güç benzeteçleri de denebilir (Petrash J., 2006). KC yaşlandırma döngülerine bakıldığında 168 saatlik (1 hafta) pozlama süresinin bir yıllık güneş ışırmasına denk geldiği belirtilmiştir (Materyal ve Metot s.65). Bu durumda cihazın 52 güneş gücünde olduğu anlaşılmaktadır. Bu modelleme için referans alınması gereken bir değerdir.

Neticede lazer güneş benzeteçi için, AM1.5 da bulunmayan UV bandını içeren ve ASTM G155 te detayları bulunmayan görünür ve IR bantlarına ait detayları da kapsayan bir standart oluşturulması gereği ortaya çıkmıştır. Bu amaçla lazer güneş benzeteçi için hem yeryüzü hemde atmosfer dışı uydu irtifası için standartlar belirlenmiştir.

3.1.3.2. Yeryüzü İçin Lazer Güneş Benzeteçi Tayfı:

Yeryüzü için için belirlenen lazer güneş benzeteçi tayfı Çizelge 3.3'te görülmektedir. Bu tayf, Çizelge 2.5 ASTM G155 standardı toplam oranları olan UV %11, görünür %77 ve IR %13 değerlerine göre oluşturulmuştur. UV nin alt bandları için ASTM G155 oransal değerleri esas alınmış olup görünür ve IR içinse tayf Çizelge 2.4'deki AM1.5 oranları göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Netice itibariyle Lazer benzeteç için oransal ve yeni bir standart ortaya konularak UV, görünür ve IR bantlarında güneşinkine en yakın tayfinin oluşturulması amaçlanmıştır.

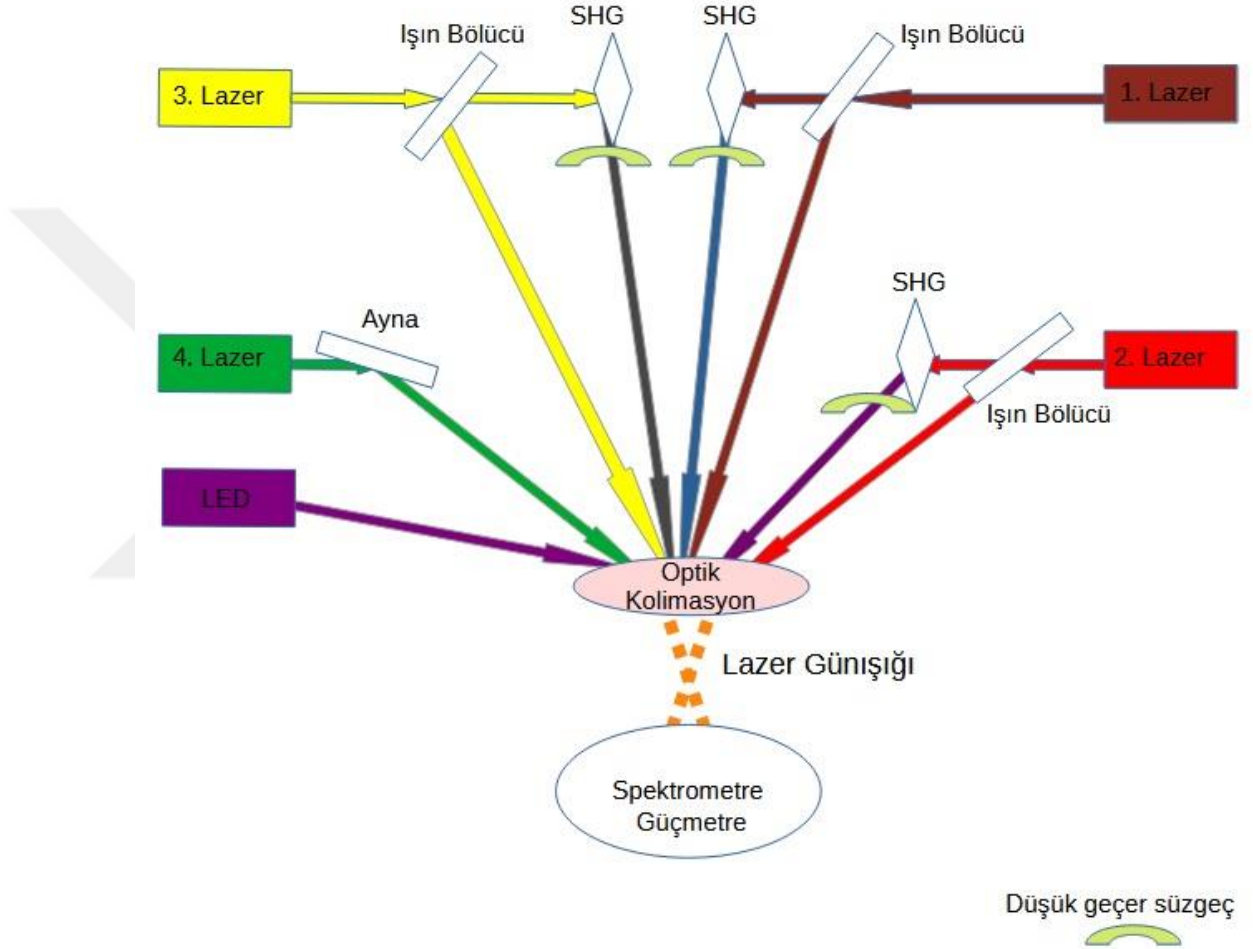
Ayrıca güneşin dünyada deniz seviyesindeki ısıma değeri 1000 W/m^2 olarak ölçümlenmektedir. m^2 lazer ısıma skalasında büyük kalacağından bu değer cm^2 için 100 mW/cm^2 olarak alınmıştır. 52 güneş içinse bu 5200 mW/cm^2 ye eşittir. Ek olarak lazerin 1 cm^2 lik bir alanı kapsaması için ışın yarıçapı $r=5,6 \text{ mm}$ olmalıdır.

Çizelge 3.4. Yeryüzü güneş tayfında lazer benzeteçin orantısal olarak hesaplanmış değerleri

Tayf Aralığı (nm)	AM1.5G ye göre güneş tayfı %	Lazer Benzeteçin Orantıyla Hesaplanan Tayfı %	52 güneş gücü için gereken ışık mW/cm^2
300-320	Veri yok	0,62	32
320-360	Veri yok	4,45	221
360-400	Veri yok	5,95	310
400-500	18,4	23,37	1210
500-600	19,9	25,26	1310
600-700	18,4	23,37	1222
700-800	14,9	5,84	303
800-900	12,5	4,91	267
900-1100	15,9	6,25	323
Toplam	100	100	5200

3.1.3.3 Yeryüzü İçin Lazer Güneş Benzeteçi Tasarımı:

Yeryüzü için lazer güneş benzeteçi tasarımı Şekil 3.20 de görülmektedir. Tasarımda dört adet DPSSL kaynak, bu kaynakların üçünde SGH kristalleri ile ikinci harmonik oluşumu ve bir adette LED kullanılması planlanmıştır. Çizelge 3.4 deki aralıkları kapsayabilmek amacıyla, lazer 1- 900 nm, lazer 2 – 750 nm, lazer 3 – 680 nm ve lazer 4 - 550 ve led 1 – 320 nm olarak modellenmiştir. Ayrıca lazer kaynakların ve SHG ışınların çizgi genişlikleri 20 nm olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.20 Yeryüzü için diyet uyarımlı katı hal lazer güneş benzeteçi tasarımı

Lazer 1 900 nm dalga boyunda olup ışın bölücüden gereken şiddette 900 nm olarak kolimasyona iletilecek, bölünen ışın ise SHG kristaline gönderilecektir. SHG kristalinde 450 ve 900 nm olarak iki dalga boyuna ayrıştırılan ışın 500 nm düşük geçer süzgeç vasıtasıyla 450 nm olarak kolimasyona iletilecektir. 900 nm ışın IR bandında dolayısıyla fototermal etkide olacağından 800-1100 nm IR bandını dolayısıyla bu band için gereken toplam şiddete sahip olması planlanmıştır.

Lazer 2, 750 nm dalga boyunda olup ışın bölücüden gereken şiddette 750 nm olarak kolimasyona iletilecek, bölünen ışın ise SHG kristaline gönderilecektir. SHG

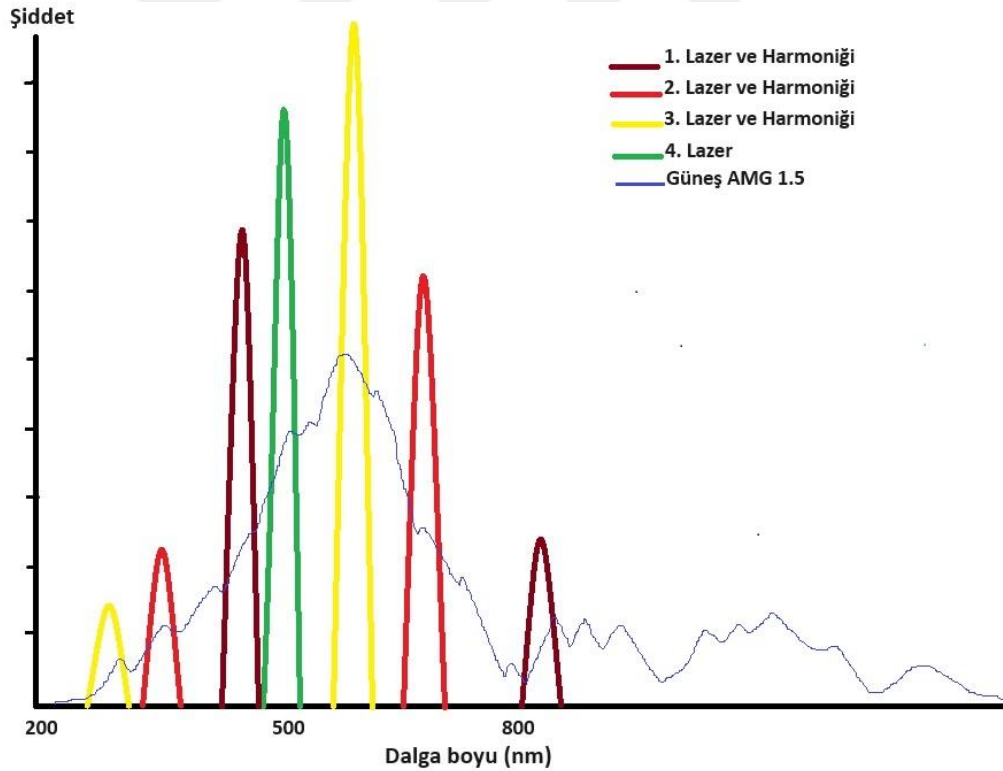
kristalince 750 ve 375 nm olarak iki dalga boyuna ayrıştırılan ışın 400 nm düşük geçer süzgeç vasıtasıyla 375 nm olarak kolimasyona iletilecektir.

Lazer 3, 680 nm dalga boyunda olup ışın bölücüden gereken şiddette 680 nm olarak kolimasyona iletilecek, bölünen ışın ise SHG kristaline gönderilecektir. SHG kristalince 680 ve 340 nm olarak iki dalga boyuna ayrıştırılan ışın 400 nm düşük geçer süzgeç vasıtasıyla 340 nm kolimasyona iletilecektir.

Lazer 4, 550 nm dalga boyunda olup ayna vasıtasıyla direk olarak kolimasyona gönderilecektir.

Ayrıca Çizelge 3.3 te görüldüğü üzere 300-320 nm bandında 32 mW/cm^2 gibi bir ışıma olduğu hesaplanmıştır. Bunun için lazer yerine LED kullanmak gereken gücün düşük olması sebebiyle daha avantajlı görülmüştür.

Şekil 3.8'deki tasarım ile üretilen ışın optik kolimasyon ile spektrometreye iletildiğinde oluşması öngörülen tayf Şekil 3.9 da gösterilmiştir. Tasarım ile güneş tayfının 1100-800 nm bandı için 900 lazer nm, 800-700 nm bandı için 750 nm lazer, 700-600 nm bandı için 680 nm lazer, 600-500 nm bandı için 550 nm lazer, 500-400 nm bandı için 450 nm SHG, 400-360 nm bandı için 375 nm SHG, 360-320 nm bandı için 340 nm SHG ve 320-300 nm bandı için LED kullanılarak oluşturulması tasarlanmıştır.



Şekil 3.21 Yeryüzü diyot uyarımlı katı hal lazer güneş benzeteçi için öngörülen tayf.

3.1.3.4 Uydu İrtifası İçin Lazer Güneş Benzeteçi Tayfı:

Atmosfer dışı (uydular için) belirlenen lazer güneş benzeteçi tayfı Çizelge 3.4'te görülmektedir. Uyduların bulunduğu irtifada atmosferik filtrasyon bulunmadığından yeryüzüne göre özellikle UV ardından IR bandlarında farklılıklar olacağı öngörülmektedir. Bu amaçla literatür (Brandhorst H. 1975, Pravettoni M. 2015, Hulstrom R. 1985) bilgileri ve Şekil 2.4. deki AM0 PV güneş benzeteçleri tayfları orantısal analiz edilerek Çizelge 3.4 ortaya çıkarılmıştır. Çizelge 3.4 de görüleceği üzere, UV ve IR bantlarına ait ışımadaki artış, görünür bantlardaki ışmanın toplam ışımaya göre azalmaya sebep olacaktır. Bu irtifa için yapılacak çalışmalar sadece uydularla kalmayıp ay, Mars vb seyahatleri gerçekleştirecek uzay araçlarının dış yüzey kaplamalarında oluşabilecek yaşlanmayı da benzetebilir. Bunun için uzayın o noktasında mevcut güneş tayfı modellenenebilir. Bu durumda tayfı oluşturan bandlar ve bunlara karşılık gelen ışıma şiddetlerini belirlemek yeterli olacaktır.

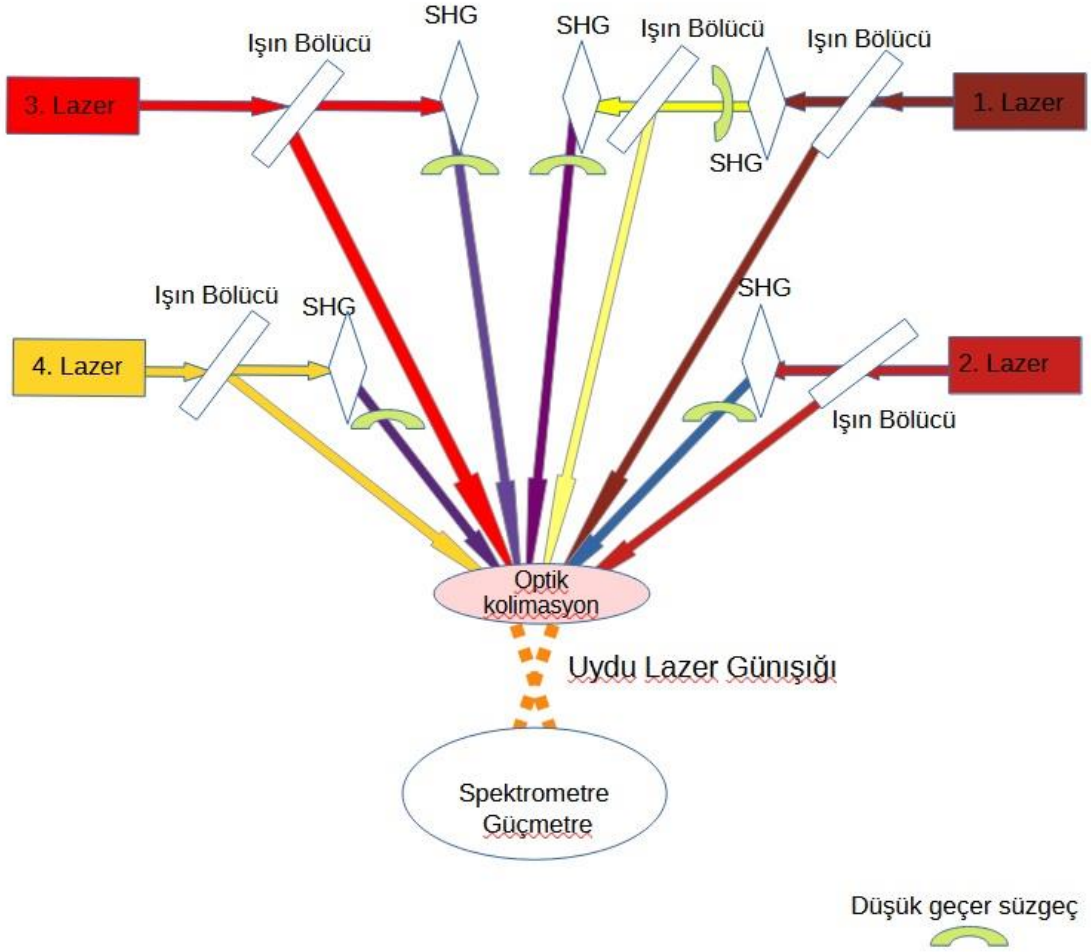
Ayrıca güneşin atmosfer duşu uydu irtifasındaki ışıma değeri 1366 W/m^2 olarak ölçümlenmektedir (France R. 2022). Bunu lazer ışını ölçeğinde $136,6 \text{ mW/cm}^2$ olarak değerlendirmek uygun olacağından 52 güneş içinse bu değerin 7100 mW/cm^2 olduğu hesaplanacaktır. Bu sayede 52 güneş için tayfin her bandına karşılık gelen ışın şiddetleri de ortaya çıkacaktır. Böylece tayfı oluşturacak lazer kaynaklara ait ışınların her birinin şiddeti teker teker hesaplanarak Çizelge 3.4 de belirtilmiştir. Uzay vakum ortamında uydu kaplamaları ve dış yüzeylerinde güneş ışımasının bulunduğu durumlar ile karanlık arasında büyük sıcaklık farkları bulunmaktadır. (Singh P. 2012)

Çizelge 3.5. Uydu irtifası tayfında lazer benzeteçin orantısal hesaplanmış değerleri

Tayf Aralığı (nm)	AM0 a göre güneş tayfı %	Lazer Benzeteçin Orantısal Tayfı %	52 güneş gücü için gereken ışık mW/cm^2
200-320	Veri yok	1,82	129,3
320-360	Veri yok	5,32	377,7
360-400	4,67	7,87	559
400-500	16,90	17,39	1235,2
500-600	16,68	18,26	1297
600-700	14,28	16,38	1163,4
700-800	11,31	8,14	578,1
800-900	8,98	7,06	501,4
900-1100	13,57	9,83	698,2
1100-1400	13,59	7,90	561,1
Toplam	99,98	99,97	7100

3.1.3.5 Uydu İrtifası İçin Lazer Güneş Benzeteçi Tasarımı:

Uydu irtifası için lazer güneş benzeteçi tasarımı Şekil 3.22 de görülmektedir. Tasarımda dört adet DPSSL kaynak ve bu kaynaklarda SHG kristalleri ile ikinci harmonik oluşumu planlanmıştır. Çizelge 3.4 deki aralıkları kapsayabilmek amacıyla, lazer 1 - 1160nm, lazer 2 – 900 nm, lazer 3 – 750 nm ve lazer 4 - 680 nm olarak modellenmiştir. Ayrıca lazer kaynakların ve SHG ışınların çizgi genişlikleri 20 nm olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.22 Uydu irtifası için diyot uyarımlı katı hal lazer güneş benzeteçi tasarımı

Lazer 1, 1160 nm dalga boyunda olup ışın bölücünden gereken şiddette 1160 nm olarak kolimasyona iletilecek, kalan ışın ise SHG kristaline gönderilecektir. SHG kristalinde 580 ve 1160 nm olarak iki dalga boyuna ayrıştırılan ışın 650 nm düşük geçer filtreye iletilerek 580 nm olarak elde edilecektir. Bu ışın ikinci ışın bölücüyü iletilecektir. Işın bölücünden gereken şiddette bölünen ışın 580 nm olarak kolimasyona iletilecektir. Kalan diğer 580 nm ışın ise ikinci SHG kristaline gönderilecektir. SHG kristalinde 580 ve 290 nm olarak iki dalga boyuna ayrıştırılan ışın 350 nm düşük geçer filtreye iletilerek 290 nm olarak kolimasyona iletilecektir.

Lazer 2, 900 nm dalga boyunda olup ışın bölücüden gereken şiddette 900 nm olarak kolimasyona iletilecek, kalan ışın ise SHG kristaline gönderilecektir. SHG kristalince 900 ve 450 nm olarak iki dalga boyuna ayrıştırılan ışın 500 nm düşük geçer süzgeç vasıtasıyla 450 nm olarak kolimasyona iletilecektir.

Lazer 3, 750 nm dalga boyunda olup ışın bölücüden gereken şiddette 750 nm olarak kolimasyona iletilecek, kalan ışın ise SHG kristaline gönderilecektir. SHG kristalince 750 ve 375 nm olarak iki dalga boyuna ayrıştırılan ışın 450 nm düşük geçer süzgeç vasıtasıyla 375 nm olarak kolimasyona iletilecektir.

Lazer 4, 680 nm dalga boyunda olup ışın bölücüden gereken şiddette 680 nm olarak kolimasyona iletilecek, kalan ışın ise SHG kristaline gönderilecektir. SHG kristalince 680 ve 340 nm olarak iki dalga boyuna ayrıştırılan ışın 450 nm düşük geçer süzgeç vasıtasıyla 340 nm olarak kolimasyona iletilecektir.

Şekil 3.9'deki tasarım ile üretilen ışın optik kolimasyon ile spektrometreye ulaştırıldığında uydu güneş tayfının 1400-1100 nm bandı için 1160 nm lazer, 1100-800 nm bandı için 900 nm lazer, 800-700 nm bandı için 750 nm lazer, 700-600 nm bandı için 680 nm lazer, 600-500 nm bandı için 580 nm SHG, 500-400 nm bandı için 450 nm SHG, 400-360 nm bandı için 375 nm SHG, 360-320 nm bandı için 340 nm SHG ve 320-200 nm bandı 290 nm SHG kullanılarak üretilmesi tasarlanmıştır.

3.1.3.6 Ekipman Modelleme ve Tolerans:

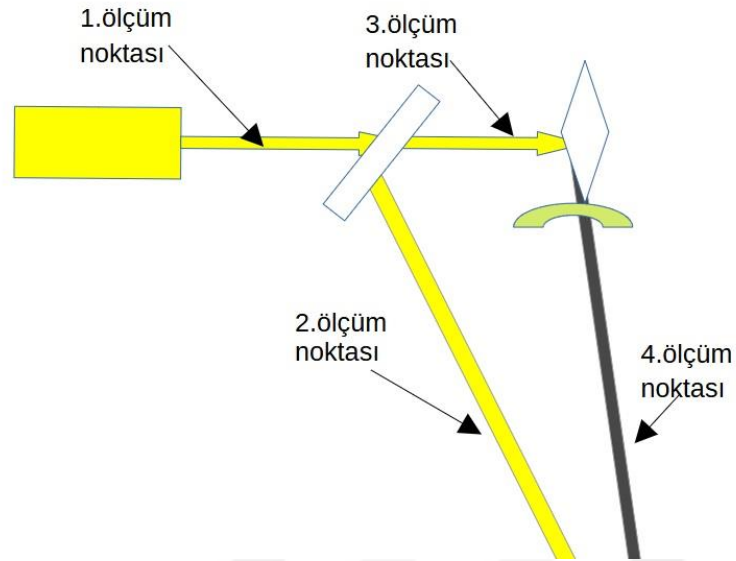
SHG Kristalleri: SHG kristallerinin verimlilikleri %80 düzeyine kadar çıkabilmektedir. Teorik modelleme için temin kolaylığı ve maliyetler açısından %50 olarak alınmıştır (EK 7). Örneğin 800 nm ve 1000 mW bir lazer ışını SHG kristalinden geçince ikinci harmonik dalgaboyu 400 nm ve şiddeti 500 mW olacaktır.

Işın Bölücüler ve Süzgeçler: Modellemede ayrıca sıkça ışın bölücü kullanılması gerekeceğinden bunların %1 den %99 a kadar yansıtarak ışını bölebildikleri görülmüştür. Örnek olarak 800 nm ve 1000 mW bir lazer ışını %30 yansıtıcı bir ışın bölücüye uygulandığında yansıyan ışın 800 nm ve 300 mW farklı bir yönde bölünerek devam eden ışın ise 800 nm ve 700 mW değerinde olacaktır.

Tayfsal sapma ve oran uyumu hesaplamalarında dikkate alınmak üzere tolerans değerleri öngörülmüştür. Lazer kaynaklardan dolayı örneğin %1, SHG kristalleri, ışın bölücü gibi optik elemanlar içinse %3 alınacaktır. Örneğin modeldeki lazer kaynaktan çıkan 1000 mW şiddetindeki bir ışın eğer ışın bölücüden geçilerek ölçülüyorsa %4 çizgi ile 1000 ± 0.3 yani 960-1040 mW aralığında bulunacaktır. Aynı şekilde ışın bölücü ve SHG kristalinde bulundu lazer hattındaki hata oranı %7, ışığın şiddeti ise 930-1070 mW aralığında bulunacaktır.

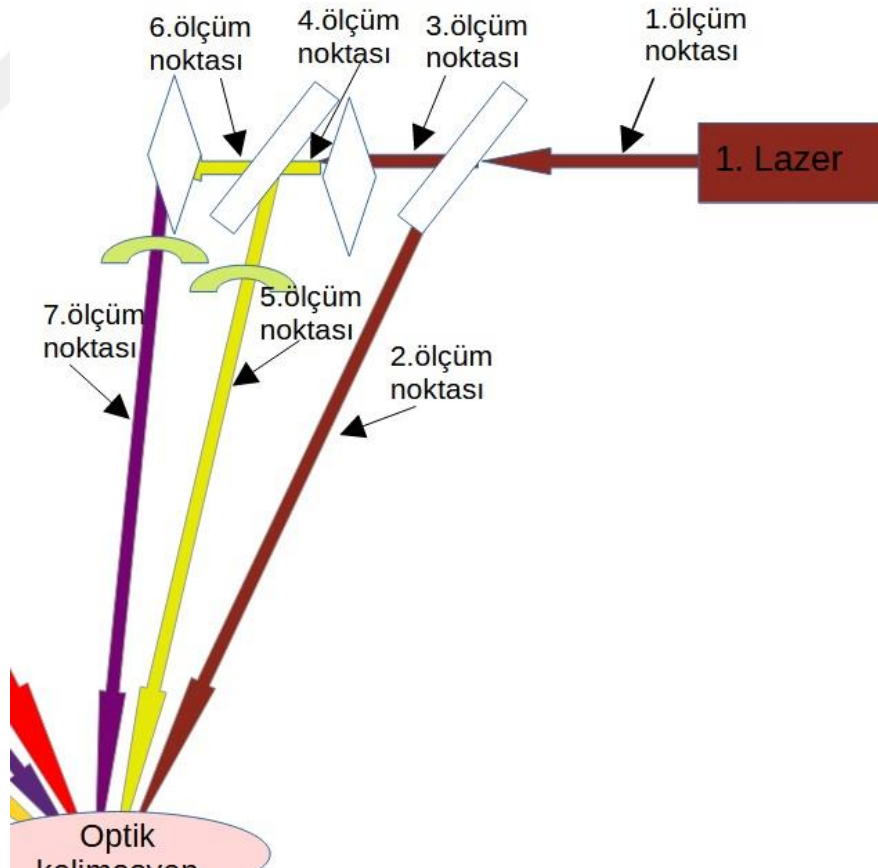
3.1.3.7 Ölçüm Noktaları:

Tek SHG kullanıldığı durumdaki ışın ölçüm noktaları Şekil 3.23 da gösterilmiştir.



Şekil 3.23 Tek SHG kullanıldığı durumdaki ışın ölçüm noktaları

İki adet SHG kullanıldığı durumdaki ışın ölçüm noktaları Şekil 3.24 de gösterilmiştir.



Şekil 3.24. İki adet SHG kullanıldığı durumdaki ışın ölçüm noktaları

3.2. DENEYSEL KURULUM

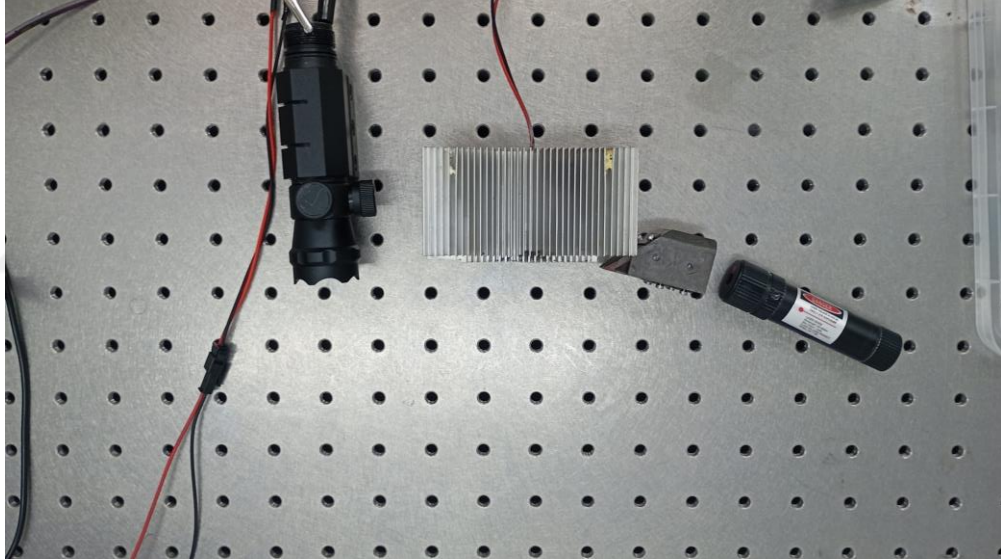
3.2.1 Lazer Güneş Benzeteçi

Deneysel kurulumun normal şartlarda teorik modellemeye göre gerçekleştirilmesi gerekirken, teknik ve finansal sorunlar, tam donanımlı bir lazer optik laboratuvarına erişimin mümkün olamaması gibi nedenlerden mevcut ve temin edilebilen donanım ile gerçekleştirilebilmiştir. Deneyde şekil 3.24, 3.25, 3.26 da görüldüğü üzere:

- 395 nm 200 mW UV lazer
- 525 nm 100 mW yeşil lazer
- 650 nm 50 mW kırmızı lazer

Kaynakları optik kolimasyon lensleri kullanılmıştır.

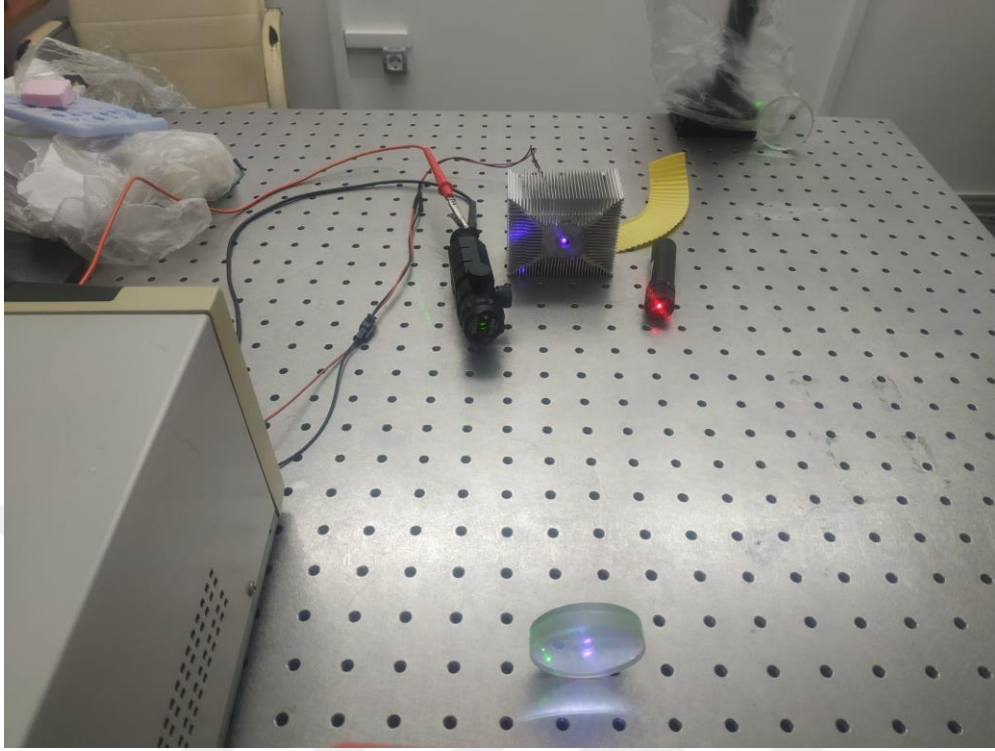
Kaynakların, üzerine düşen lazer güneş ışığının numune yüzeyinde sebep olduğu sıcaklık artışı şekil 3.27 de gösterilen a) Unit UT320D kablolu b) Class JT-380C IR sensörlü sıcaklık ölçerler vasıtasıyla takip edilmiştir.



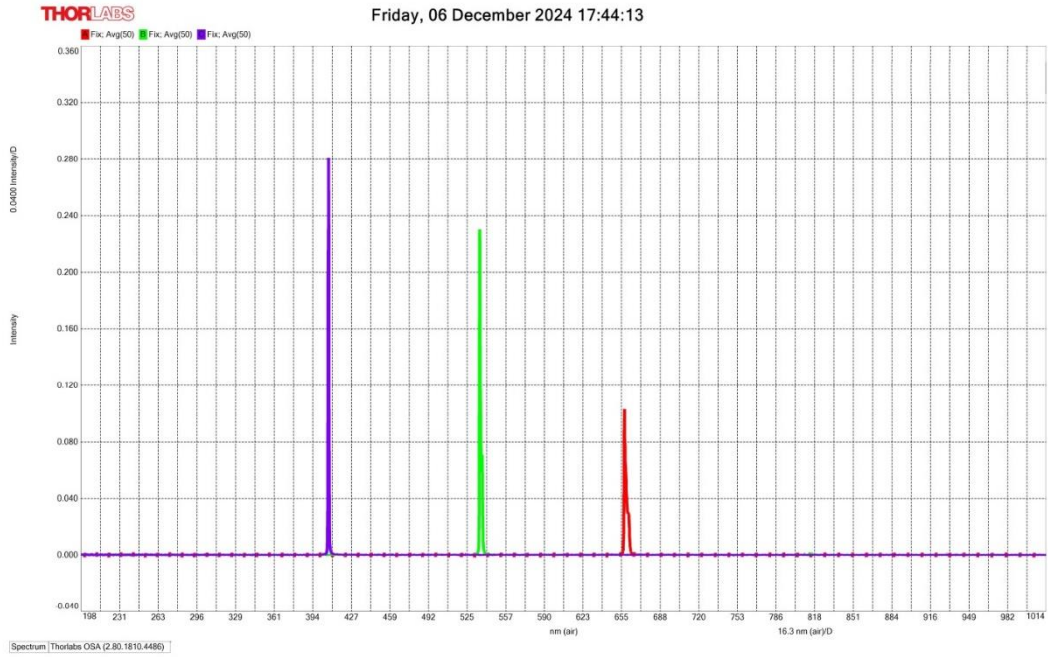
Şekil 3.25. Deneyde kullanılan lazer kaynaklar.

Sıcaklık takibindeki amaç lazer ışının yoğunluğundan ötürü numuneyi yakmadığından emin olmaktır. Ek 6 da KC ışıma esnasında ortam sıcaklığının en çok 65 C⁰ olduğu görülmektedir. Bu yüzden hem lazer hem de led projektörle yapılan yaşlandırma amaçlı pozlamalarda numune yüzey ısısının 65 C⁰ yi aşmadığından emin olunmuş, bu amaçla alüminyum soğutucular ve fanlar ile sıcaklık kontrolü sağlanmıştır.

Mevcut üç lazer kaynaktan gelen ışınlar kolimasyon lensine gönderilerek odak noktasında lazer güneş ışığı oluşumu sağlanmıştır (Şekil 3.25). 395 nm 200 mW UV lazer, 525 nm 100 mW yeşil lazer, 650 nm 50 mW kırmızı lazere ait tayf şekil 3.26 da gösterilmiştir. Üç lazer kaynağın ışını kolimasyon lensinin odağında lazer güneş ışığını oluşturmaktadır.



Şekil 3.26. Lazer kaynaklar kolimasyon lensine yönlendirilmiş durumda.



Şekil 3.27. 395 nm 200 mW UV lazer, 525 nm 100 mW yeşil lazer, 650 nm 50 mW lazer kaynakların tayfları



a)



b)

Şekil 3.28. Sıcaklık ölçerler a) Unit UT320D kablolu b) Class JT-380C IR sensörlü

Şekil 3.27 de gösterilen termometreler hem lazer kaynaklar hem de led projektör ile pozlama yapılırken kullanılmış ve numune ısıları kontrol altında tutulmuştur.



Şekil 3.29. Thorlabs CCS model spektrometre

Spektrometre ile kaynakların dalga boyları incelendiği gibi aynı zamanda lazer güneş ışığının numuneler üzerinde yaptığı yaşlandırma ve soldurma etkileri de gözlemlenmiştir.

3.2.2. Led Projektör İle Yaşlandırma:

Ayrıca 100 W led projektör kullanılarak da numuneler üzerinde pozlama yapılmıştır

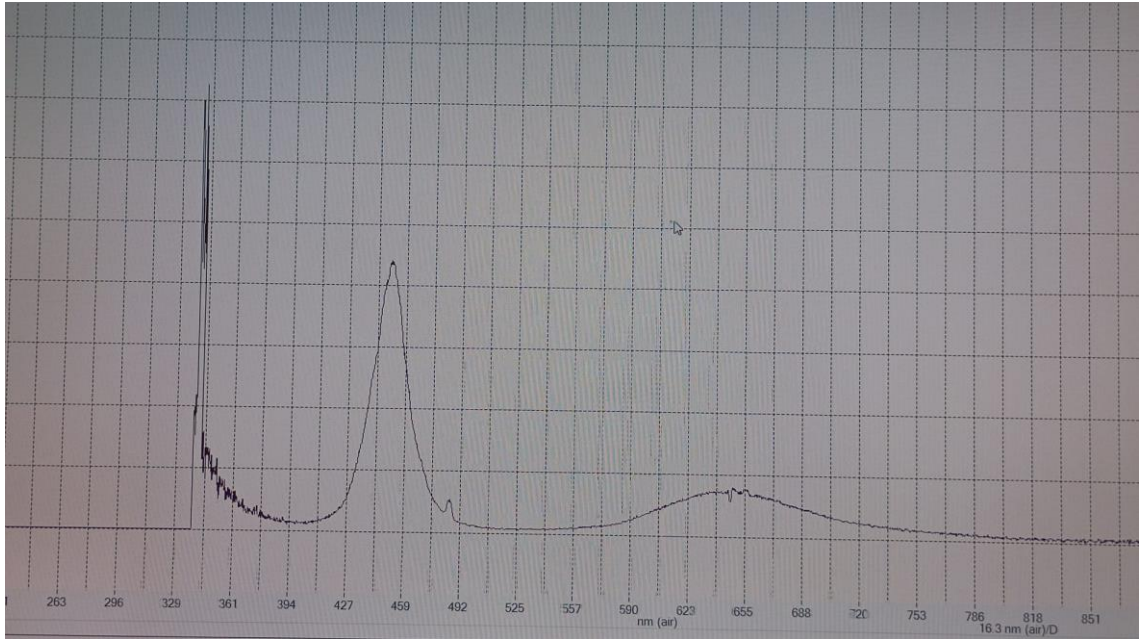


a)



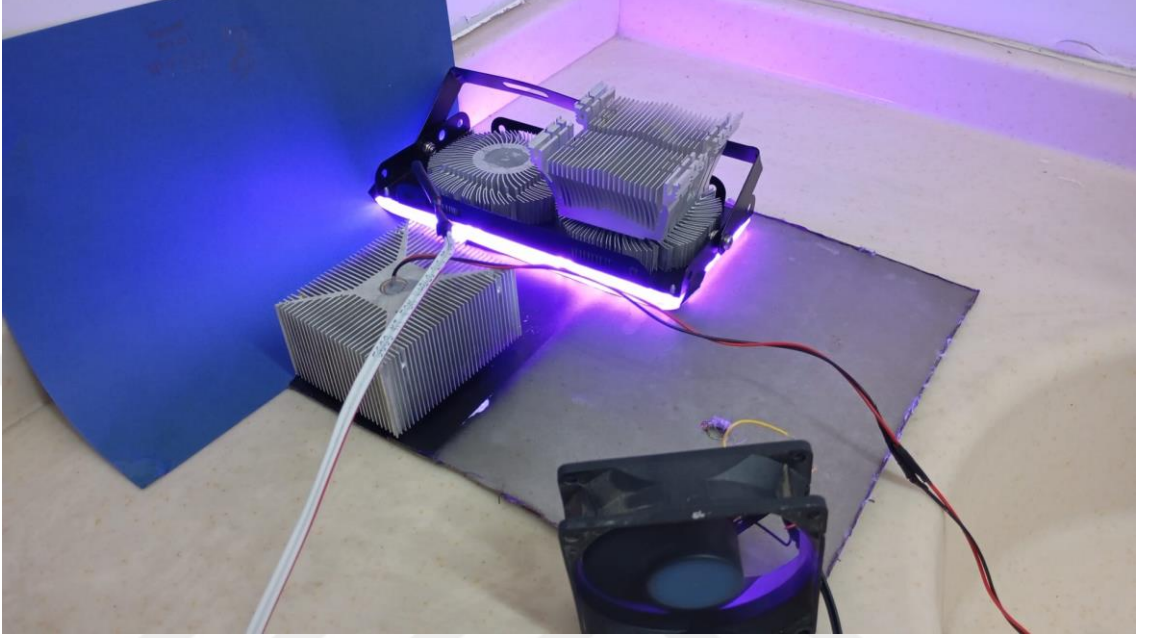
b)

Şekil 3.30. a)100 W led projektör b) led projektör soğutucular ile numune pozlamada



Şekil 3.31. 100W led projektöre ait tayf, 330 nm UV, 450 nm mavi ve 650 nm kırmızı emisyonlar görülmektedir.

Led projektörün tayfı incelendiğinde 450 ve 650 nm nin dışında 330 nm UVA bandında da ışıma yaptığı görülmektedir. Bu durumda numuneler üzerinde yaşlandırma etkisi yapmasını beklemek yanlış olmayacaktır. Bu yüzden led projektör ile de kırmızı ve mavi mukavva ve mat siyah yağlı boyayla boyanmış paslanmaz çelik sac numuneler üzerinde de pozlamalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.32. solda lazer, sağda ise led projektörle numune üzerinde yaşlandırma pozlaması, yüzey sıcaklığı ölçülmekte ve soğutma kontrolü soğutucular ve fanla sağlanmaktadır.

4. BULGULAR

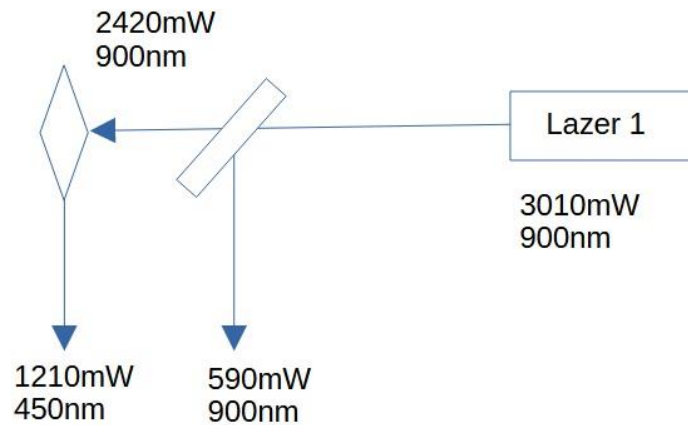
4.1. TEORİK BULGULAR:

4.1.1 Yeryüzü Lazer Güneş Benzeteçi Tasarımına Ait Bulgular

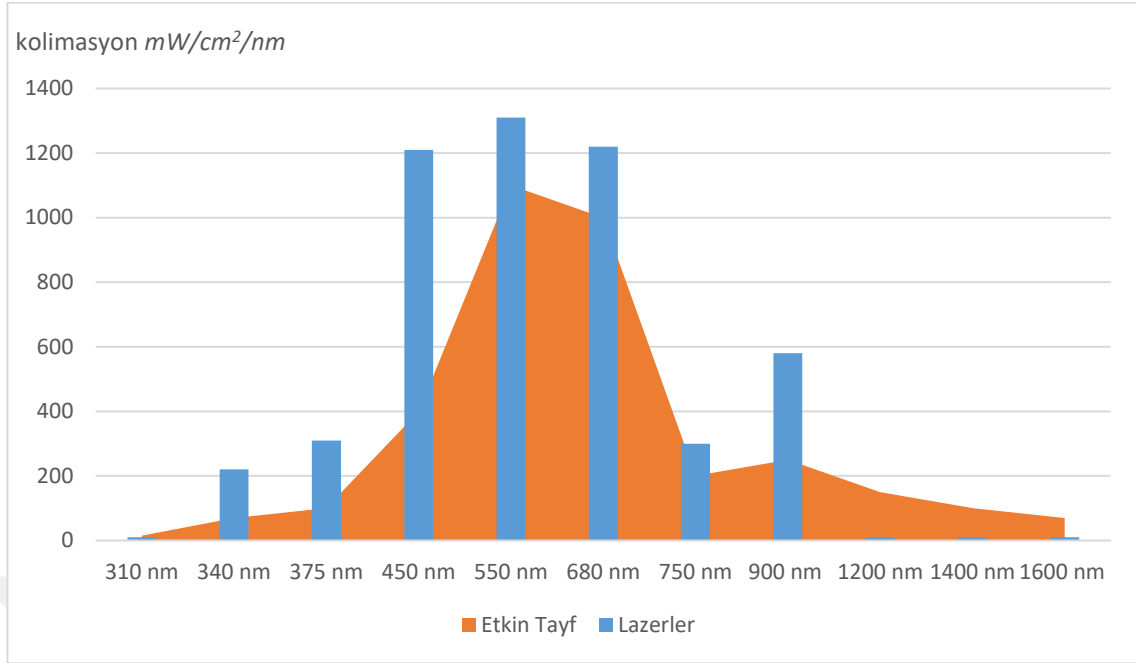
Çizelge 4.1 Yeryüzü lazer güneş benzeteçi ölçüm noktalarındaki değerler

	1. Nokta (mW)	2. Nokta (mW)	3. Nokta (mW)	4. Nokta (mW-nm)
Lazer 1 900 nm	3010	590	2420	1210-450
Lazer 2 750 nm	920	303	620	310-375
Lazer 3 680 nm	1660	1222	440	221-340
Lazer 4 550 nm	1310	1310		
LED 310 nm	32			
Toplam Şiddeti	6932			

Çizelge 4.1 de yeryüzü lazer güneş benzeteçi ölçüm noktalarındaki değerler gösterilmiştir. Bu değerlere nasıl ulaşıldığını göstermek adına lazer 1 ait çizgi incelenebilir: Lazer 1 de tek SHG kullanıldığından Şekil 3.10 da belirtilen noktalara ve Çizelge 3.3 deki tayf aralıklarına ve Şekil 4.1 gösterilen tayfa göre ölçümleme yapılmıştır. Buna göre lazer 1 900 nm dalga boyunda olup orantıyla hesaplanan tayfin 800-1100 nm aralığında IR ışıma yapmaktadır. Bu lazerin hattında yer alan 4. noktanın 400-500 nm aralığı için 450nm ışımayı sağladığı ve çizelge 3.3 e göre şiddetinin 1210 mW/cm^2 olması gerektiğinden 4. nokta ölçüm değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.1 Lazer 1 hattı ölçüm değerleri



Şekil 4.2. Yeryüzü lazer güneş benzeteçi tayfı

SHG kristallerinde verimlilik %50 olarak modellendiğinden bu şartlarda 3. Noktadaki ışının şiddeti 2420 mW/cm^2 ve dalga boyu 900 nm olarak ölçülecektir. Diğer taraftan Çizelge 3.3 de gösterilen 800-1100 nm aralığına ve Şekil 4.1 deki tayfa bakıldığında 52 güneş için gereken şiddet 800-900 nm ve 900-110 nm aralıklarının toplamı yani $267+323=590 \text{ nm}$ olarak 2. ölçüm noktasında bulunmalıdır. 2. ve 3. Noktalardaki ölçümler ışın bölücü ile bölündüğünden bu durumda Lazer 1 in çıkış gücünün bunları toplamı olan 3010 mW/cm^2 olması ve ayrıca ışın bölücü elemanında %20 yansıtıcı olması gerektiği sonucu ortaya konur.

Tasarımın parçası olan tüm lazerler için aynı mantıktan hareketle SHG değerlerinden başlanıp tümünden gelim uygulanarak lazer kaynakların şiddetleri hesaplanarak Çizelge 4.1 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.2 de tayf oran uyumu değerlerin bakıldığında, standartta belirtilen bütün aralıklarda $0.875 \leq R_{SM} \leq 1.125$ değerleri alınabiliyorsa benzeteç oran kriterleri açısından A+ sınıfında, $0.75 \leq R_{SM} \leq 1.25$ değerleri alınabiliyorsa benzeteç A sınıfında yer almaktadır.

Çizelge 2.3'de PV güneş paneli benzeteçleri için diğer kalite kontrol değerleri de görülmekte olup yeryüzü lazer güneş benzeteçi tayfsal sapmada sınıflandırma dışı olarak U sınıfında, tayf oran uyumunda ise A+ sınıfında yer almıştır.

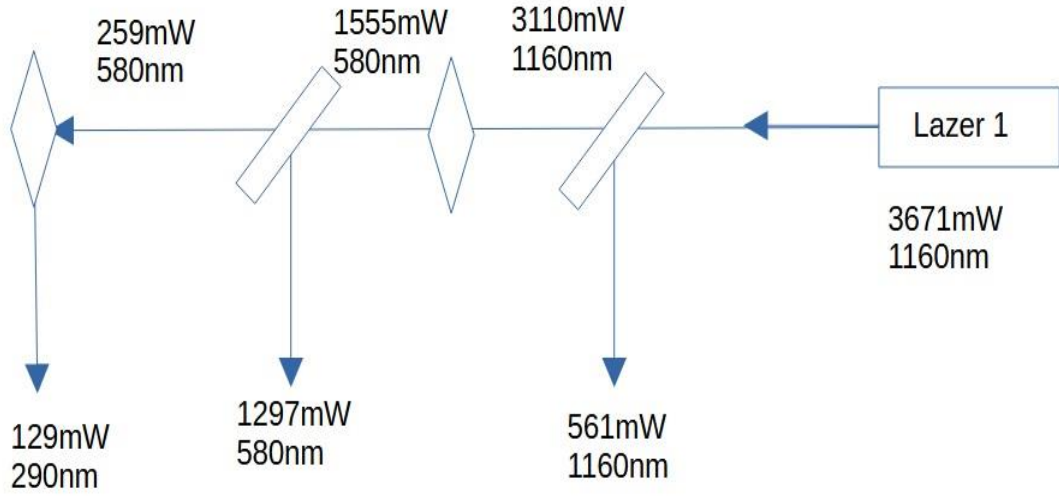
Ayrıca Çizelge 4.1 de lazer kaynaklara ait toplam güç 6931 mW değerindedir. Diyot Lazer Kaynakların enerji tüketim verimlilikleri %40-%60 arasında değişmektedir. (Sulc J. 2013). **Bu değeri en düşük % 40 verim olarak alındığında kaynakların 17327 mW yani $17,32 \text{ W}$ tüketimi olduğu görülür.**

Çizelge 4.2. Yeryüzü lazer güneş benzeteçi kalite kontrol değerleri

Tayf Aralığı (nm)	Lazer 20 nm çizgi genişliğinin tayfsal kapsama oranı %	Tayfsal Sapma SPD %	Tayf Oran Uyumu R_{SM}
300-320	100	0	0.9-1,1
320-360	50	1,25	0.93-1,07
360-400	50	1,25	0.93-1,07
400-500	20	10	0.93-1,07
500-600	20	10	0.96-1,04
600-700	20	10	0.93-1,07
700-800	20	10	0.93-1,07
800-900	10	11,25	0.89-1,11
900-1100	5	23,75	0.96-1,04
Toplam		77,5	
Sınıfı		U	A+

4.1.2 Uydu İrtifası Lazer Güneş Benzeteçi Tasarımına Ait Bulgular

Çizelge 4.3 e ait bulgular Çizelge 4.1'in oluşturulmasında kullanılan SHG değerlerinden başlanarak adım adım kaynağa doğru sırasıyla hesaplanarak oluşturulmuştur. Çizelge 4.3 deki değerlerin nasıl belirlendiği göstermek amacıyla lazer 1 hattı incelenebilir (Şekil 4.2). Lazer 1 hattının en son noktasın 290 nm SHG çıkışı Çizelge 3.4'e göre 129 mW olacaktır. Bunun için %50 verimli SHG kristali girişine 258 mW ve 580 nm ışın ulaşmalıdır. Çizelge 3.4 e göre 500-600 nm aralığında 1297 mW şiddetinde ışın olması gerektiğinden $1297+258=1555$ mW gücündeki ışın 2. SHG kristali girişinde ve 500 ki bu 4. noktanın ölçüm değerlerini verecek ve ışın bölücünün %83 lük bir yansıtma oranına sahip olduğunu ortaya koyacaktır. 2. SHG kristali çıkışında 1555 mW olduğuna göre girişinde 3110 mW şiddetinde ve 1160 nm dalga boyunda bir ışın bulunacaktır. Çizelge 3.4 te 1100-1400 nm aralığında 561 mW ışın şiddeti bulunması gerektiğinde lazer 1 in hemen önünde bulunması gereken ışın bölücü %15 lik yansıtma özelliğinde olup girişinde yani lazer 1 çıkışında $3110-561=2549$ mW şiddetinde ışıma olacaktır.

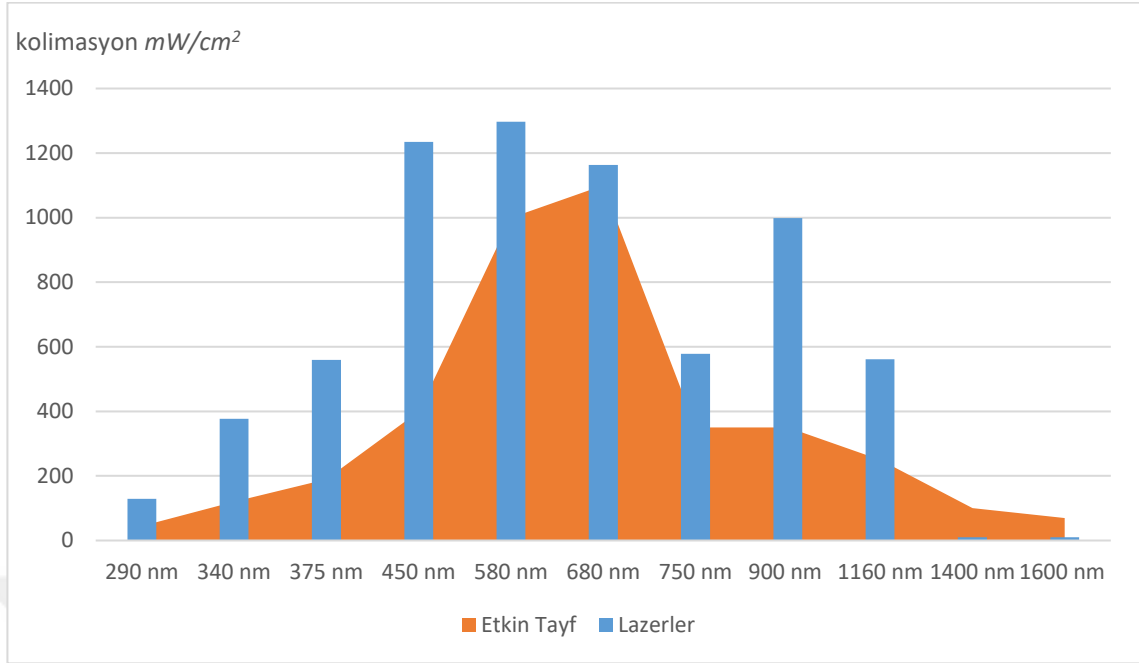


Şekil 4.3 Uydu seviyesi güneş benzeteçi lazer 1 hattı ölçümleri.

Benzer şekilde lazer 2, 900nm ve 3669 mW, SHG çıkışı 450 nm 1235 mW, lazer 3, 750 nm 1696 mW, SHG çıkışı 375 nm 559 mW, lazer 4, 680 nm 1917 mW, SHG çıkışı ise 340 nm ve 377 mW olacaktır. (Çizelge 4.3)

Çizelge 4.3 Uydu irtifası lazer güneş benzeteçi ölçüm noktalarındaki değerler

	1.Nokta (mW)	2.Nokta (mW)	3.Nokta (mW)	4.Nokta (mW-nm)	5.Nokta (mW-nm)	7.Nokta (mW-nm)
Lazer 1 1160 nm	3671	561	3110	1555-580	1297-580	129-290
Lazer 2 900 nm	3669	1199	2470	1235-450		
Lazer 3 750 nm	1696	578	1118	559-375		
Lazer 4 680 nm	1917	1163	754	377-340		
Toplam Şiddeti	11226					



Şekil 4.4. Uydu irtifası lazer güneş benzeteci tayfı

Çizelge 4.4 de Uydu irtifası lazer güneş benzeteci kalite kontrol değerleri görülmektedir. Bu değerler Çizelge 2.3 de gösterilen benzeteci sınıflandırma kriterlerine göre Tayfsal Sapmada U yani sınıflandırma dışı ve iken tayf oran uyumunda A olarak görülmektedir.

Tayf oran uyumunda 200-320 nm bandında %13 lük bir tolerans modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,87-1,13 aralığında bulunacağından ve bu değer A+ sınırlandırma sınırı dışında kaldığından bu band için değer A sınıfı olarak kabul edilmiştir.

320-360 nm bandında %7 lik bir tolerans modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,93-1,07 aralığında bulunacağından bu değer A+ sınıfıdır.

360-400 nm bandında %7 lik bir tolerans modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,93-1,07 aralığında bulunacağından bu değer A+ sınıfıdır.

400-500 nm bandında %7 lik bir tolerans modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,93-1,07 aralığında bulunacağından ve bu değer A+ sınıfıdır.

500-600 nm bandında %7 lik bir tolerans modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,93-1,07 aralığında bulunacağından ve bu değer A+ sınıfıdır.

600-700 nm bandında %3 lik bir tolerans modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,97-1,03 aralığında bulunacağından ve bu değer A+ sınıfıdır.

700-800 nm bandında %3 lük bir tolerans ile modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,97-1,03 aralığında bulunacağından ve bu değer A+ sınıfıdır.

800-900 nm bandında %7 lik bir tolerans ile modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,93-1,07 aralığında bulunacağından ve bu değer A+ sınıfıdır.

900-1100 nm bandında %7 lik bir tolerans ile modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,93-1,07 aralığında bulunacağından ve bu değer A+ sınıfıdır.

1100-1400 nm bandında %3 lik bir tolerans ile modellendiğinden bu banda karşılık gelen ışıma değerleri 0,97-1,03 aralığında bulunacağından ve bu değer A+ sınıfıdır.

Çizelge 4.4. Uydu irtifası lazer güneş benzeteçi kalite kontrol değerleri

Tayf Aralığı (nm)	Lazer 20 nm çizgi genişliğinin tayfsal kapsama oranı %	Tayfsal Sapma <i>SPD</i>	Tayf Oran Uyumu <i>R_{SM}</i>
200-320	16.6	8,34	0,89-1,11
320-360	50	1,65	0,93-1,07
360-400	50	1,65	0,93-1,07
400-500	20	6,64	0,93-1,07
500-600	20	6,64	0,93-1,07
600-700	20	6,64	0,97-1,03
700-800	20	6,64	0,97-1,03
800-900	10	6,64	0,93-1,07
900-1100	5	15,77	0,93-1,07
1100-1400	0	25	0,97-1,03
Toplam		85,61	
Sınıfı		U	A+

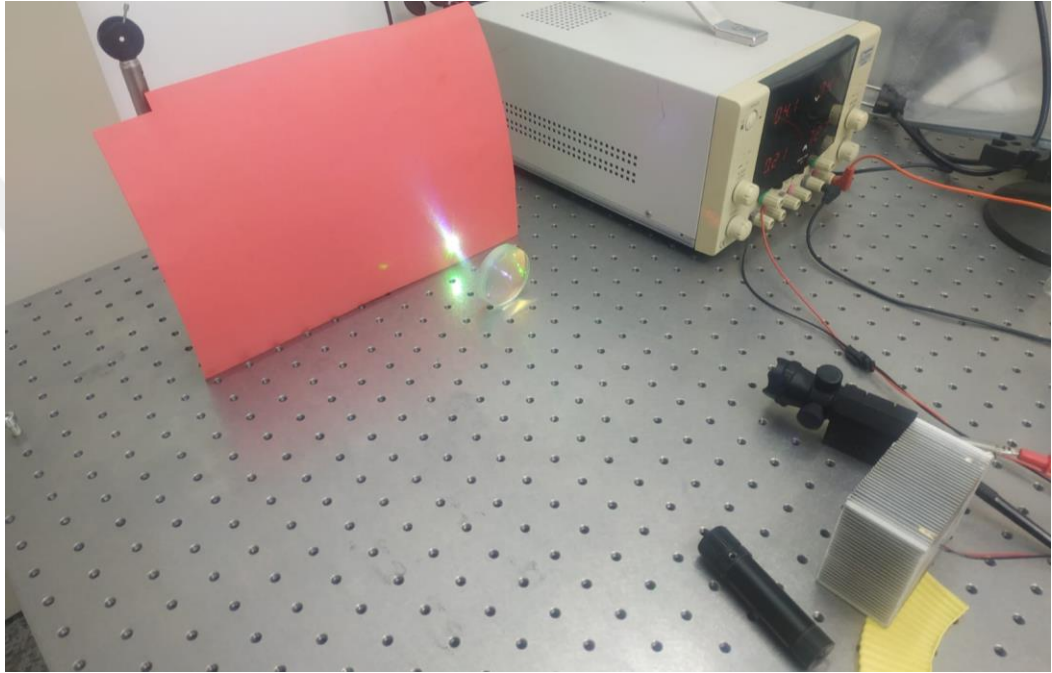
Çizelge 4.3 de lazer kaynaklarca tüketilen toplam güç 11226 mW değerindedir. Diyot Lazer Kaynakların enerji tüketim verimlilikleri %40-%60 arasında değişmektedir. (Sulc J. 2013). **Bu değeri en düşük % 40 verim olarak alındığında kaynakların 44904 mW yani 44,90 W tüketimi olduğu görülür.**

4.2 DENEYSEL BULGULAR:

4.2.1 Teorik Modellemeden Pratik Uygulamaya Lazer Güneş Işığ:

Lazer güneş benzetiminin mevcut ekipmanlarla deneysel kurulumu ve lazer güneş ışığının numune üzerinde oluşumu şekil 4.5'te görülmektedir.

Bu deneyde kullanılan lazer kaynakları, farklı dalga boylarına sahip üç farklı lazerden oluşmaktadır:



Şekil 4.5. Lazer güneş ışığı

Bir lazer güneş benzeticisi tasarlarken, ilk olarak güneş ışığının spektral dağılımını anlamak önemlidir. Gerçek güneş ışığı, 300 nm ile 2500 nm arasında geniş bir spektral aralığa yayılmaktadır. Bu spektrum, UV (ultraviyole), görünür ışık ve kızıl ötesi (IR) ışığın bir kombinasyonu ile karakterize edilir. Lazerler, belirli dalga boylarında ışık yayarak, bu spektral dağılımı taklit edebilme potansiyeline sahiptir. Fakat deneysel kurulumların gerçekleştirilmesi esnasında karşılaşılan teknik ve finansal sorunlar, her zaman teorik modellerin tam olarak uygulanmasının önünde bir engel oluşturmaktadır.

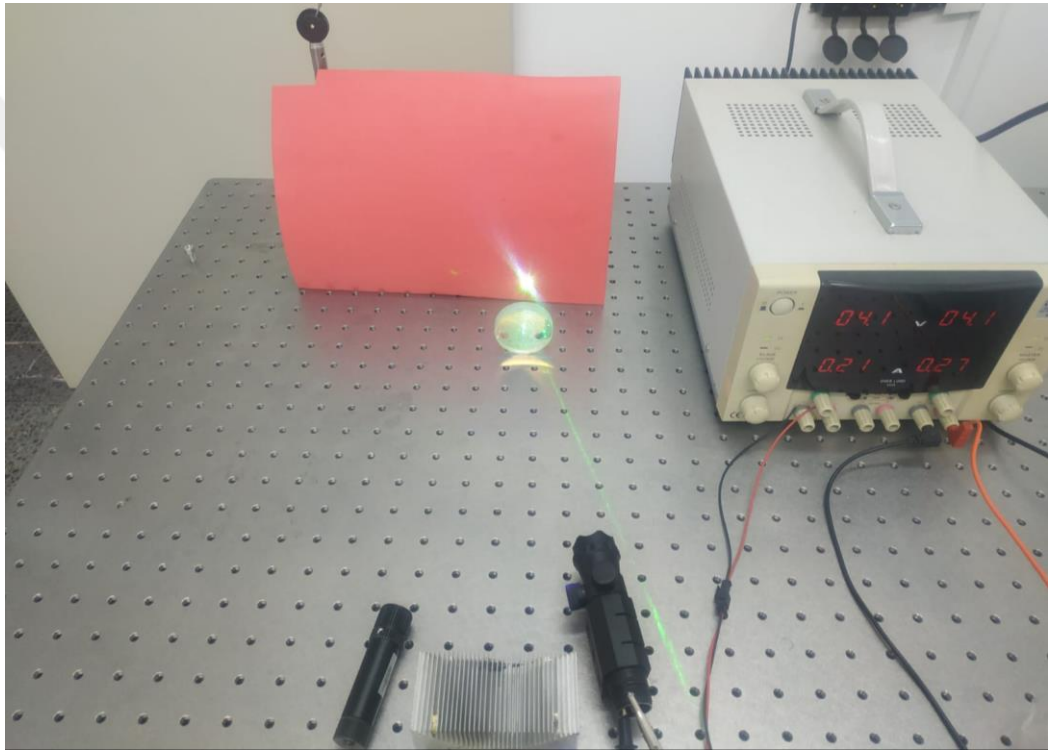
Deneyin gerçekleştirilmesi sırasında, 395 nm, 525 nm ve 650 nm dalga boyunda üç adet lazer kaynağı kullanılmıştır. Bu lazer kaynaklarının özellikleri ve deneydeki rolleri şunlardır:

- 395 nm, 200 mW UV Lazer: Bu lazer, güneş ışığının UV bileşenini simüle etmek için kullanılır. Her türlü materyali yaşlandırmanın yanı sıra canlı organizmalar üzerindeki etkileri ve çeşitli kimyasal reaksiyonlardaki rolü göz önüne alındığında, UV dalga boyunun önemi büyüktür.

- 525 nm, 100 mW Yeşil Lazer: Görünür ışığın orta dalga boyu olan yeşil ışık, fotosentez süreçlerinde önemli bir rol oynar. Bu nedenle, lazer güneş benzeticisi içerisinde yeşil lazerin varlığı, yaşlandırma etkilerinin yanısıra bitkilerin ışığa olan tepkilerini incelemek açısından da kritik bir unsurdur.

- 650 nm, 50 mW Kırmızı Lazer: Kırmızı ışığın, soldurma dışında bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki etkileri iyi bilinmektedir. Kırmızı dalga boyunda lazerin kullanılması, özellikle fotosentez süreçleri üzerindeki etkileri araştırmak için oldukça faydalıdır.

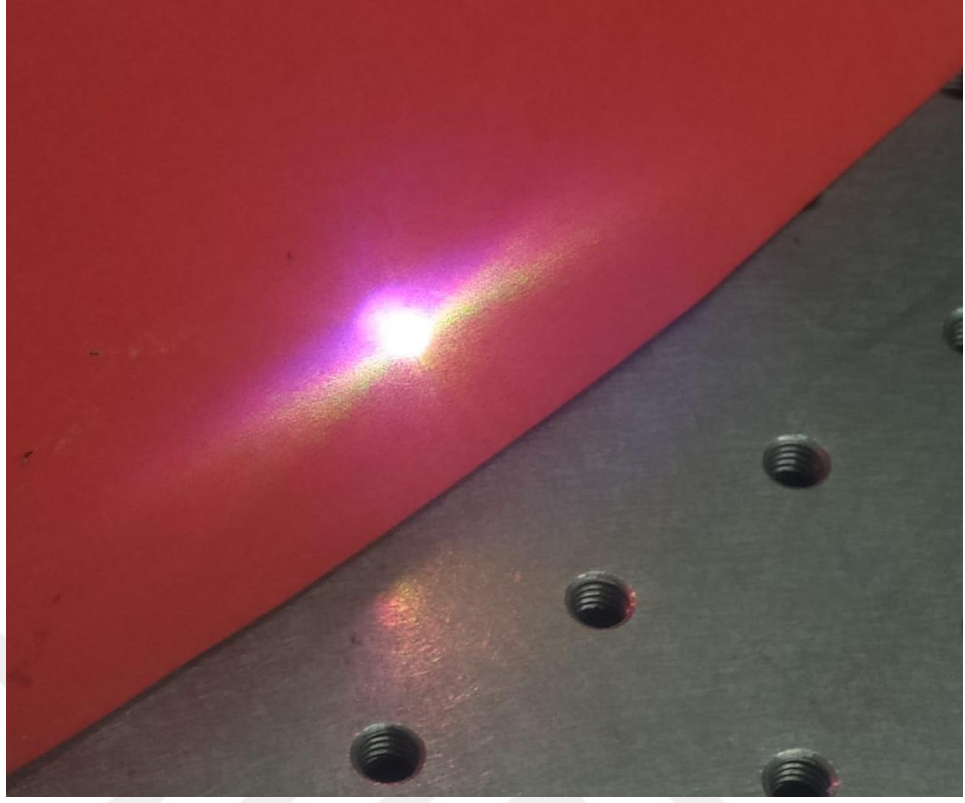
Deneyin kurulumunda kullanılan optik kolimasyon lensleri, lazerlerden gelen ışınların düzgün bir şekilde odaklanmasını sağlar. Kolimasyon lensi, çeşitli dalga boylarındaki lazer ışınlarını birleştirerek, odak noktasında yoğunlaşmış bir lazer güneş ışığı oluşumunu mümkün kılar.



Şekil 4.6. Lazer güneş ışığı ve kontrol birimleri

Teorik olarak modellenen yeryüzü ve uydu irtifası lazer güneş benzeticileri tam için kurulması gereken deneysel düzenek tam donanımlı bir lazer optik laboratuvarında gerçekleştirilebilecekken lazer güneş benzetici mevcut donanım kullanılarak başarıyla hayata geçirilmiştir. Ancak, teknik ve finansal zorluklar, bazı unsurların eksik kalmasına neden olmuştur. Örneğin, daha fazla dalga boyu eklemek için gerekli olan lazer kaynaklarının, SHG kristallerinin bulunamaması, modellemelerin tam olarak deneye aktarılmasının önünde bir engel oluşturmuştur.

Sonuç olarak, lazer güneş benzeticisi deneyinin gerçekleştirilmesi, lazer teknolojisinin potansiyelini göstermekle birlikte, bilimsel araştırmalara dair önemli veriler sunma potansiyeline sahiptir. Böylece numunelerin yaşlandırılması çalışmaları gerçekleştirilmiş, elde edilen bulgular sunulmuştur:



Şekil 4.7. Lazer güneş ışığı yakın görünümü



Şekil 4.8. Mavi ve kırmızı mukavvalarla yapılan yaşlandırma çalışmaları



Şekil 4.9. Solda lazer güneş ışığı, sağda led projektörle yapılan yaşlandırmalar. Lazer 30 dakika led projektör ise 24 saat boyunca pozlanmıştır.



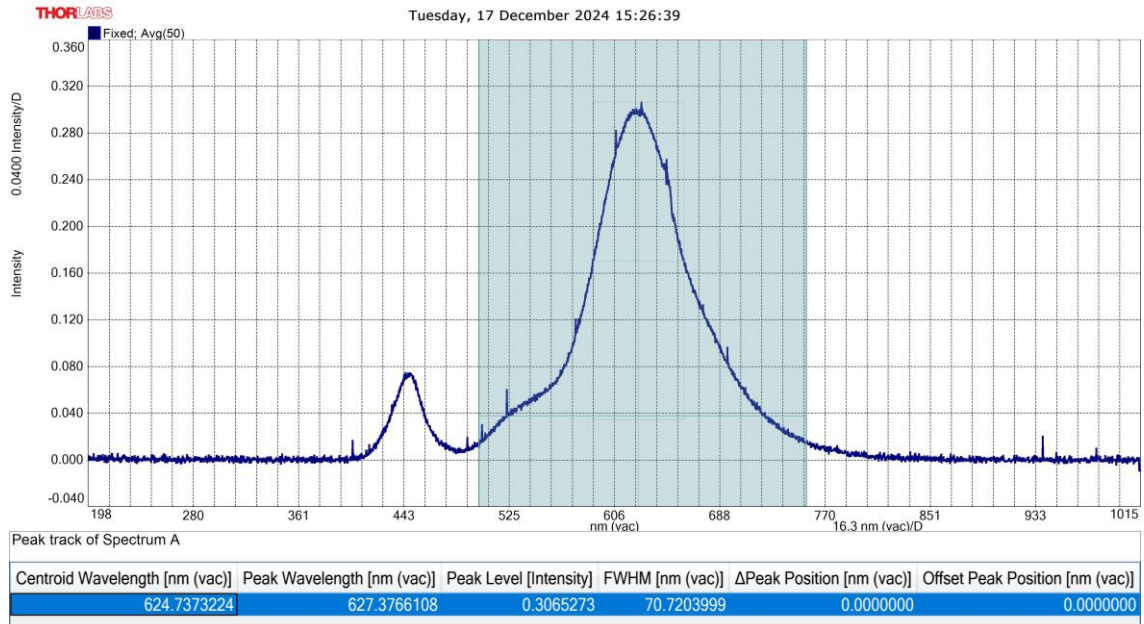
Şekil 4.10. Thorlabs CCS model spektrometre, esnek fiber sensör aparatıyla lazer benzeteçle yaşlandırılan numunenin incelenmesi.

Bu ölçümler yapılırken spektrometreye ait esnek fiber optik kabloya bağlı hat, hem pozlanmış hem de pozlanmamış bölgelere ait spektrum beyaz floresan altında alınarak kaydedilmiştir

4.2.1.1 Lazer Güneş Benzeteçi Kırmızı Mukavva Numune Testleri İnceleme:



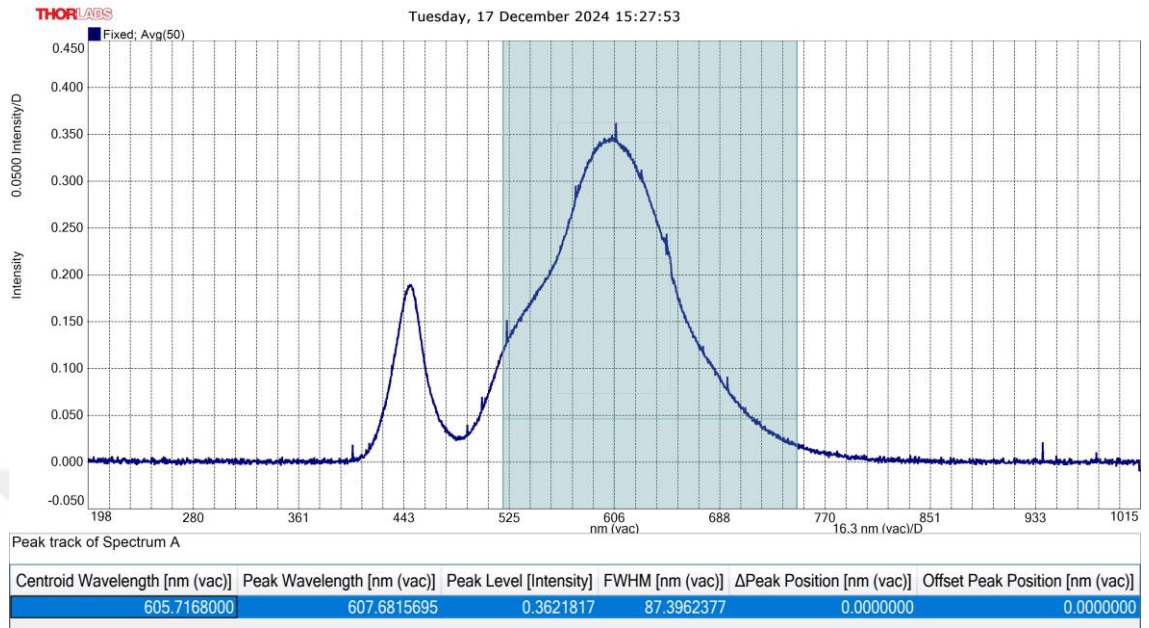
Şekil 4.11. 30 dakika boyunca lazer güneş ışığı uygulanan kırmızı mukavvada oluşan solma



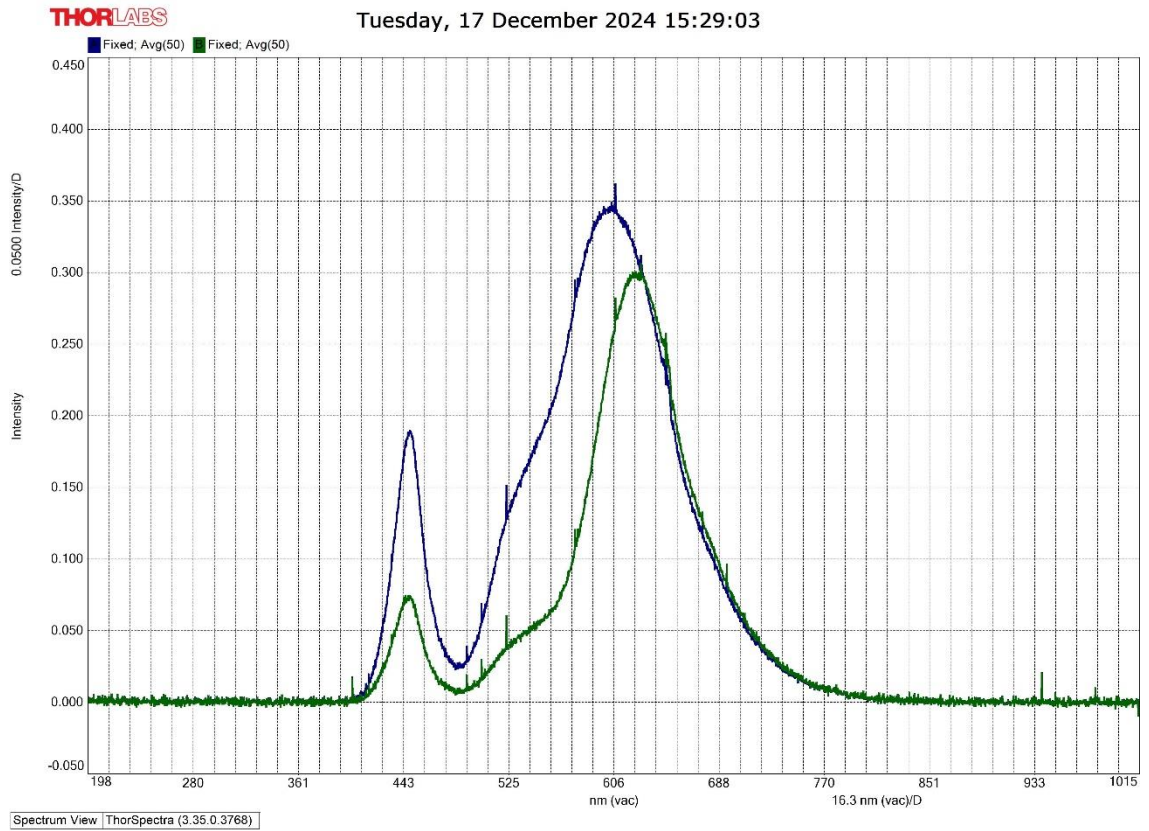
Şekil 4.12. Pozlanmamış kırmızı mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfı

Pozlanmamış ve 30 dakika boyunca lazer benzeteçle pozlanmış alanlara ait beyaz floresan lamba altındaki spektrometre tayfları şekil 4.12 ve 4.13 de görülmektedir.

Pozlanmamış tayf 624,7 nm merkezliyken pozlanmış tayf 605nm merkezli olup tayfin yaklaşık 20nm kaydı olduğu ölçülmektedir.

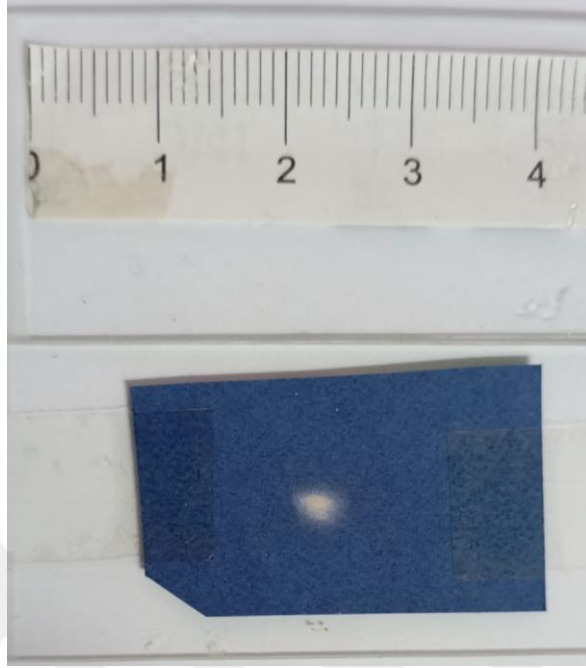


Şekil 4.13. Pozlanmış kırmızı mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfi

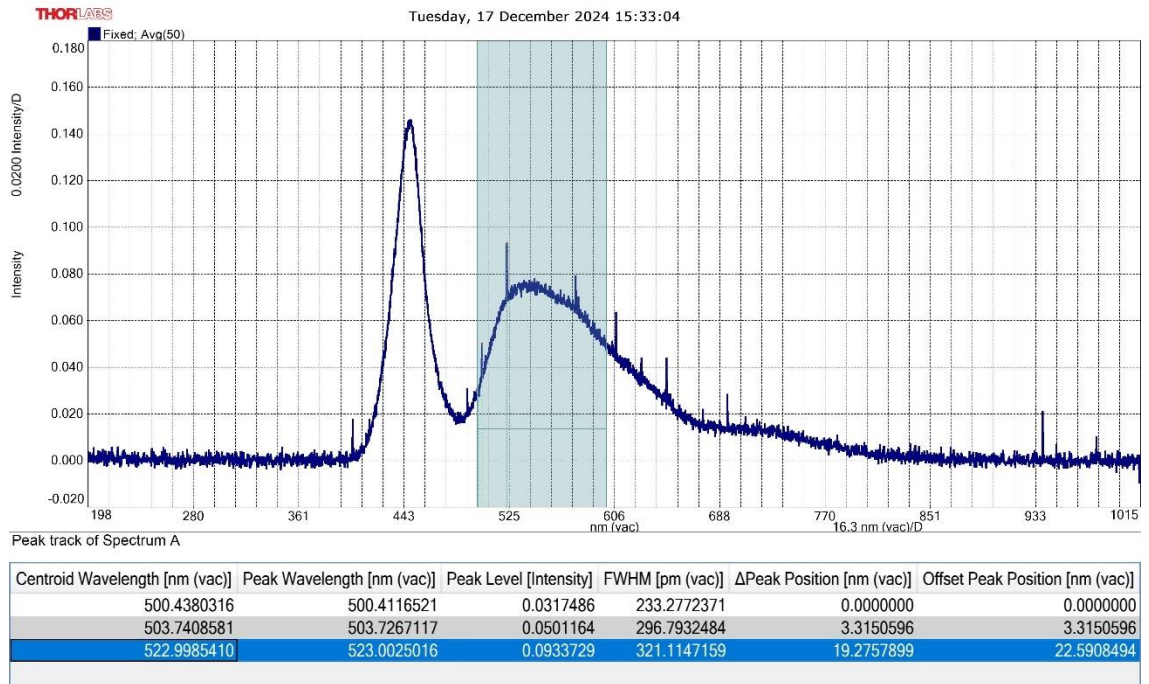


Şekil 4.14. Pozlanmış ve pozlanmamış kırmızı mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfi birlikte görülmektedir.

4.2.1.2 Lazer Güneş Benzeteçi Mavi Mukavva Numune Testleri İnceleme:

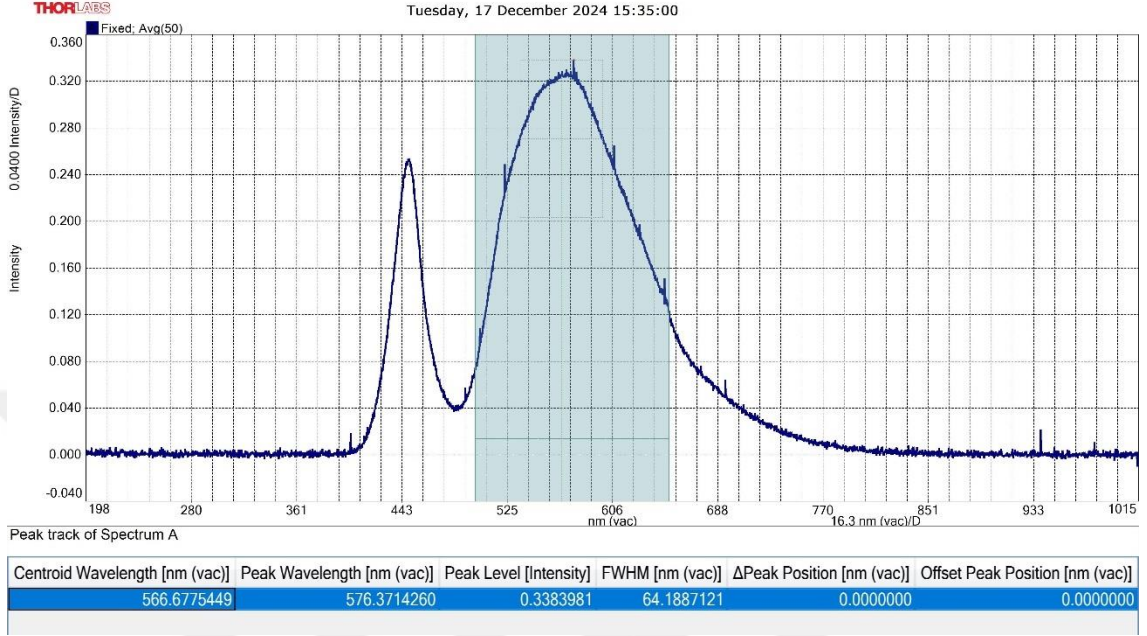


Şekil 4.15. 30 dakika boyunca lazer güneş ışığı uygulanan mavi mukavvadaki solma

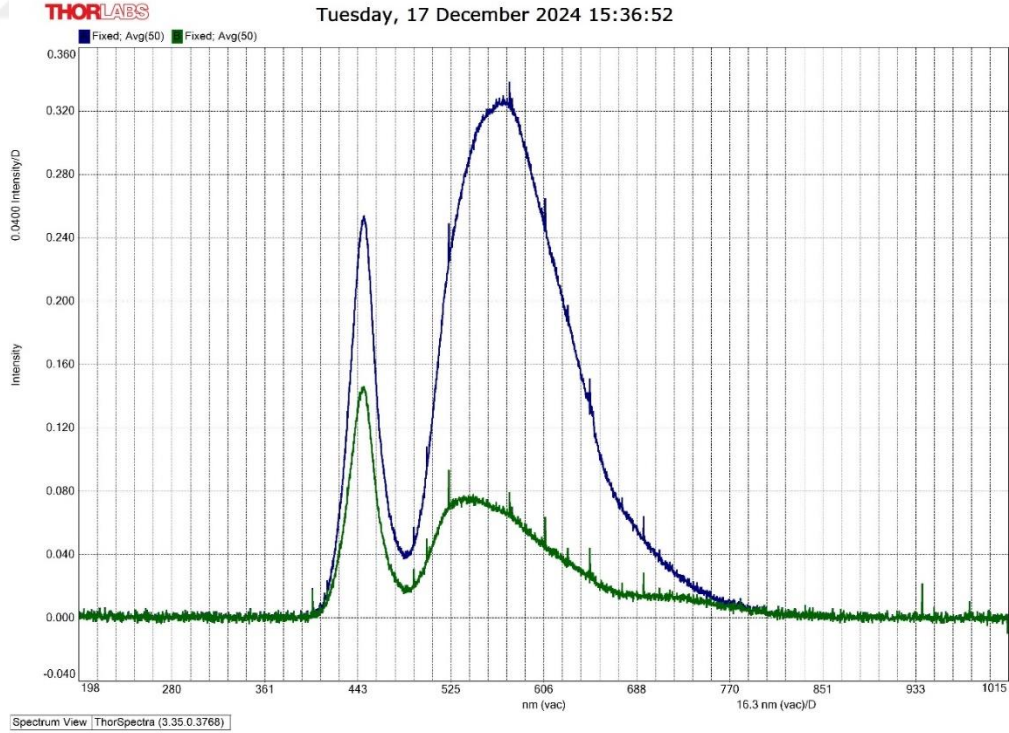


Şekil 4.16. Pozlanmamış mavi mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfı

Pozlanmamış ve 30 dakika boyunca lazer benzeteçle pozlanmış alanlara ait beyaz floresan lamba altındaki spektrometre tayfları şekil 4.16 ve 4.17 de görülmektedir. Pozlanmamış tayf 522 nm merkezliyen pozlanmış tayf 566 nm merkezli olup tayfın 44 nm kaydıği ölçülmektedir.



Şekil 4.17. Pozlanmış mavi mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfı

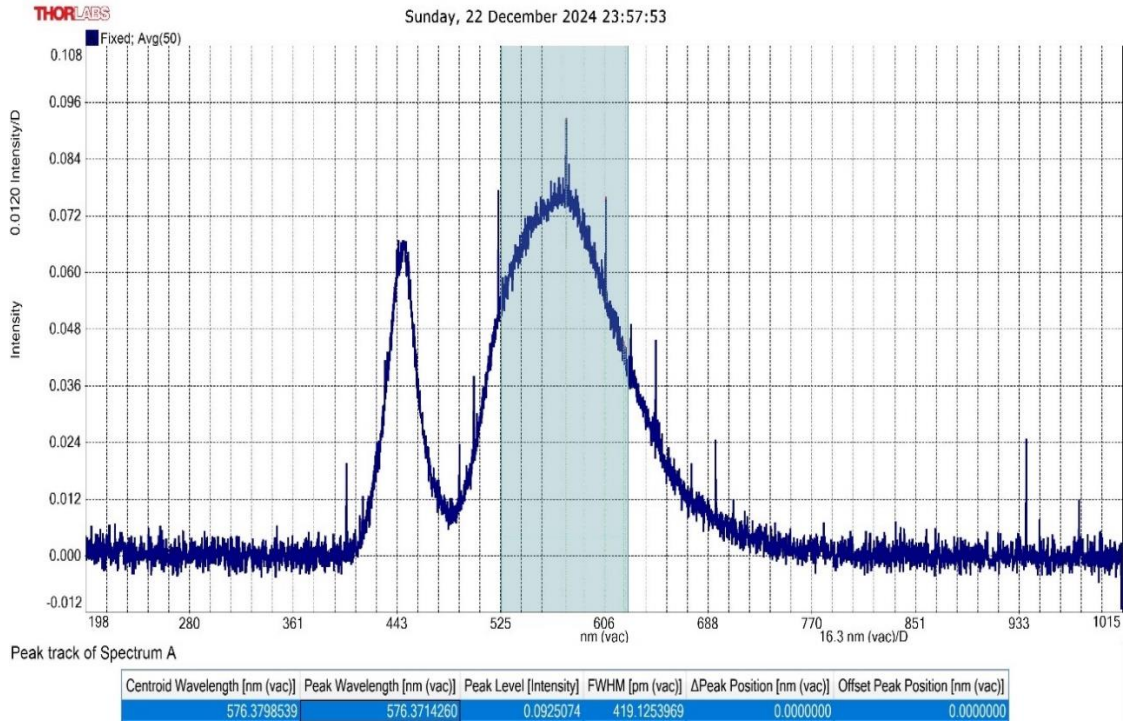


Şekil 4.18. Pozlanmış ve pozlanmamış mavi mukavvanın beyaz floresan altındaki tayfı birlikte görülmektedir.

4.2.1.3. Lazer Güneş Benzeteçi Galvanizli Sac üzerinde Sprey Boya Numune Testleri

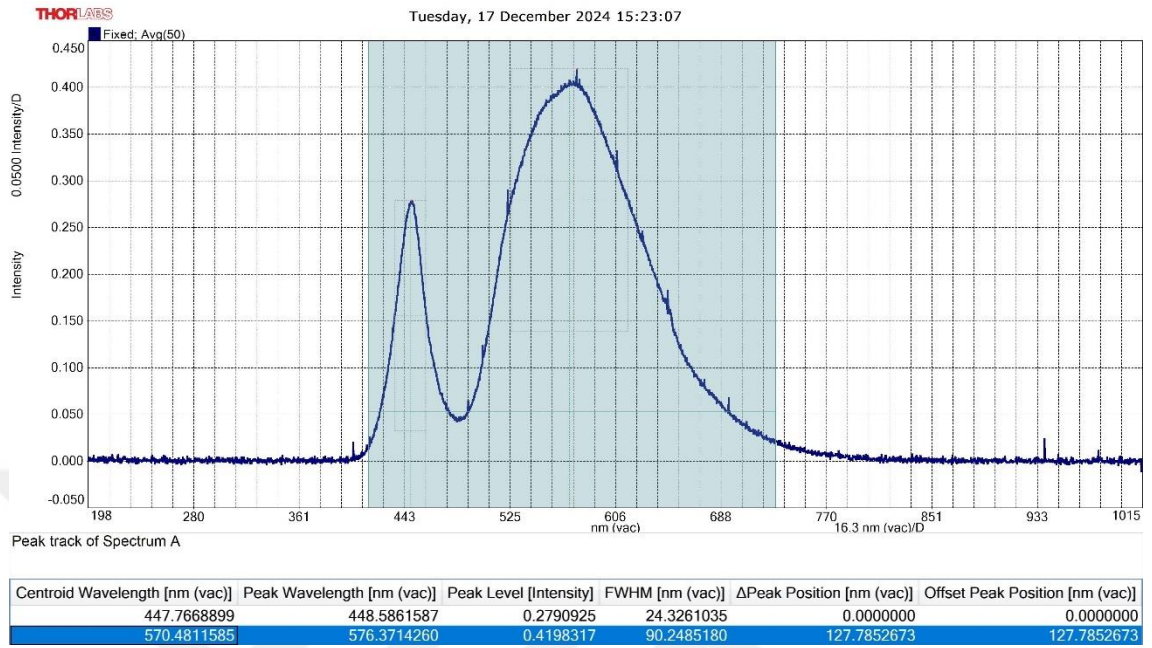


Şekil 4.19. 24 saat boyunca lazer güneş ışığı uygulanan siyah boyalı sacdaki yaşlanma

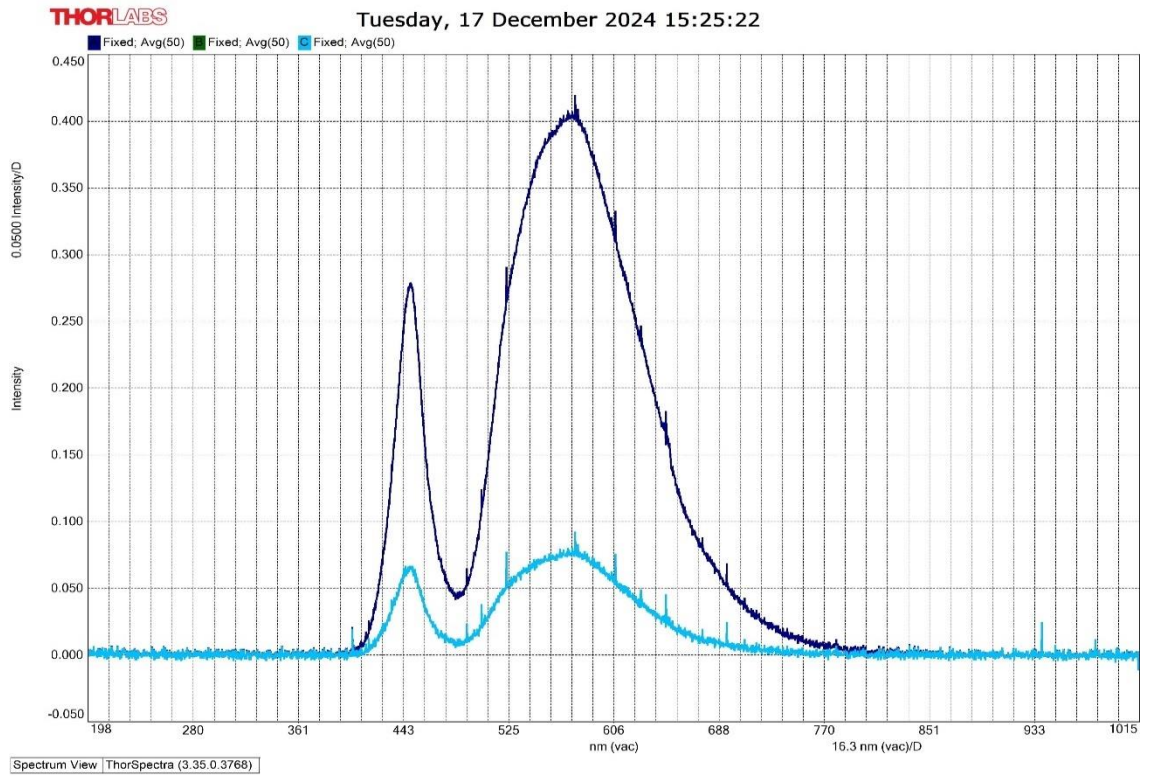


Şekil 4.20. Pozlanmamış siyah boyalı galvanizli sacın beyaz floresan altındaki tayfı

Öncelikle galvanizli sac yüze mat siyah sprej boyanın yüzeye iyice tutunabilmesi için temizleyici solventler kullanılarak temizlenmiştir.



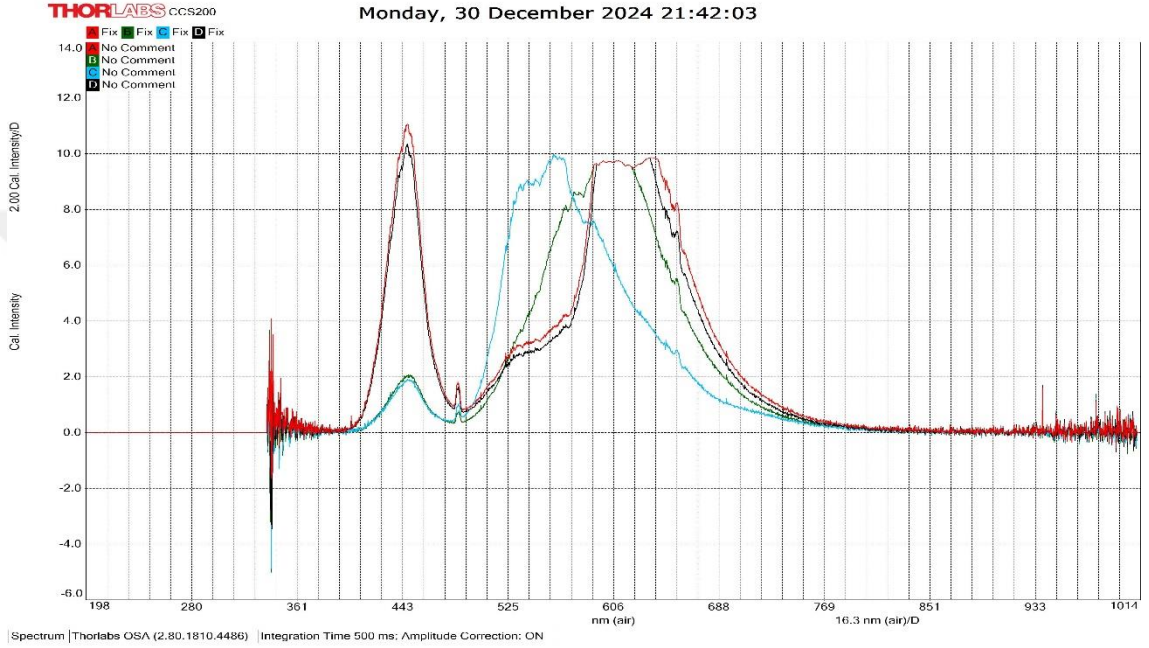
Şekil 4.21. Pozlanmış siyah boyalı galvanizli sacın beyaz floresan altındaki tayfı



Şekil 4.22. Pozlanmış ve pozlanmamış mat siyah boyalı numunenin beyaz floresan altındaki tayfları birlikte görülmektedir.

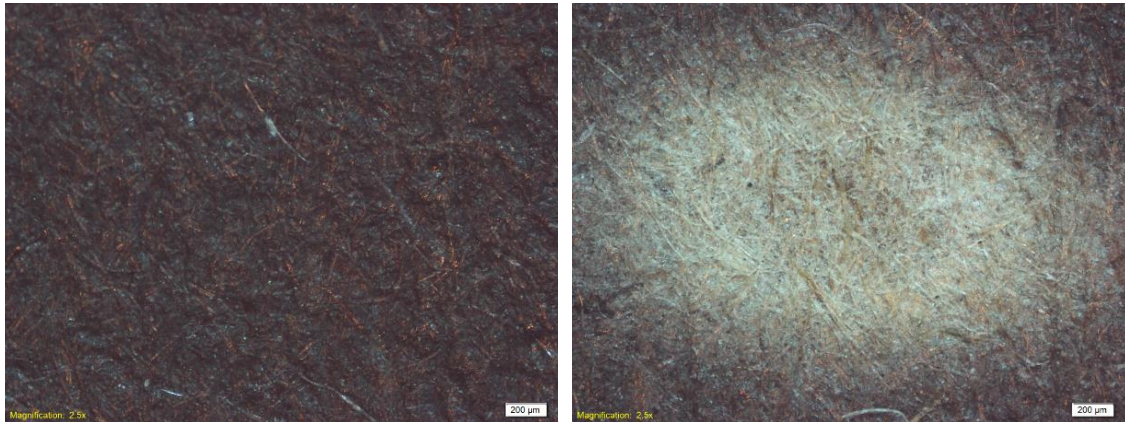
Ardından yüzey üzerine bir kat boya atıldıktan sonra numune kurumaya bırakılmıştır. İki saat sonra yüzeyin iyice kuruduğu görülmüş ve ikinci kat sprej boya atılmıştır. Tekrar kurumaya bırakılan levha ardından 24 saat boyunca lazer güneş ışığıyla pozlanmıştır. Pozlanmış ve pozlanmamış yüzeyler floresan altında spektrometre ile incelenerek sonuçlar şekil 4.20 ve 4.21 de gösterilmiştir. Pozlanmamış numune merkez dalga boyu 576 nm iken pozlanmış numunenin merkez dalga boyu 570 nm olarak ölçülmüş dolayısıyla pozlama sonrasında 6 nm lik bir kayma olduğu görülmüştür.

4.2.1.4. Yaşlanmanın Mikroskopik İncelenmesi:



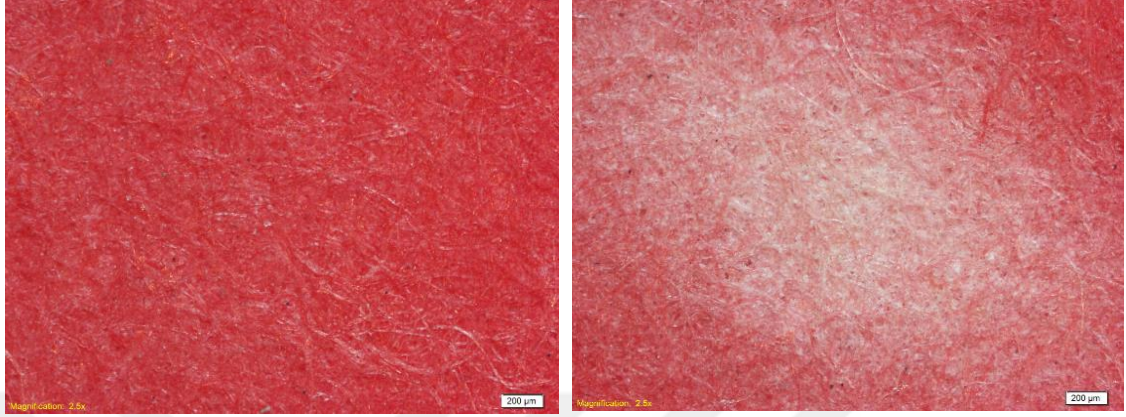
Şekil 4.23 Siyah Mukavvada pozlama süresi arttıkça (5, 10, 30 ve 60 dak) siyahlık azalmakta olduğunun spektrumdaki görünümü.

Şekil 4.23 te pozlama süreleri 5, 10, 30 ve 60 dakika olarak artırıldıkça tayf kaymakta 60 dakika sonunda şekil 4.24 de görülen yaşlanma oluşmaktadır.



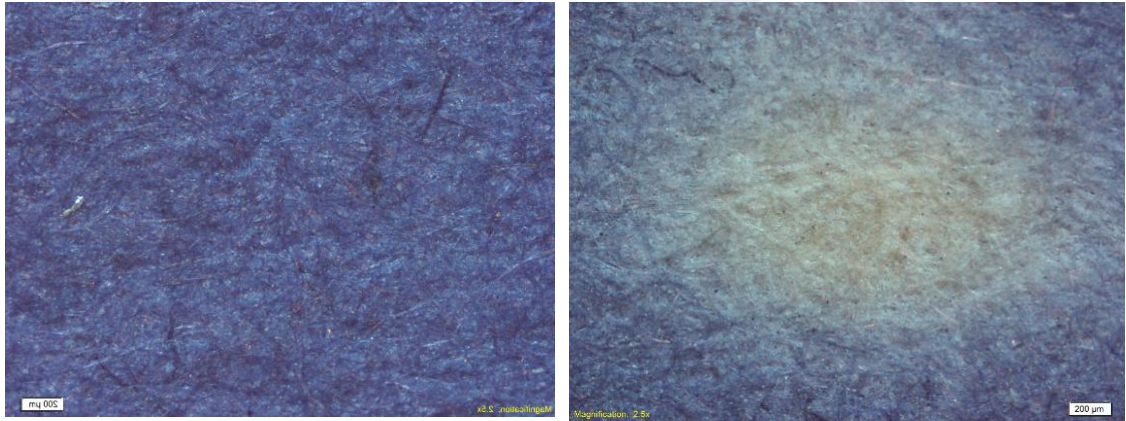
Şekil 4.24. Siyah mukavvadaki yaşlanmanın mikroskopik görüntüleri

Burada mikroskoba yerleştirilen numune 50X büyütme uygulanmış olup ışınlama bölgesi 2.9 mm genişliğindedir. Bölge bu kadar dar bir alanı kapsamakla birlikte yaşlanma hakkında bilgiler içermektedir. Renkte solma en ön planda görülmekle birlikte mukavva liflerinde yıpranma da gözden kaçmamaktadır.



Şekil 4.25. Kırmızı mukavvadaki yaşlanmanın mikroskopik görüntüleri

Şekil 4.25 de de kırmızı mukavvadaki solma ve yaşlanma etkileri gözlemlenmektedir. Burada mikroskoba yerleştirilen numune 50X büyütme uygulanmış olup ışınlama bölgesi 3,0 mm genişliğindedir. Bölge bu kadar dar bir alanı kapsamakla birlikte yaşlanma hakkında bilgiler içermektedir. Renkte solma en ön planda görülmekle birlikte mukavva liflerinde yıpranma da gözden kaçmamaktadır.



Şekil 4.26. Mavi mukavvadaki yaşlanmanın mikroskopik görüntüleri

Şekil 4.26 da da mavi mukavvadaki solma ve yaşlanma etkileri gözlemlenmektedir. Burada mikroskoba yerleştirilen numune 50X büyütme uygulanmış olup ışınlama bölgesi 2,0 mm genişliğindedir. Bölge bu kadar dar bir alanı kapsamakla birlikte yaşlanma hakkında bilgiler içermektedir. Renkte solma en ön planda görülmekle birlikte mukavva liflerinde yıpranma da gözden kaçmamaktadır.

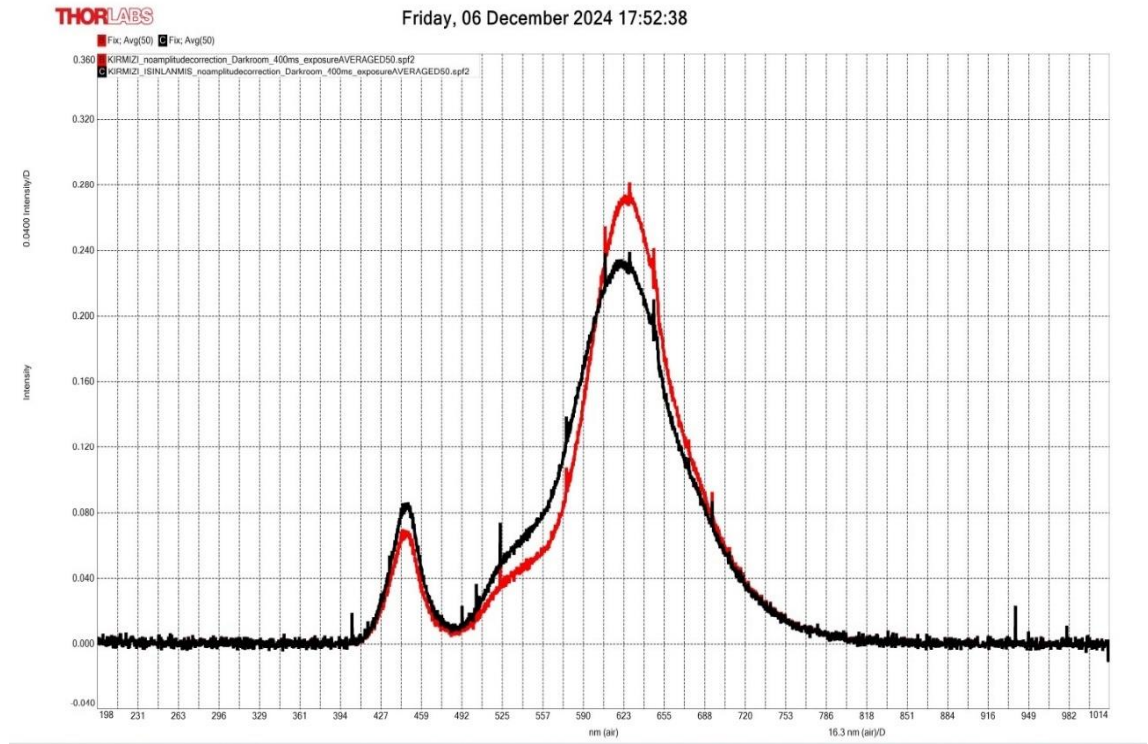
Özetle lazer güneş benzeteci her üç numune üzerinde de yaşlandırma, soldurma ve dokusal olarak yıpratma, bir başka deyişle güneş ışığının yıpratıcı etkilerini sergilemiştir.

4.2.3. LED Projektör

Görsel olarak dahi 100W lık led projektörün kırmızı mukavva üzerinde 24 saatlik pozlama sonucunda oluşturduğu solgunluk lazer benzeteçi ile 30 dakikada oluşturulan solmaya göre çok daha az olduğu ortadadır.



Şekil 4.27. 24 saat boyunca lazer güneş ışığı uygulanan kırmızı mukavvada oluşan yaşlanma



Şekil 4.28. Led projektör ile 24 saat boyunca pozlanmış ve pozlanmamış kırmızı mukavva numunenin beyaz floresan altındaki tayfları birlikte görülmektedir. Tayfların merkez noktalarında 3 nm lik bir kayma görülmektedir.

Led projektördeki her bir ledin önünde de ışığın odaklanması amacıyla lens yapısında şeffaf bir kapak bulunmaktadır. Böylece led ışımalarının da daha az saçılması, yoğunluğunu koruması sağlanmaktadır. Tüm bunlara rağmen lazer güneş benzeteçinin kırmızı mukavva üzerinde 30 dakikada gerçekleştirdiği soldurma etkisi led projektörün 24 saatte yaptığı soldurmadan çok daha fazladır. Öte yandan led projektör 100W iken lazer güneş benzeteçi 350 mW dır.

Öte yandan led projektör ile 7 gün boyunca mat siyah boyalı galvanizli sac pozlanarak güneş ışığına mukavvalara göre çok daha dayanıklı olduğu anlaşılan bu yüzeyde test edilmiştir. 7. gün sonunda bile herhangi bir yaşlanma veya solma etkisi gözlemlenemediği gibi aynı zamanda spektrometre ile yapılan ölçümlerde de pozlanan ve pozlanmayan yüzeyleri arasında bir farklılık görülmemiştir

4.3 KC Güç Tüketim Değerleri:

KC ksenon ark güneş benzeteçi (Şekil 4.25), güneş ışığını taklit etmek amacıyla kullanılan yüksek güçlü bir sistemdir. KC teknik değerleri incelendiğinde, cihazın ağırlığının 190-233 kg arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Bu ağırlık, cihazın karmaşık yapısını ve kullanılan parçaların miktarını göstermektedir. Güneş benzeteçinin günlük su tüketiminin 44 litre olması, su soğutma sisteminin önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Su soğutma, hem donanımın soğutulmasını sağlamakta hem de aşırı ısınmanın önüne geçmektedir.

Cihazın enerji tüketimi de dikkat çekici bir diğer özelliktir. 400V üç faz sistemde 26 A değerinde olan güç tüketimi, toplamda 31,2 kW'lık bir güç tüketiminde bulunmaktadır. Bu değer, faz başına yaklaşık 10,4 kW'lık bir güç tüketimini işaret etmektedir. Elde edilen bu veriler, benzeteçin yüksek güç tüketimi ile çalıştığını ve önemli bir elektrik altyapısına ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Ek olarak, cihazın yedek parça listesinde bulunan su soğutmalı ksenon-ark ampullerinin gücü 6,5 kW ve 12 kW olarak belirlenmiştir. 12 kW'lık ampuller, benzeteçte kullanılan ve ısıma işlevini gerçekleştiren ana bileşenlerdir. Bu ampuller, yoğun ışık yayma kapasiteleri ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, su soğutmasına ihtiyaç duymaları, ampullerin yüksek ısılarda çalışabilmelerini sağlamaktadır.

Yinede su soğutma sistemine rağmen aşırı ısınma sorunu oluşabilmektedir. Ksenon ark kaynakların ısı şalterleri ile kontrol edilmesi, aşırı ısınmanın önünü almak için gerekli bir önlem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, sistemin güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Aşırı ısınma sebebiyle zaman zaman pozlanmaya ara verilmesi gerekliliği de benzeteçlerin çalışma döngülerini etkileyebilir.

Ksenon ark güneş benzeteçleri, hem mekanik hem de elektriksel açıdan dikkatlice incelenmesi gereken karmaşık sistemlerdir. Bu cihazların teknik değerleri, enerji tüketimi, su ihtiyacı ve aşırı ısınma kontrol yöntemleri, güneş enerjisi araştırmalarında önemli bir rol oynamaktadır.

Operating Specifications

Models		Xe-1						Xe-2		Xe-3			
Configurations ¹		Xe-1-BE Xe-1-SE		Xe-1-BCE Xe-1-SCE		Xe-1-WE		Xe-2-HE Xe-2-HSE Xe-2-HBSE		Xe-3-HE Xe-3-HSE	Xe-3-HDSE ² Xe-3-HBSE	Xe-3-HCE Xe-3-HSCE	
Black Panel Temp ² (°C)		BP	IBP	BP	IBP	BP	IBP	BP	IBP	BP	IBP	BP	IBP
Light		45-90	50-100	25-90	25-100	45-90	50-100	50-100	55-105	45-110	50-120	35-110	36-120
Light w/IR Filter		40-70	45-80	20-70	20-80	40-70	45-80	35-85	40-90	40-90	45-100	30-90	31-100
Dark		25-50	25-50	10-50	10-50	25-50	25-50	25-45	25-45	25-50	25-50	15-50	15-50
Light+Immersion		—	—	—	—	35-55	35-55	—	—	—	—	—	—
Dark+Immersion		—	—	—	—	30-50	30-50	—	—	—	—	—	—
Chamber Air Temp ^{3,4} (°C)		CAT		CAT		CAT		CAT		CAT		CAT	
Light (any filter)		35-55		15-55		—		35-65		35-65		25-65	
Dark		30-45		10-40		—		25-45		25-50		15-50	
Relative Humidity ³		N/A											
Specimen Area		25 x 46 cm (d x w) (9.9 x 18.0 in)				22 x 42 cm (d x w) (8.8 x 16.5 in)		30 x 25 cm (h x dia) (11.9 x 9.8 in)		45 x 72 cm (d x w) (17.8 x 28.3 in)			
Specimen Capacity ⁵ (qty @ size)		17 @ 51 x 102 mm (2 x 4 in)				15 @ 51 x 102 mm (2 x 4 in)		31 @ 45 x 132 mm (1.8 x 5.2 in)		55 @ 51 x 102 mm (2 x 4 in)			
Max Specimen Weight (distributed evenly)		14 kg (30 lbs)						4.5 kg (10 lbs)		23 kg (50 lbs) ⁶			
Inlet Water Pressure and Purity ⁷		All non-"S", non-"W" models ¹ : 0.7-6.2 bar (10-90 psi); > 200 kΩ-cm; < 5 µS/cm; < 2.5 ppm TDS All "S" or "W" models: 2.1-6.2 bar (30-90 psi); > 5 MΩ-cm; < 0.2 µS/cm; < 0.1 ppm TDS; < 0.1 ppm colloidal silica											
Water Consumed with Spray On ⁸		0.12 L/min		0.12 L/min		0.001 L/min		0.5 L/min (front) 1.0 L/min (front & back)		0.16 L/min (front) 0.4 L/min (front & back)		0.16 L/min	
Water Consumed with Humidifer On ⁸		—		—		—		8 L/day		44 L/day		44 L/day	
External Dimensions ⁹ (w x h x d)		78 x 52 x 65 cm (31 x 21 x 26 in)		78 x 138 x 79 cm (31 x 55 x 31 in) <i>Xe-1 & Chiller</i>		99 x 72 x 65 cm (39 x 28 x 26 in)		91 x 166 x 69 cm (36 x 66 x 27 in)		91 x 178 x 99 cm (36 x 70 x 39 in)		78 x 94 x 94 cm (31 x 37 x 37 in) <i>Chiller Only</i>	
Weight ¹⁰		50 kg (110 lbs)		124 kg (272 lbs)		88 kg (195 lbs)		172 kg (379 lbs)		190-233 kg (420-512 lbs)		85 kg (186 lbs) <i>Chiller Only</i>	
Electrical ¹¹	208 V (230 V)	1-Φ @ 12 A (11 A)		1-Φ @ 19 A (16 A)		1-Φ @ 13 A (12 A)		1-Φ @ 24 A (23 A)		3-Φ @ 39 A (39 A)		3-Φ @ 44 A (44 A)	
Requirements	400 V	—		—		—		—		3-Φ @ 26 A		3-Φ @ 26 A	
Lab Recommendations ¹²													

Şekil 4.29 KC tüketim değerleri (EK 6)

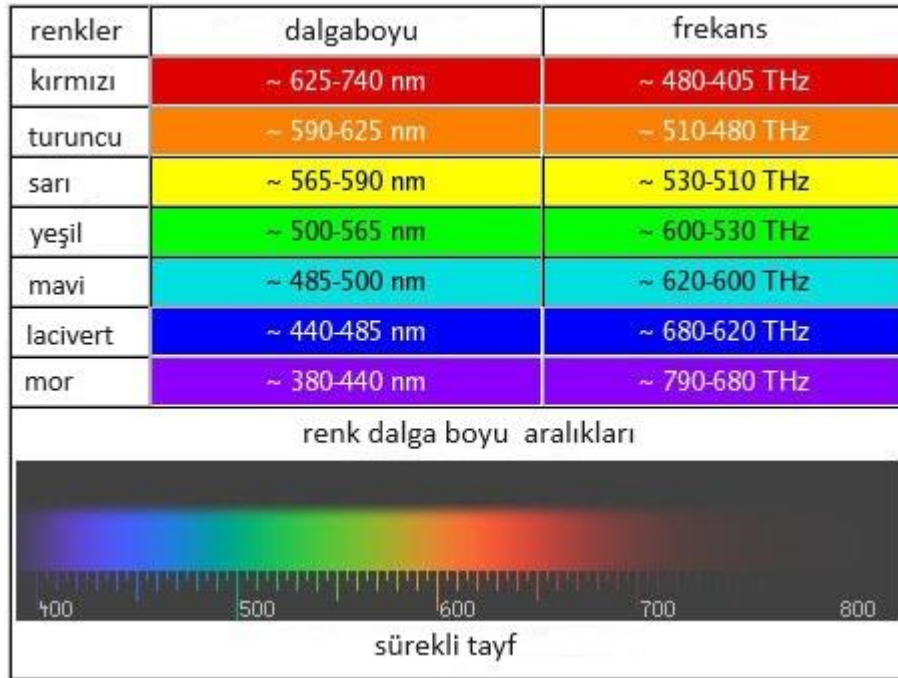
5. TARTIŞMA

Güneş, dünyadaki yaşamın temel kaynağıdır. Güneşin etkileri, iklim değişikliklerinden botanik gelişime kadar geniş bir yelpazede gözlemlenebilir. Bu etkilerin laboratuvar ortamında anlaşılması, özellikle güneşin yaşlandırma etkileri üzerinde çalışmalar yapabilmek için oldukça önemlidir. Çalışmada geleneksel güneş benzeteçi kaynakları yerine diyot uyarımlı katı hal lazer teknolojisinin kullanılması, bu süreçlerin hızlandırılması enerji verimliliği ve çıktıların daha etkin hale getirilmesi açılarından faydaları ve sorunları ortaya koymak üzere incelenmiştir.

Güneş benzeteçleri, güneş ışığını laboratuvar koşullarında taklit etmek amacıyla kullanılırlar. Bu benzeteçler, güneş spektrumuna benzer bir ışık yayarak, cisimlerin güneş ışığına maruz kaldıklarındaki tepkilerini incelemeyi mümkün kılar. Günümüzde, bu tür benzetimlerde ve konumuz olan yaşlandırma, hızlandırarak yaşlandırma amacıyla en yaygın olarak kullanılan ışık kaynakları arasında Ksenon-ark ampuller bulunmaktadır. Ksenon-ark ampuller, geniş bir spektrum aralığı sağlamaları sayesinde, güneş ışığının doğal özellikleri ile benzerlik göstermektedir.

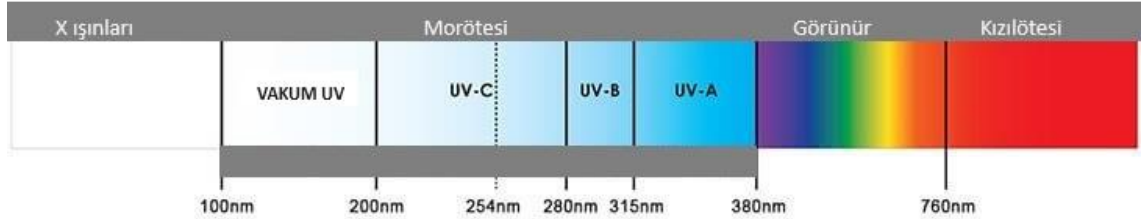
Bu çalışmada, mevcut güneş benzeteçlerine göre diyot uyarımlı katı hal lazerler güneş benzeteçlerinin bir alternatif sunup sunmadığını araştırıldı. Diyot lazerler, daha düşük güçlerle çalışabilmeleri ve yüksek enerji verimlilikleri ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, ikinci ve üçüncü harmonik kristallerine uygulandıklarında oluşan ikinci harmoniklerinin de o dalga boyunda bir lazer kaynağıymış gibi davranmaları söz konusudur.

Lazer güneş benzeteçi tüm güneş tayfını kapsar mı?



Şekil 5.1 Görünür bandtaki renk dalga boyları ve sürekli tayfta renklerin yerleşimi

Güneşin yaşlandırma etkileri, malzemelerin zamanla güneş ışığına maruz kalması sonucu yaşadığı değişiklikleri ifade etmektedir. Bu etkiler, özellikle dış ortam koşullarında kullanılan malzemelerin dayanıklılığı, renk değişimi, fiziksel bozulma gibi durumları kapsamaktadır. Güneş ışığını oluşturan başta UV (şekil 5.2), görünür (şekil 5.1) ve IR ışınları maddelerin yapısında değişiklikler yaratabilir.



Şekil 5.2 Morötesi bandının detaylı gösterimi

Yeryüzü ve uydu irtifası lazer güneş benzeteçlerin 4 er lazer kaynağın SHG kristallerince üretilen ışınlar kullanılarak modellenmiştir. Lazer hat genişliklerinin darlığı göz önüne alındığında benzeteç tayfinin güneş tayfinin tamamını kapsayamayacağı görülür. Çünkü yeryüzü benzeteçinin güneş tayfindan %77,5 oranında saptığı hesaplanmışken tayf uyum oran A+ düzeyinde çıkmıştır. Uydu irtifası benzeteçi de güneş tayfindan %85,61 oranında saptığı tayf uyum oranı A+ düzeyindedir.

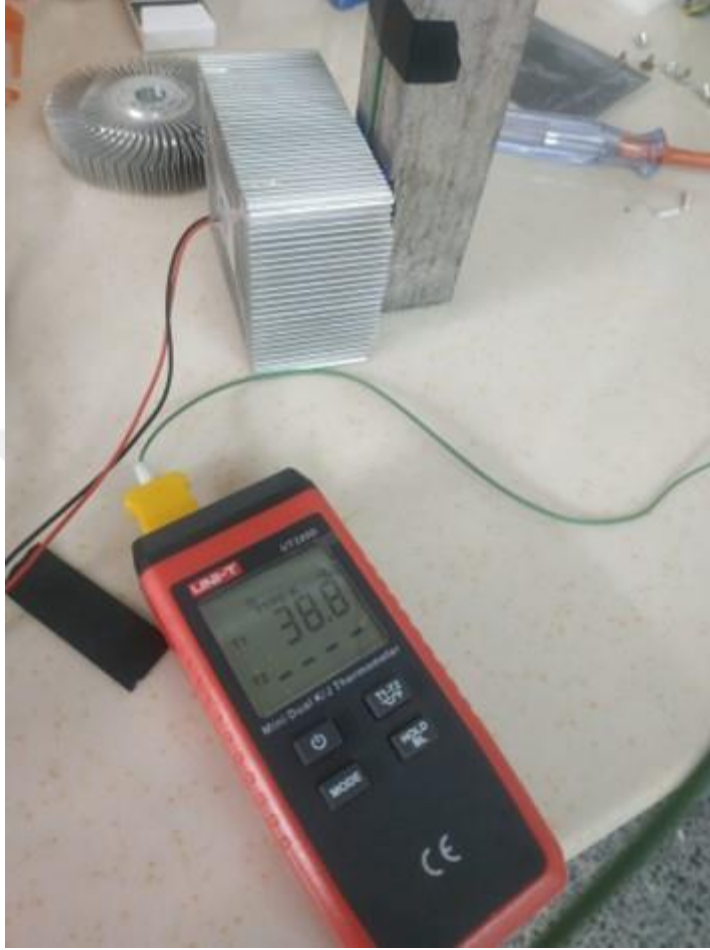
5.2. Lazer güneş benzeteçi pozlama esnasında numuneyi yakabilir mi?:

Lazer kesim ve kaynaklama, metal malzeme işlemede yüksek verimliliği ve hassasiyetiyle öne çıkan bir yöntemdir. Ancak, lazerlerin yüksek enerji yoğunlukları, işlenen numunelerde istenmeyen ısı etkileri ve hatta hasarlara yol açabilir. Lazer güneş benzeteçi kullanımı sırasında numune yanması riski mevcuttur. Yüksek güçlü lazer ışınları, malzemenin yüzeyinde hızlı ve yoğun bir ısı artışına neden olur. Bu ısı artışı, malzemenin erimesine, buharlaşmasına ve hatta yanmasına yol açabilir. Bu nedenle, deneysel çalışmalar sırasında numune hasarını önlemek için dikkatli bir kontrol ve izleme süreci hayati önem taşır.

Ancak deneyler esnasında sürekli sıcaklık kontrolü ve lazer ışınının odaklanmasıyla numune yüzey sıcaklığı 50 °C'nin altında tutulmuştur. Bu, numune hasarını önlemek için oldukça etkili bir önlemdir. Numune ile lazer arasındaki mesafeyi ayarlayarak ışının odak noktası kontrol edilir ve böylece enerji yoğunluğu düzenlenir. Bu sayede, ısı dağılımı optimize edilerek numune yüzey sıcaklığı güvenli bir seviyede tutulur. 50 °C gibi nispeten düşük bir yüzey sıcaklığı, çoğu malzeme için önemli bir hasar riski oluşturmaz.

Kısaca lazer güneş benzeteçiyle yapılan pozlama işlemlerinde numune yanması potansiyel bir risktir. Ancak, uygun önlemler alınarak, özellikle de sürekli sıcaklık izleme ve lazer ışın odak noktasının hassas bir şekilde kontrolü ile bu risk büyük ölçüde azaltılabilir. Metinde belirtilen 50 °C'nin altındaki yüzey sıcaklığı kontrolü, deneysel çalışmanın güvenli ve verimli bir şekilde yürütülmesini sağlayan önemli bir faktördür.

Yine de farklı malzemelerin farklı ısı toleranslarına sahip olduğunu unutmamak önemlidir; bu nedenle, her malzeme için optimum parametrelerin belirlenmesi ve deneysel koşulların dikkatlice tasarlanması büyük önem taşır.



Şekil 5.3. Lazer güneş benzeteçi ile pozlama esnasında sürekli sıcaklık kontrollü yapılmıştır.

Lazer güneş benzeteçinin Ksenon ark benzeteçlerine göre avantajları var mıdır?

Diyot uyarımlı lazer kullanılarak yeryüzü ve uydu güneş benzeteçi modellemesinde ortaya konan lazer kaynakların toplam gücü ile KC nin elektrik tüketimi arasında büyük bir fark görülmüştür. Modellenen yeryüzü benzeteçi **17,32 W** uydu irtifası benzeteçi **44,90 W iken** KC **31,2 kW** tüketime sahiptir. Deneyde kullanılan üç lazer kaynağı 395 nm 200 mW UV lazer, 525 nm 100 mW yeşil lazer, 650 nm 50 mW olup toplam güçleri **350 mW** dır Yaşlandırma benzeteçlerinin günler haftalar boyunca çalıştırıldıkları göz önüne alındığında enerji verimliliği daha büyük önem kazanmaktadır.

Led güneş benzeteçleri varken lazer güneş benzeteğine ihtiyaç var mıdır?

Deneysel çalışmalarda **350 mW** lık lazer güneş benzeteçinin mukavva numunelere 30 dakikada yaptığı yaşlandırma etkilerinin **100 W** lık led projektörle verilemediği gösterilmiştir. Aynı şekilde 1 günlük led projektör ile pozlama süresinde lazer benzeteç

galvanizli sac numuneyi yaşlandırırken led projektörde herhangi bir yaşlanma gözlenmemiştir.

Deneyde elde edilen lazer güneş ışığının izdüşümü 3 mm çapında iken ksenon ark ve led benzeteçler daha geniş alanları pozlayabilmektedir.

Deney sonuçlarına göre, üretilen lazer güneş ışığının izdüşüm çapı 3 mm olarak ölçülmüştür. Bu, ksenon ark ve LED benzeticilerle karşılaştırıldığında oldukça küçük bir alandır; zira ksenon ark ve LED'ler daha geniş yüzeyleri aydınlatabilmektedir. Ancak, bu durum lazer sisteminin yetersizliğini göstermez. 3 mm'lik lazer ışını çapı, günümüz kalite kontrol laboratuvarlarınınca analiz edilebilmek açısından yeterlidir. Bu amaçla çeşitli mikroskopik inceleme ekipmanları kullanılarak numune yüzeyinde oluşan yaşlanma gözlemlenir.

Önemli bir nokta, lazer ışınının çapının optik kolimasyon teknikleriyle istenilen boyuta büyütülebilmesidir. Kolimasyon, paralel bir ışın demeti oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir ve bu yöntemle lazer ışınının çapı artırılarak daha geniş alanların incelenmesi mümkün hale gelir. Bu durum, lazer güneş ışığı benzeteçinin esnekliğini ve geniş uygulama alanlarını göstermektedir.

Sonuç olarak, 3 mm'lik lazer ışını çapı, deneyin amacı ve günümüz teknolojisi göz önüne alındığında, bir dezavantaj olarak değil, aksine hassasiyet ve kontrol açısından bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Gerektiğinde optik kolimasyon ile çapın büyütülebilmesi, sistemin esnekliğini ve farklı uygulama senaryolarına uyarlabilirliğini sağlamaktadır.

Ksenon ark ve led kaynak kullanan güneş benzeteçlerinde kaynaklar ve numune aynı ortamda bulunmaktadır. Lazer benzeteç için durum aynı mıdır?

Güneş benzeteçi, uzay araştırmaları ve malzeme bilimi gibi alanlarda kritik öneme sahiptir. Bu benzeteçler, güneş ışınımını taklit ederek malzemelerin uzay ortamındaki davranışlarının incelenmesini sağlar. Ksenon ark lambaları ve LED'ler gibi yaygın güneş benzeteçlerinde, kaynak ve numune genellikle ortamda bulunur. Bu durum, kaynak ile numune arasında doğrudan enerji transferini sağlar ancak bazı sınırlamalar da getirir. Bu, ortam koşullarının (örneğin sıcaklık ve basınç) hem kaynağı hem de numuneyi eşit derecede etkilediği anlamına gelir.

Ancak, lazer kaynaklı güneş benzeteçi bu konuda farklı bir yaklaşım sunar. Lazer ışığının optik fiberler aracılığıyla kayıpsız olarak taşınabilme özelliği, kaynak ile numune arasında fiziksel bir ayrım oluşturmayı mümkün kılar. Bu, lazer kaynağının numuneden ayrı bir ortamda, hatta farklı bir odada veya tamamen farklı bir yerde bulunabileceği anlamına gelir. Optik fiber, lazer ışınını numuneye taşıyarak, numunenin lazer kaynağının bulunduğu ortam koşullarından etkilenmesini engeller.

Bu özellik, özellikle uzay benzeteçleri için oldukça avantajlıdır. Atmosferik koruyucu etkiler olmadığında uzayda sıcaklık dalgalanmaları çok şiddetli olabilir; çok yüksek veya çok düşük değerler gözlemlenebilir. Lazer kaynaklı sistemlerde, lazer kaynağı kontrollü bir ortamda tutularak istenen yoğunluk ve spektral dağılıma sahip ışın üretilebilir. Bu ışın daha sonra optik fiber aracılığıyla vakum ortamında bulunan

numuneye yönlendirilir. Bu sayede, numune üzerindeki ışınım, kaynağın bulunduğu ortamın koşullarından bağımsız olarak, tam anlamıyla uzay koşullarını simüle eden bir ortamda uygulanabilir.

Özetle, ksenon ark ve LED kaynaklı güneş benzeteçlerinde kaynak ve numune aynı ortamı paylaşırken, lazer kaynaklı sistemler kaynak ve numune arasında fiziksel bir ayrım sağlayarak daha hassas ve kontrollü bir taklit imkanı sunar. Bu zellik, özellikle uzay ortamının karmaşık koşullarını taklit etmek isteyen uygulamalar için önemli bir avantajdır. Lazer benzeteç, uzay koşullarının hassas bir şekilde kontrol ve simüle edildiğı, daha gerçekçi bir test ortamı sağlar.



6. SONUÇLAR

Diyot uyarımlı katı hale lazer kaynakları ile lazer güneş benzeteçi tasarımı ve geliştirilmesi üç adımda gerçekleştirilmiştir. Bunlar sanal evren çalışmaları, teorik modellemeler ve deneysel uygulamalardır.

6.1. Sanal evren çalışmalarının sonuçları:

Sanal evrende yapılan çalışmalarda tam donanımlı bir lazer optik laboratuvarında bulunan optik masa, lazer kaynakları, masaya monte edilen optik ekipmanlar ile pratikleri yapılmıştır. Dikkat edilmesi gereken güvenlik adımları deneyimlenmiştir. Lazer kaynağından gelen ışımaya ait dalga boyları ve şiddetin ikinci harmonik kristalleriyle ne şekilde değiştirilebildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmaların ışığında teorik modelleme aşamasına geçilmiştir.

6.2. Teorik Modellemeler:

6.2.1. Yeryüzü Diyot Uyarımlı Katı Hal Lazer Güneş Benzeteçi:

Çalışmada yeryüzü diyot uyarımlı katı hal lazer güneş benzeteçi tasarımı için öncelikle uygun tayf ortaya konulmuştur. Bu gereklilik PV panel testleri için üretilen güneş benzeteçlerine ait standart olan AM1,5G nin UV bandı değerleri içermemesidir. Bunun nedeni PV panelleri korumak için üzerlerine kaplanan UV filtreden kaynaklanmaktadır.

PV panellerin testi için üretilen güneş benzeteçleri güneşle eşdeğer ışıma şiddetinde olacak şekilde tasarlanırlar. Bu güneş panellerinin yeryüzü standardı olan AM1,5G de belirtilen dalga boylarına sahip LED kaynak kullanan benzeteçler gün geçtikçe yayılmaktadır.

PV panel testi amaçlı üretilen güneş benzeteçlerinde ışımanın standartta belirlenen tayfa uygunluğu önem taşımaktadır. Buna rağmen hem diğer kaynaklara göre daha dar çizgi genişliklerine sahip hem LED hem de lazer kaynak kullanan benzeteçler sektörde kabul görmüş ve gün geçtikçe yayılmaktadır.

Öte yandan yaşlandırma ve hızlandırarak yaşlandırma cihazlarına ait ksenon ark kaynakların da güneş tayfına çok yakın olduğu iddia edilse de tayfa göre sapmaları olduğu ve bunlarında kullanılan filitrelerle önlenmeye çalışıldığı görülmüştür. Yaşlandırma cihazlarına ait standartların UV bandı için çok detay içerirken görünür ve IR de detay içermediği görüldüğünde modellemesi yapılan lazer güneş benzeteç için yeryüzü ışıma standardı ortaya konulmuştur. Bu standarta ait tayf aralıkları ve gereken ışıma şiddetleri KC nin 52 güneş gücünde olması nedeniyle yine 52 güneş için hesaplanarak modellenmiştir.

Belirlenen bu standarta uygun olarak modellenen lazer güneş benzeteçi tayf için gerek ışıma kriter olan tayf oran uyumunda A+ sınıflandırmaya sahip olurken tayf sapmasında 77,5 değeriyle U sınıfı yani kapsam dışı bulunmuştur. Diğer bir deyişle tayfı oluşturan her bandta gereken ışın şiddetini karşılamıştır. Yani UV bandı içindeki her alt bandta gereken şiddette ışınları vererek güneşin yıpratıcılığını, görünür banda ait her alt bandta gereken şiddette ışınları vererek güneşin renk solduruculuğunu, ve IR bandına ait

gereken ışın şiddetini vererek güneşin fototermal ısıtma özelliğini A+ düzeyinde taklit etmiştir. Lazer güneş benzeteci bu değerdeki tayf sapmasıyla elbette ki PV panellerin elektrik üretim performans testlerinde kullanılamaz. Fakat PV panellerin yaşlandırma testini A+ düzeyde gerçekleştirecektir.

KC tüketim değerlerine (EK 6) bakıldığında cihazın 31,2 kW tüketimi varken aynı yaşlandırmayı modellenen lazer benzeteci 17,3W tüketim ile gerçekleştirebilmektedir. Peki bu bir mucize midir?

Burada unutulmaması gereken KC, 31,2 kW tüketimi 1 cm² lik bir numuneyi pozlamak için değil 50 cm² lik 40 numune alabilen bir alanı pozlamak için harcamaktadır. Ayrıca lazer kaynak noktasal iken ksenon-ark kaynağı her yöne ışıma yapmakta, böylece numune üzerine yönelmemiş olan ışıma bir verimlilik kaybı olarak ortaya çıkmaktadır.

Yeryüzü Benzeteciden Geleceğe Bakış:

Boya, kaplama ve polivinil klorid (polyvinyl chloride-PVC) gibi güneşin yaşlandırma etkilerine hassas materyaller için en küçük numune boyutuna dair literatür taramasında net bilgiye ulaşılamadığından sektör çalışanlarıyla görüşmeler yapılmıştır. Bu görüşmeler sonucunda günümüz test değerlendirme ekipman ve yöntemleri kullanılarak yapılacak analizler için 1 cm² lik bir numune alanının yeterli olacağı bilgisi alınmıştır.

Bu durumda 1 cm² alanlı 100 numuneyi 52 güneş lazer ışının optik kolimasyonu ile pozlamak için gereken güç 1730 W, 1,73 kW olarak hesaplanmaktadır. Milenyumun başlarında kW düzeyinde lazer kaynakları ulaşılması güç ve pahalı iken günümüzde femto hatta atto saniye sürelerinde darbeli ışıma yapabilen yüksek güçlerdeki lazer kaynakları kolaylıkla erişilebilmekte ve halen geliştirilmektedir.

Gelecekte örneğin 100 adet numuneyi pozlayabilme özelliğine sahip yeryüzü lazer güneş benzeteci tasarım ve üretimi için adımlar atılabilir. Böyle bir tasarıma iklimlendirme özellikleri ilave edilebilir. Bu sayede dünyadaki herhangi bir coğrafi konuma ait güneş tayfı ve iklimlendirme özellikleri girilerek yaşlandırma çalışmasına ait sonuçlardaki doğruluk payının artırılması sağlanabilir. Lazer kaynaklar ksenon ark kaynakları gibi yüksek güç tüketerek ortamı ısıtmayacaklarından veya lazer ışımının optik fiber ortamlar üzerinden taşınması mümkün olabileceğinden pozlamanın yapılacağı ortamda ısıtma ve soğutma işlemleri yapılabilir. Böylece iklimlendirme söz konusu olduğunda soğuk ve buzlanmanın etkilerini de içeren diyot uyarımlı katı hal lazer kaynakları ile coğrafi güneş yaşlandırma benzeteci geliştirilebilir.

6.2.2 Uydu İrtifası Diyot Uyarımlı Katı Hal Lazer Güneş Benzeteci:

Çalışmada uydu irtifası diyot uyarımlı katı hal lazer güneş benzeteci tasarımı için öncelikle uygun tayf ortaya konulmuştur. Bu gereklilik uydular için üretilen PV panellerin testlerinde kullanılan güneş benzetecilerine ait standart olan AM0 ın güneş ışımasına göre daha düşük UV bandı değerleri içermesidir. Bunun nedeni PV panelleri korumak için üzerlerine yapılan UV filtreden kaynaklanmaktadır.

Uydularda PV panellerin testi için üretilen güneş benzetecileri güneşle eşdeğer ışıma şiddetinde yani bir güneş gücünde olacak şekilde tasarlanırlar. Bu güneş panellerinin testlerini yapmak üzere uydu standardı olan AM0'a göre belirtilen dalga boylarına sahip LED ve lazer kaynak kullanan benzeteciler bulunmaktadır.

Uydu PV panel testi amaçlı üretilen güneş benzetecilerinde ışımanın standartta belirlenen tayfa uygunluğu önem taşımaktadır. Bu sayede tayfin her bandında verimli olarak elektrik üretmeleri test edilebilecektir. Buna rağmen hem diğer kaynaklara göre daha dar çizgi genişliklerine sahip hem LED hemde lazer kaynak kullanan benzeteciler sektörde kabul görmüş ve gün geçtikçe yayılmaktadır.

Öte yandan uydu irtifası yaşlandırma ve hızlandırarak yaşlandırma cihazların da da yine ksenon ark kaynakları yaygın olarak kullanılmaktadır. Uydu irtifası lazer güneş benzeteci için de detaylı standart bir güneş tayfı ortaya konmuş, modelleme bu standartta ait tayf aralıkları ve gereken ışıma şiddetleri 52 güneş için hesaplanarak modellenmiştir.

Belirlenen bu standartta uygun olarak modellenen uydu irtifası lazer güneş benzeteci tayf için gereken ışıma kriteri olan tayf oran uyumunda A+ sınıflandırmaya sahip olurken tayf sapmasında 85,61 değeriyle U sınıfı yani kapsam dışı çıkmıştır. Yani güneş tayfinin tamamında ışıma yapamadığı halde tayfı oluşturan her bandta gereken ışıma şiddetini karşılamıştır. Yani UV bandı içindeki her alt bandta gereken şiddette ışımları vererek güneşin yıpratıcılığını, görünür banda ait her alt bandta gereken şiddette ışımları vererek güneşin renk solduruculuğunu, ve IR bandına ait gereken ışıma şiddetini vererek güneşin foto termal ısıtma özelliğini A+ düzeyinde taklit etmiştir. Lazer güneş benzeteci bu değerdeki tayf sapmasıyla elbette ki uydu PV panellerin elektrik üretim performans testlerinde kullanılamaz. Fakat uydu PV panellerin yaşlandırma testini A+ düzeyde gerçekleştirecektir.

Uydu İrtifası Benzetecinden Geleceğe Bakış:

Uydular fırlatıldıktan sonra tekrar fiziksel temas sağlama imkanı bulunmamaktadır. Bu yüzden hem uydularda kullanılan PV paneller hem de uzay araçlarına ait dış kaplama boya ve koruyucuların güneş yaşlandırması daha da önem kazanmaktadır.

Çalışmada görüldüğü üzere lazer kaynaklarla tasarlanan güneş benzeteci güneş hızlandırarak taklit edebilmektedir. Bu hızlandırma ne kadar artırılabilir? Bu durumda lazer ışıma yoğunluğunun aşırı fototermal etkilerle numuneyi deforme etmeyeceği düzeyi belirlemek gerekir. Böylece tasarlanacak benzeteci 52 güneş ışıma şiddetinden daha yüksek seviyelere ulaşabileceğinden daha kısa sürede yaşlandırma yapacaktır.

Ayrıca uzayda atmosferik korumalar bulunmayan vakum bir ortam olduğundan, güneş ışığına maruz kalındığı durumlar ile karanlık arasında materyal yüzeyinde önemli sıcaklık farkları oluştuğu bilinmektedir. Lazer kaynaklar ksenon-ark kaynaklar kadar yüksek enerji tüketiminden doğan ısı üretmediklerinden ya da lazer kaynakların pozlama ortamından ayrı bir yerde konumlandırılarak; ışımanın optik fiber ortamlar kullanılarak pozlama bölümüne taşınması mümkün olduğundan uzaydaki sıcaklık ve basıncı da taklit eden diyot uyarımlı katı hal lazer kaynak güneş yaşlandırma benzeteci tasarlanabilir.

6.3. Deneysel Sonuçlar:

Deneysel aşamaya gelinmeden önce sanal evren ve ardından teorik modelleme çalışmaları yapılmış. Deneysel aşamada ise temin edilip erişilebilen kaynak ve ekipmanla çalışma gerçekleştirilmiş, değişik numuneler üzerinde yaşlandırma amaçlı pozlamalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde alınan sonuçlar aşağıdaki başlıklar altında incelenebilir:

Lazer Güneş Benzeteçi Pozlama Esnasında Numuneyi Güneşin Isıtacağından Fazla Isıtarak Yakmaz:

Lazer kesim ve kaynaklama teknolojileri, metal malzeme işlemede sunduğu yüksek verimlilik ve hassasiyetle önemli bir yere sahiptir. Bu yöntem, endüstride yaygın olarak kullanılmakta ve birçok uygulama için tercih edilmektedir. Ancak, lazerlerin yüksek enerji yoğunlukları, işlenen numunelerde istenmeyen ısı etkileri ve potansiyel hasarlara yol açma riski taşımaktadır. Özellikle lazer güneş benzeteçlerinde kullanılan yüksek güçlü lazer ışınlarının, malzeme yüzeylerinde oluşturduğu hızlı ve yoğun ısı artışları, numunelerin yanmasına neden olabilir.

Deneysel çalışmalar sırasında numune hasarını önlemek için titiz bir kontrol ve izleme süreci sağlanmıştır. Bu süreçte, sıcaklık kontrolü ve lazer ışınının odaklanması büyük bir önem taşır. Numune ile lazer arasındaki mesafenin ayarlanması, lazer ışınının odak noktasını kontrol ederek enerji yoğunluğunu düzenlemeye yardımcı olur. Bu teknikle, ısı dağılımı optimize edilmiş olur ve numune yüzey sıcaklığı 50 °C'nin altında tutulabilir. Bu da, numunelerin yanma riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Zira 50 °C gibi nispeten düşük bir yüzey sıcaklığı, çoğu malzeme için hasar riski oluşturmaz.

Lazer Güneş Benzeteçi ile Ksenon Ark Benzeteçlerden Verimlidir:

Lazer güneş benzeteçleri, belirli dalga boylarında ışık üretebilen lazer kaynakları kullanarak çalışır. Bu sistemlerin en önemli avantajlarından biri, enerji tüketiminde sağladıkları verimliliğidir. Örneğin, yapılan bir çalışmada, yeryüzü güneş benzeteçlerinin toplam gücü 17,32 W, uydu irtifası benzeteçlerinin toplam gücü ise 44,90 W olarak belirlenmiştir. Buna karşın, Ksenon ark benzeteçleri, 31,2 kW gibi yüksek bir enerji tüketimi göstermektedir. Bu durum, lazer kaynaklarının enerji verimliliğini gözler önüne sermektedir.

Deneylerde kullanılan lazer kaynakları, 395 nm dalga boyunda 200 mW UV lazer, 525 nm dalga boyunda 100 mW yeşil lazer ve 650 nm dalga boyunda 50 mW lazerden oluşmakta olup, toplam güçleri 350 mW'tır. Bu güç seviyeleri, klasik Ksenon ark sistemlerine kıyasla oldukça düşüktür. Lazer kaynaklarının bu düşük güç tüketimi, uzun süreli çalışmalarda enerji maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yaşlandırma benzeteçlerinin günler ve hatta haftalar boyunca çalıştırıldığı düşünülürse, bu enerji tasarrufu daha da büyük bir önem kazanmaktadır.

Lazer Güneş Benzeteçi LED Güneş Benzeteçlerinden daha verimli ve etkilidir:

LED güneş benzeteçleri, çoğunlukla enerji verimliliği ve uzun ömürleri ile tercih edilse de, lazer güneş benzeteçi belirli avantajları ile öne çıkmaktadır.

Özellikle bu iki teknoloji arasındaki yaşlandırma etkileri, deneysel çalışmalarda dikkat çekmektedir.

Yapılan deneysel çalışma, 350 mW gücündeki bir lazer güneş benzeteci ile mukavva numuneleri üzerinde 30 dakikalık süre zarfında gözlemlenen yaşlandırma etkilerinin, 100 W gücündeki bir LED projektörle elde edilemediğini ortaya koymuştur. Bu durum, lazer teknolojisinin yüksek enerji yoğunluğu sayesinde, malzemelerin daha hızlı ve etkili bir şekilde yaşlandırılmasına olanak tanıdığını göstermektedir. LED benzetecilerin sunduğu ışık, güneş ışığının spektral dağılımını lazere yankın bir biçimde taklit etmesine rağmen, lazerin keskin ve yoğun ışması, malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde daha belirgin değişikliklere yol açmaktadır.

Aynı şekilde, lazer benzetecinde ışımanın 24 saatlik pozlama süresince galvanizli sac numunelerde belirgin yaşlanma belirtilerine yol açtığı gözlemlenirken, LED projektör ile yapılan testlerde hiçbir yaşlanma etkisi gözlemlenmemiştir. Bu durum, lazer ışığının malzeme üzerindeki etkisinin, LED ışığına kıyasla daha güçlü olduğunu ortaya koymaktadır. Bu özellik, lazerin belirli frekanslarında ve yoğunluğunda malzeme yüzeylerinde kimyasal bozulma ve fiziki deformasyon yaratabilen daha fazla enerji yaydığına işaret etmektedir.

Dar Lazer İzdüşümü Güneş Işığı Numune Yaşlandırmada Dezavantaj Oluşturmaz:

Deneydeki lazer güneş ışığının 3 mm'lik çapı, ksenon ark ve led benzetecilere göre sınırlı bir ışıma alanı sağlasa da bu durumun lazer benzetecin yetersizliğini gösterdiği söylenemez. Özellikle günümüz kalite kontrol donanım ve teknolojileri 3 mm çapındaki bir bölgede yaşlanma ve diğer fiziksel değişimlerin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Mikroskopik inceleme ekipmanları kullanılarak gerçekleştirilen analizler, lazer ışınının çapına rağmen verimli sonuçlar sağlamaktadır.

Ksenon ark ve Led Kaynak Kullanan Güneş Benzetecilerinde Kaynaklar ve Numune Aynı Ortamda Bulunmaktadır. Lazer Kaynaklar Numunelerden Farklı Ortamda Bulunabilir:

Güneş benzetecileri, uzay araştırmaları ve malzeme bilimi gibi alanlarda kritik bir rol oynamaktadır. Bunlar, güneş ışınımının taklit edilmesi yoluyla malzemelerin uzay ortamındaki davranışlarının incelemesini sağlar. Güneş benzetecileri, gerçek güneş ışığının spektral özelliklerini en iyi şekilde yansıtmayı amaçlar. Ksenon ark lambaları ve LED'ler gibi yaygın güneş benzetecilerinde, kaynak ve numune aynı ortamda bulunur. Bu durum, kaynak ile numune arasında doğrudan enerji transferini mümkün kılar ki bu sıcaklık ve basınç gibi değişkenlere sınırlamalar getirerek tam bir uydu ve uzay güneş benzetecinin üretimine engel olur.

Oysa lazer kaynaklı güneş benzetecilerinde durum oldukça farklıdır. Lazer teknolojisi, ışığın optik fiberler aracılığıyla kayıpsız bir şekilde taşınabilmesini mümkün kılar. Bu, kaynak ile numune arasında fiziksel bir ayırım oluşturabilme olanağı sunar. Lazer kaynağı, numuneden ayrı bir ortamda, hatta farklı bir odada veya tamamen başka bir yerde bulunabilir. Optik fiber, lazer kaynağının ürettiği ışığı, numuneye taşır ve bu sayede numunenin lazer kaynağının bulunduğu ortam koşullarından etkilenmesi engellenir.

Bu özellik, özellikle uzay benzeteçleri için önemli avantajlar sağlar. Uzayda atmosferik koruyucu etkiler olmadığından, sıcaklık dalgalanmaları aşırı derecede sert olabilir. Lazer kaynaklı sistemlerde, lazer kaynağı kontrollü bir ortamda tutulabilir. Bu, istenen ışık yoğunluğu ve spektral dağılımı ile ışın üretimini mümkün kılar. Üretilen bu ışın, daha sonra optik fiber aracılığıyla vakum ortamında ve uzay sıcaklığında bulunan numuneye yönlendirilir. Böylece, numune üzerindeki ışınım, kaynağın bulunduğu ortam koşullarından bağımsız olarak, uzay koşullarında yaşlandırma gerçekleştirilir.

Özetle, ksenon ark ve LED kaynaklı güneş benzeteçlerinde kaynak ve numune aynı ortamı paylaşırken, lazer kaynaklı sistemler kaynak ve numune arasında fiziksel bir ayrım sağlayarak daha hassas ve kontrollü bir taklit imkanı sunmaktadır. Bu özellik, özellikle uzay ortamının karmaşık koşullarını taklit etme ihtiyacı duyan uygulamalar için önemli bir avantajdır. Lazer benzeteçler, uzay koşullarının hassas bir şekilde kontrol ve simüle edildiği, daha gerçekçi bir test ortamı sağlamaktadır. Bu nedenle, lazer kaynaklı güneş benzeteçleri, modern araştırma ve geliştirme süreçlerinde yer alacaktır.

7. KAYNAKLAR:

- Almarzooqi N. Ahmad F. Hamid A. Ghenai C., 2023. Experimental investigation of the effect of optical filters on the performance of the solar photovoltaic system, Energy Reports
- Anan'ev I, Nauka M., 1990, Optical resonators and laser beams, The SAO Astrophysics Data System
- Bach R., Tippenbach M., Rzazewski K., 2002, Spontaneous emission of atoms via collisions of Bose-Einstein condensates, Physical Review
- Baur C.; Kröger I.; Winter S.; Witt F.; Pichetto V., Rapp E., 2018 Comparison of primary high altitude and synthetic calibration methods of solar cells for space applications in view of an updated AM0 spectrum, IEEE
- Bazzi A, KleinZ. 2012, Solid state solar simulator, 10.1109/TIA.2012.2199071
- Bertolotti M., 2004, The History of the Laser s 7-20, 36 57, 72-90
- Björk G., Karlsson.A., Yamamoto Y., 1994 Definition of a laser threshold, Physical Review A 50, 1675,1 August 1994
- Brandhorst H., Hickey J., Curtis H., 1975, Interim solar cell testing procedures for terrestrial applications, NASA
- Brixner T., Mueller S., Müller A., Knot A., Schnepf W., Truman S., Vetter A., Mammen S. 2023, femtopro: Virtual-reality interactive training simulator of an ultrafast laser Laboratory
- Budding E., Demircan O., 2007 Introduction to astronomical photometry, 2.1, 2.3, 3.2
- Codd D., Carlson A., Rees J., Slocum A. 2010, A low-cost high flux solar simulator Solar Energy Volume 84, Sayı 12, s 2202-2212
- Cubric I, Cubric G, Križmancic I., Kovacevic M. 2022, Evaluation of Changes in Polymer Material Properties Due to Aging in Different Environments, Polymers
- Decker A., Pollack J., A, 1972. 400-kilowatt argon arc lamp for solar simulation Space Simulation Conference ntrs.nasa.gov/citations/19720015568
- Dennis T., Schlager J., Bertness K., 2014 A Novel Solar Simulator Based on a Supercontinuum Laser for Solar Cell Device and Materials Characterization, IEEE Journal of Photovoltaics
- Digonnet M. 1990 Closed-form expressions for the gain in three- and four-level laser fibers, IEEE Journal of Quantum Electronics, Volume: 26 Issue: 10
- Dmitriev V., Gurzadyan G., Nikogosyan D., 2013 Handbook of nonlinear optical crystals, Ch 3.1 s6-12 Ch 3.2. s 14-17, Ch 3.3 s 17-240, Ch3.4 s 243-281
- Dunlap R., 2021 Energy from Nuclear Fusion Ch.1-1, 2-1, 4-1, 5-1
- Endo M., Walter R., 2018, Ch5 s201, Ch6A s 239, Ch6B s287
- Esen V., Sağlam Ş., Oral B., 2017, Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 77, Pages 1240-1250
- Fontenla J, White O, Fox P., Avrett E., Kurucz R., 1999 Calculation of solar irradiances.

I. Synthesis of the solar spectrum, The Astrophysical Journal

- France R., Selvidge J., Mukherjee K., Seiner M., 2022. Optically thick GaInAs/GaAsP strain-balanced quantum-well tandem solar cells with 29.2% efficiency under the AM0 space spectrum, Journal of Applied Physics.
- Franken P, Hill A., Peters C, Weinreich G., 1961 Generation of Optical Harmonics, Physical Review Letters 7, 118
- Grum F., 2012, Radiometry Ch 2,3,10
- Gunther M., 2020 Design and Validation of an LED-Based Solar Simulator for Solar Cell and Thermal Testing
- Halavanau A., Benediktovitch A., Lutman A., Pellegrini C., 2020 Population inversion X-ray laser oscillator, PNAS
- Hasnanin C., Orenstein M., Lehmen V., Florez L., Harbison J., Stoffel N., 1990, Transverse mode characteristics of vertical cavity surface-emitting lasers, Applied Physics Letters
- Hecht J., Teresi D., 1998, Laser: light of a million uses Ch1 s1, Ch2 s10, Ch5 s62, Ch7 s102
- Hulstorm R., Bird R., Riordan C., 1985, Spectral solar irradiance data sets for selected terrestrial conditions, Solar Cells, Vol15.s 365-391.
- Izawa Y., Yamanaka M., Nakai S., 1999, Development of high-power DPSSL and its application, Technical Digest. CLEO/Pacific Rim '99. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics
- Kowalski F., Hale P., Şizgitil S., 1988, Broadband continuous-wave laser, Optics Letters Vol. 13, Issue 8, s. 622-624
- Lee M., -2012 Mass spectrometry handbook ch11 s243-258, ch17 389-405
- Mabruk M., Toh L., Murphy M., Leader M., Kay E., Murphy G., 2009, Investigation of the effect of UV irradiation on DNA damage: comparison between skin cancer patients and normal volunteers, Journal of Cutaneous Pathology Volume 36, Issue 7 p. 760-765
- Mancera D., Solarte E., Fierro L., Criollo W., 2013, Low power laser and LED irradiation effect on proliferation and differentiation of Wistar rats mesenchymal stem cells, SPIE Digital Library.
- Marcuse D. 1983, Classical derivation of the laser rate equation, IEEE Journal of Quantum Electronics, Volume: 19 Issue: 8
- McCluney W. 2014 Introduction to radiometry and photometry ch 2.1,3,4, 3-2,3,3
- Müller I., 2007, Max Planck – a life for thermodynamics, Annalen der Physik, Volume 520, Issue 2-3 p. 73-87
- Mironov S., Lozhkarev V., Ginzburg V., Yakovlev I., Luchinin G., Khazanov E., Sergeev A., Mourou G., 2010 Second Harmonic Generation under Strong Influence of Dispersion and Cubic Nonlinearity Effects, Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission, s.192.

- Namin A., Jivacate C., Chenvidhya D, Kirtikara K., Thongpron J. 2012, Construction of Tungsten Halogen, Pulsed LED, and Combined Tungsten Halogen-LED Solar Simulators for Solar Cell I-V Characterization and Electrical Parameters Determination, International Journal of Photoenergy
- NASA, 2024, <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html> 2024
- Nauenberg M. 2016, Max Planck and the birth of the quantum hypothesis, American Journal of Physics
- Nesterov A, Niziev V. 2000, Laser beams with axially symmetric polarization, Journal of Physics D: Applied Physics Vol33, s15
- Orszag M., 2016. Einstein's Theory of Atom-Radiation Interaction s 13-44, 62-75, 123-145
- Petrash J., Coray P., Meier A., Brack M., 2006, A Novel 50 kW 11,000 suns High-Flux Solar Simulator Based on an Array of Xenon Arc Lamps,
- Pollnau M. Eichhorn M., 2020 Spectral coherence, Part I: Passive-resonator linewidth, fundamental laser linewidth, and Schawlow-Townes approximation, Progress in Quantum Electronics, Vol.72
- Poole G., 2019, Cosmic Power Generation and Gravity Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology > Vol.5 No.3, Classical and Quantum Gravity, Volume 26, Number 7
- Poulek V., Strebkov D., Persic I., Libra M., 2012, Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology, Solar Energy.
- Powell R., 1998, Physics of solid-state laser materials, 1.1 s 1-2, 1.3 s 27-30, 6.1 s215, 8.1 s 294
- Pravettoni M., Galleano R., Jungst G., 2015, Results of the fourth international spectral measurement intercomparison of a steady-state AM0 solar simulator, Researchgate
- Rinne O., Buchman L., Scheel M., Pfeiffer H., 2009, Implementation of higher-order absorbing boundary conditions for the Einstein equations,
- Sadiq S. Alias A. 2022. Gravity and Solar System Evolution, American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences
- Sayre R., Agin P., LeVee G., Marlowe E., A comparison of in vivo and in vitro testing of sunscreens formulas, Photochemistry and Photobiology Volume 29, Issue 3 p. 559-566
- Sennaroğlu A., 2017 Solid-state lasers and applications s1, 77, 116, 163, 193,233,259
- Shimotomai M., Shinohara Y., Igari S. 2006, The Development of the IV Measurement by Pulsed Multi-flash, and the EffectivenessIEEE 4th World Conference
- Singh P., Ravindra N., 2012, Temperature dependence of solar cell performance—an analysis, Solar Energy Materials and Solar Cells, sayı 101, s. 36-45
- Sterhov I., I Yu Loshkarev Y. 2019, Determination of the proportion of natural light in solar radiation using the method of conversion of lighting units into energy, Journal of Physics

- Sulc J., Jelinkova H., 2013 Solid-state lasers for medical applications, Lasers for Medical Applications, Diagnostics, Therapy and Surgery, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Pages 127-176
- Tahir Y., Khan M., Faizan M. 2022, Analytical model for blocking ultraviolet radiation on photovoltaic module, Revue Roumaine des Sciences Techniques
- Taira T., Tulloch W., Byer R., 1997, Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb: YAG lasers, Applied Optics Vol. 36, Issue 9, pp. 1867-1874
- Tavakoli M., Jagantigh F., Zarookian H., 2021 Adjustable high-power-LED solar simulator with extended spectrum in UV region, Solar Energy
- Wagner F., 2018, Fusion energy, MRS Energy & Sustainability, Materials Research Society: A Review Journal s1-16
- Wang W., Laumert B., 2014 Simulate a 'Sun' for solar research: a literature review of solar simulator technology. DiVA
- Willmott P. Huber J. 2000, Pulsed laser vaporization and deposition, Review of. Modern Physics, American Physical Society 72, 315
- Xu J., Woodyard J., 2000, Investigation of carbon arc source as an AM0 solar simulator for use in characterizing multijunction solar cells, Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference

8. EKLER

EK 1:

Antalya Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren ve PVC kapı ve pencere doğramaları üreten firmanın ar-ge bölümü için aldığı güneş benzeteçine ait teknik şartname (değişiklik yapılmadan eklenmiştir). Firma ile iletişime geçilmiş, kullandıkları cihazlara ait detayların paylaşılması hususunda bilgi sorulmuş, dönüş yapılmadığından benzeteçleri ve firma konusunda detay verilmemiştir.

Güneş Benzeteçi Teknik Şartnamesi:

1. Teknik Şartname

1.1 KSENON ARK LAMBALI, SUNI YAŞLANDIRMA CİHAZI

Cihaz en fazla 17,5 kW gücünde, ISO 4892 Bölüm 1 ve Bölüm 2'de verilen Özelliklere uygun olmalı ve ayrıca bu standardda verilen şartları sağlamalıdır. Bu standardda öngörülen cihaza ilişkin ilave özellikler aşağıda verilmiştir

1.1.1- Ksenon ark lambası, ISO 4892 Bölüm 2 Metot A'ya uygun, 280nm-800nm bandında geçen ışınlar için spektral ışıma yoğunluğu (550 ± 55) W/m², 280nm-800nm bandında geçen ışınlar için spektral ışıma yoğunluğu (60 ± 12) W/m² olan.

1.1.2- Deney kabini, deney parçalarının mandallarını tutmaya yarayan bir çerçeve ihtiva eden.

1.1.3- Püskürtme başlığı, ışınlanmış deney parçalarını belli bir süre üniform ve sürekli şekilde ıslatmaya yarayan.

NOT- Püskürtme ile ıslama esnasında katı polimer yüzeyine gevşek olarak tutunmuş tabakanın ovulup ayrılmasında gerekir. Bu nedenle püskürtülen damlacıkların boyutu ve hızı, katı malzemedeki aşınma en az olacak şekilde seçilmelidir.

1.1.4- Nem ayarlama düzeneği, istenen oranda bağıl nem sağlayan.

1.1.5- Sıcaklık ayarlama düzeneği, Deney hücresinin sıcaklığını kontrol etmede kullanılan

1.1.6- Siyah Standard Termometre (BST), ISO 4892 Bölüm 1 Madde 4.1.5.1.1'e uygun, cevap süresi 1 dakika'dan az ve bir döngü esnasındaki en yüksek sıcaklığı kaydedicisi olan.

1.1.7- Beyaz Standard Termometre (WST), ISO 4892 Bölüm 1 Madde 4.1.5.1.1'e uygun, cevap süresi 1 dakika'dan az ve bir döngü esnasındaki en yüksek sıcaklığı kaydedicisi olan.

1.1.8- Deney parçasının maruz kaldığı UV ışıma yoğunluğunun tayin edildiği cihaz 280nm-400nm dalga boyu aralığında kullanılan, J/m².

1.1.9- Deney parçasının maruz kaldığı UV ve görünür bölge ışıma yoğunluğunun tayin edildiği cihaz, 280nm-800nm dalga boyu aralığında kullanılan, J/m².

1.2 GRİ SKALA

Renk değişmelerinin değerlendirilmesi için kullanılan, EN 20105 A03'e uygun olan.

NOT - Bu gri skala aşığıdaki adreslerden temin edilebilir:



EK 2:

Antalya organize sanayide bulunan firmaya ait güneş yaşılandırma benzeteci ISO 4892 standardı

ISO 4892-2:2013/Amd.1:2021(E)

Table C.1 — Relative spectral irradiance of xenon-arc lamps with daylight filters (method A)^a

Spectral pass-band wavelength λ nm	General ^b		Type I ^c		Type II ^d		CIE No. 85:1989, Table 4 ^e %
	Min %	Max %	Min %	Max %	Min %	Max %	
$\lambda < 300$	2,60	8,05	0,00	0,20	0,20	1,05	5,40
$300 \leq \lambda \leq 320$			2,60	6,00	3,50	7,00	
$320 < \lambda \leq 340$	28,2	39,8	10,0	17,0	10,0	17,0	38,2
$340 < \lambda \leq 360$			18,3	23,2	18,3	23,2	
$360 < \lambda \leq 380$	54,2	67,5	25,0	30,5	25,0	30,5	56,4
$380 < \lambda \leq 400$			29,2	37,0	29,2	37,0	

^a This table gives the irradiance in the given passband, expressed as a percentage of the total irradiance between 290 nm and 400 nm. To determine whether a specific filter or set of filters for a xenon-arc lamp meets the requirements of this Table, the spectral irradiance must be measured from 250 nm to 400 nm. The total irradiance in each wavelength passband is then summed and divided by the total irradiance from 290 nm to 400 nm.

^b Values of the spectral passband of xenon-arc lamps with daylight filters according to Table 1.

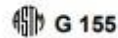
^c Daylight filter systems as described in ASTM D7869 fall under the definition of Type I Daylight filters.

^d Daylight filter systems as described in SAE J2527 fall under the definition of Type II Daylight filters.

^e Details of the solar reference spectrum can be found in Table 1.

EK 3:

KC için ASTM G155 standartı:



Filters—Filters are used to filter xenon arc lamp emissions in a simulation of terrestrial sunlight. The spectral power distribution of xenon arcs with new or pre-aged filters^{8,9} shall comply with the requirements specified in Table 1.

6.1.4 Other filters which allow more short wavelength UV are sometimes used to accelerate the test results. The spectra produced will fall outside of these limits in the short wavelength region. Use of these filters is not recommended.

6.1.5 **Spectral Irradiance of Xenon Arc With Window Glass Filters**—Filters are used to filter xenon arc lamp emissions in a simulation of sunlight filtered through window glass.¹⁰ Table 2 shows the relative spectral power distribution limits for xenon arcs filtered with window glass filters. The spectral power distribution of xenon arcs with new or pre-aged filters shall comply with the requirements specified in Table 2.

6.1.6 The actual irradiance at the tester's specimen plane is a function of the number of xenon burners used, the power applied to each, and the distance between the test specimens and the xenon burner. If appropriate, report the irradiance and the bandpass in which it was measured.

⁸ Ketola, W., Skogland, T., Fischer, R., "Effects of Filter and Burner Aging on the Spectral Power Distribution of Xenon Arc Lamps," *Durability Testing of Non-Metallic Materials*, ASTM STP 1294, Robert Herling, Editor, ASTM, Philadelphia, 1995.

⁹ Searle, N. D., Giesecke, P., Kimmonth, R., and Hirt, R. C., "Ultraviolet Spectral Distributions and Aging Characteristics of Xenon Arcs and Filters," *Applied Optics*, Vol. No. 8, 1964, pp. 923-927.

¹⁰ Ketola, W., Robbins, J. S., "UV Transmission of Single Strength Window Glass," *Accelerated and Outdoor Durability Testing of Organic Materials*, ASTM STP 1202, Warren D. Ketola and Douglas Grossman, Editors, ASTM, Philadelphia, 1993.

TABLE 1 Relative Spectral Power Distribution Specification for Xenon Arc with Daylight Filters

Bandpass, nm	Xenon Arc with Daylight Filters ^{A,B}	Sunlight ^C
Ultraviolet Wavelength Region Irradiance as a percentage of total irradiance from 300 to 400 nm		
290–300	<1 %	0 %
301–320	2.1–6.4 %	5.6 %
321–340	11.1–15.0 %	18.5 %
341–360	19.4–23.3 %	21.7 %
361–380	26.3–29.3 %	26.6 %
381–400	30.6–36.4 %	27.6 %
Ultraviolet and Visible Wavelength Region Irradiance as a percentage of total irradiance from 300 to 800 nm ^D		
300–400	9.2–12.3 %	11 % ^E
401–700	64.0–77.3 %	72 % ^F

^AThere can be small, but significant irradiance below 290 nm for xenon arc lamps with daylight filters. The amount of this short wavelength UV radiation depends on the transmission and age of the filters used.

^BXenon arc data—The ranges given are based on spectral power distribution measurements made for water- and air-cooled devices with various lots and ages of daylight filters. The ranges given are based on three sigma limits from the averages of this data. Xenon arc filters that provide a spectral power distribution closer to sunlight than those that are shown in these tables are considered to meet the requirements of this standard.

^CSunlight data—The sunlight data is for global irradiance on a horizontal surface with an air mass of 1.2, column ozone 0.294 atm cm, 30 % relative humidity, altitude 2100 m (atmospheric pressure of 787.8 mb), and an aerosol represented by an optical thickness of 0.081 at 300 nm and 0.62 at 400 nm.

^DData from 701 to 800 nm is not shown.

^ESunlight data—The sunlight data is from Table 4 of CIE Publication Number 85, global solar irradiance on a horizontal surface with an air mass of 1.0, column ozone of 0.34 atm cm, 1.42-cm precipitable water vapor, and an aerosol represented by an optical thickness of 0.1 at 500 nm.

TABLE 2 Relative Spectral Power Distribution Specification for Xenon Arc with Window Glass Filters

Bandpass, nm	Xenon Arc with Window Glass Filters ^A	Estimated Window Glass Filtered Sunlight ^B
Ultraviolet Wavelength Region Irradiance as a percentage of total irradiance from 300 to 400 nm		
290–300	<0.1 %	0 %
301–320	0.0–3.3 %	0.1–1.5 %
321–340	1.9–14.3 %	9.4–14.8 %
341–360	18.8–23.0 %	23.2–23.5 %
361–380	27.5–34.1 %	29.6–32.5 %
381–400	31.8–46.7 %	30.9–34.5 %
Ultraviolet and Visible Wavelength Region Irradiance as a percentage of total irradiance from 300 to 800 nm ^C		
300–400	8.6–10.4 %	9.0–11.1 % ^D
401–700	64.2–80.8 %	71.3–73.1 % ^D

^AXenon arc data—The ranges given are based on spectral power distribution measurements made for water- and air-cooled devices with various lots and ages of window glass filters. The ranges given are based on three sigma limits from the averages of this data. Xenon arc filters that provide a spectral power distribution closer to window glass filtered sunlight than those that are shown in these tables are considered to meet the requirements of this standard.

^BSunlight data—The sunlight data is for global irradiance on a horizontal surface with an air mass of 1.2, column ozone 0.294 atm cm, 30 % relative humidity, altitude 2100 m (atmospheric pressure of 787.8 mb), and an aerosol represented by an optical thickness of 0.081 at 300 nm and 0.62 at 400 nm. The range is determined by multiplying solar irradiance by the upper and lower limits for transmission of single strength window glass samples used for studies conducted by ASTM Subcommittee G03.02.

^CData from 701 to 800 nm is not shown.

^DSunlight data—The sunlight data is from Table 4 of CIE Publication Number 85, global solar irradiance on a horizontal surface with an air mass of 1.0, column ozone of 0.34 atm cm, 1.42-cm precipitable water vapor, and an aerosol represented by an optical thickness of 0.1 at 500 nm. The range is determined by multiplying solar irradiance by the upper and lower limits for transmission of single strength window glass samples used for studies conducted by ASTM Subcommittee G03.02.

6.2 **Test Chamber**—The design of the test chamber may vary, but it should be constructed from corrosion resistant material and, in addition to the radiant source, may provide for means of controlling temperature and relative humidity. When required, provision shall be made for the spraying of water on the test specimen, for the formation of condensate on the exposed face of the specimen or for the immersion of the test specimen in water.

6.2.1 The radiation source(s) shall be located with respect to the specimens such that the irradiance at the specimen face complies with the requirements in Practice G 151.

6.3 **Instrument Calibration**—To ensure standardization and accuracy, the instruments associated with the exposure apparatus (that is, timers, thermometers, wet bulb sensors, dry bulb sensors, humidity sensors, UV sensors, radiometers) require periodic calibration to ensure repeatability of test results. Whenever possible, calibration should be traceable to national or international standards. Calibration schedule and procedure should be in accordance with manufacturer's instructions.

6.4 **Radiometer**—The use of a radiometer to monitor and control the amount of radiant energy received at the specimen is recommended. If a radiometer is used, it shall comply with the requirements in Practice ASTM G 151.

6.5 **Thermometer**—Either insulated or un-insulated black or white panel thermometers may be used. Thermometers shall conform to the descriptions found in Practice G 151. The type of thermometer used, the method of mounting on specimen

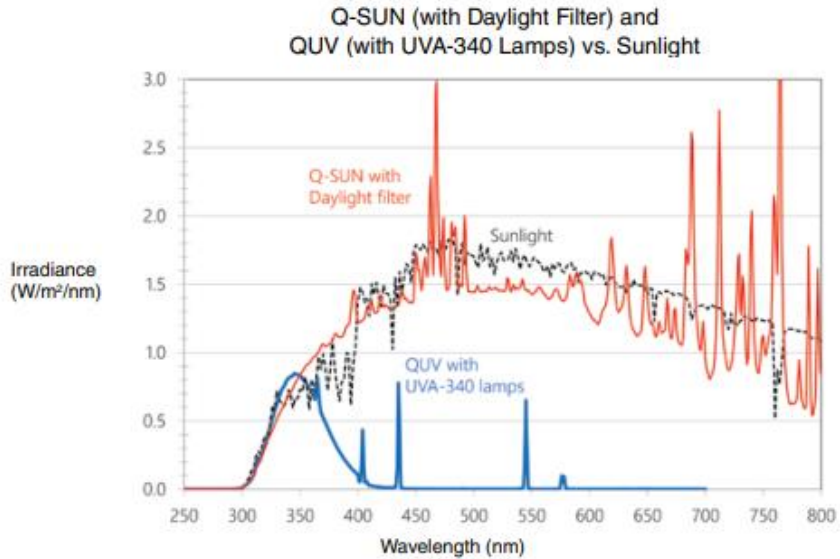
EK 4 :**KC tayfının güneş tayfıyla birlikte gösterimi****Q. What is the conversion factor between hours in a QUV tester and hours in a xenon test chamber?**

This is another simple question with no simple answer. The shapes of the spectral irradiance curve are different for each type of tester. Therefore, there is no mathematically valid procedure for computing a ratio of photodegradation power. In addition, different filters can be used in xenon testers, which make it even more difficult to make comparisons to a QUV.

In the same way, it is difficult to compare either one of these testers to a carbon arc tester. Again, the spectral irradiance curves are different. Results may vary depending on filters used, and also the kind of carbon arc used ("sunshine" vs. "enclosed").

Furthermore, the testers use moisture mechanisms that are fundamentally different.

Finally, laboratory weathering is material-dependent. A material that is vulnerable to visible light and longer-wave UV will usually degrade much more quickly in a xenon tester. But a material that is vulnerable to shorter-wave UV will usually degrade much more quickly in a QUV tester.



The light spectra from both the QUV and the Q-SUN match the sunlight spectrum closely. However, the QUV's fluorescent UV lamps emit only UV, while the Q-SUN's xenon arc lamps emit UV, visible light and infrared.



For sales, technical, or repair support, please visit:
Q-Lab.com/support

Westlake, Ohio USA • Homestead, Florida USA • Buckeye, Arizona USA
Bolton, England • Saarbrücken, Germany • Shanghai, China

LU-0833.2-EN © 2024 Q-Lab Corporation. All Rights Reserved.
Q-Lab, QUV, and Q-SUN are registered trademarks of Q-Lab Corporation.

EK 5 :

KC ksenon-ark lambaları:



replacement lamps and optical filters can reduce your operating costs significantly.

Why pay more for the same results?



Description	For Atlas Model			Q-Lab Part Number	Atlas Part Number
	Ci35/ Ci65	Ci4000/ Ci4400	Ci5000		
Type S Borosilicate Outer Filter	●	—	—	X-10893-K	20-2138-00
Water-Cooled Xenon Lamp, 6500 W	●	●	—	X-6500-K	20-6500-00
Type S Borosilicate Inner Filter	●	●	—	X-10891-K	20-2341-00
Quartz Inner Filter	●	●	—	X-10889-K	20-6506-00
Type S Borosilicate Outer Filter	—	●	—	X-10888-K	20-2796-00
Water-Cooled Xenon Lamp, 12000 W	—	—	●	X-12000-K	20-3053-00
Type S Borosilicate Inner Filter	—	—	●	X-10892-K	20-3132-00
Quartz Inner Filter	—	—	●	X-10890-K	20-3133-00
Type S Borosilicate Outer Filter	—	—	●	X-10894-K	20-3128-00

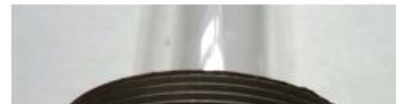
Table 1 - Xenon Lamp and Optical Filter Part Number Cross Reference



Full Coverage Warranty

Every Q-Lab xenon arc replacement lamp has been tested for ignition and inspected thoroughly for adherence to mechanical and electrical specifications. Q-Lab warrants that the lamps will continue to ignite during 2000 hours of normal operation within the 24 month period following the date of purchase. Both X-6500-K and X-12000 lamp kits include a water demineralizer cartridge, which must be replaced with each lamp change, to help improve lamp life.

Q-Lab Corporation shall not be liable for any incidental, consequential, special or contingent damages arising out of the sale or use of any product. NOTE: This warranty does not cover failure due to misuse, mishandling or any type of malfunction of an Atlas Weather-Ometer device.



EK 6 :

KC güç tüketim değerleri.

Operating Specifications

Models	Xe-1						Xe-2		Xe-3					
Configurations ¹	Xe-1-BE Xe-1-SE		Xe-1-BCE Xe-1-SCE		Xe-1-WE		Xe-2-HE Xe-2-HSE Xe-2-HBSE		Xe-3-HE Xe-3-HSE	Xe-3-HDSE ² Xe-3-HBSE	Xe-3-HCE Xe-3-HSCE			
Black Panel Temp ³ (°C)	BP	IBP	BP	IBP	BP	IBP	BP	IBP	BP	IBP	BP	IBP		
Light	45-90	50-100	25-90	25-100	45-90	50-100	50-100	55-105	45-110	50-120	35-110	36-120		
Light w/IR Filter	40-70	45-80	20-70	20-80	40-70	45-80	35-85	40-90	40-90	45-100	30-90	31-100		
Dark	25-50	25-50	10-50	10-50	25-50	25-50	25-45	25-45	25-50	25-50	15-50	15-50		
Light+Immersion	—	—	—	—	35-55	35-55	—	—	—	—	—	—		
Dark+Immersion	—	—	—	—	30-50	30-50	—	—	—	—	—	—		
Chamber Air Temp ^{3,4} (°C)	CAT		CAT		CAT		CAT		CAT		CAT			
Light (any filter)	35-55		15-55		—		35-65		35-65		25-65			
Dark	30-45		10-40		—		25-45		25-50		15-50			
Relative Humidity ⁵	N/A						20-95%							
Specimen Area	25 x 46 cm (d x w) (9.9 x 18.0 in)				22 x 42 cm (d x w) (8.8 x 16.5 in)		30 x 25 cm (h x dia) (11.9 x 9.8 in)		45 x 72 cm (d x w) (17.8 x 28.3 in)					
Specimen Capacity ⁶ (qty @ size)	17 @ 51 x 102 mm (2 x 4 in)				15 @ 51 x 102 mm (2 x 4 in)		31 @ 45 x 132 mm (1.8 x 5.2 in)		55 @ 51 x 102 mm (2 x 4 in)					
Max Specimen Weight (distributed evenly)	14 kg (30 lbs)						4.5 kg (10 lbs)		23 kg (50 lbs) ⁸					
Inlet Water Pressure and Purity ⁷	All non-"S", non-"W" models ¹ : 0.7-6.2 bar (10-90 psi); > 200 kD-cm; < 5 µS/cm; < 2.5 ppm TDS All "S" or "W" models: 2.1-6.2 bar (30-90 psi); > 5 MΩ-cm; < 0.2 µS/cm; < 0.1 ppm TDS; < 0.1 ppm colloidal silica													
Water Consumed with Spray On ⁹	0.12 L/min		0.12 L/min		0.001 L/min		0.5 L/min (front) 10 L/min (front & back)		0.16 L/min (front) 0.4 L/min (front & back)		0.16 L/min			
Water Consumed with Humidifier On ⁹	—		—		—		8 L/day		44 L/day		44 L/day			
External Dimensions ¹⁰ (w x h x d)	78 x 52 x 65 cm (31 x 21 x 26 in)		78 x 138 x 79 cm (31 x 55 x 31 in) Xe-1 & Chiller		99 x 72 x 65 cm (39 x 28 x 26 in)		91 x 166 x 69 cm (36 x 66 x 27 in)		91 x 178 x 99 cm (36 x 70 x 39 in)		78 x 94 x 94 cm (31 x 37 x 37 in) Chiller Only			
Weight ¹¹	50 kg (110 lbs)		124 kg (272 lbs)		88 kg (195 lbs)		172 kg (379 lbs)		190-233 kg (420-512 lbs)		85 kg (186 lbs) Chiller Only			
Electrical ¹² Requirements	208V (230V) 1-Φ @ 12 A (11 A) 400V		1-Φ @ 19 A (16 A)		1-Φ @ 13 A (12 A)		1-Φ @ 24 A (23 A)		3-Φ @ 39 A (39 A)		3-Φ @ 44 A (44 A)			
Lab Recommendations ¹²	Temperature (°C) Relative Humidity (%)						23 ± 5 °C 50 ± 25%							

Notes:

- 1) Nomenclature designations: basic (B), spray (S), humidity (H), dual spray (DS), chiller (C), back spray (BS), water immersion (W). Model (E) Q-SUN testers feature dual touchscreen displays and improved irradiance/lamp efficiency.
- 2) Model Xe-3-HDSE has a separate water reservoir that requires additional floor space (not shown in picture).
- 3) Achievable test conditions, including maximum and minimum setpoints and transitions between steps, are influenced by laboratory ambient conditions and interdependencies between test parameters.
- 4) CAT control is optional on Xe-1-BE and S models; BP/CAT can only be controlled simultaneously on Xe-2 and Xe-3 models.
- 5) The Xe-1 and Xe-3 specimen capacity shown is without specimen holders. Xe-2 specimen capacity is shown with specimen holders. Add one additional specimen to Xe-1 specimen capacity if CAT is used in place of BP/IBP.
- 6) Maximum specimen weight listed is for when the specimen tray is used. If the specimen tray is removed from the Xe-3, the chamber floor can hold evenly distributed specimens with a weight of 90 kg (200 lbs) max.
- 7) Maintain pH 6-8. For best performance, use a reverse osmosis/deionization (RO/DI) system for all S models.
- 8) Spray consumption applies to all S models; humidifier consumption applies to all H models. Water consumption values are greatly dependent upon test and lab conditions, and software settings. Values shown are typical for many common standards.
- 9) Rear Xe-3 vent duct is easily removed to reduce the depth from 99 cm (39 in) to 88 cm (34.5 in) to fit through small doors.
- 10) Actual shipping weights will be higher, depending upon model and whether the shipment is domestic, ocean or air.
- 11) Voltages shown are ± 10% and 50/60 Hz.
- 12) Operating outside these conditions can result in temperature, humidity, or other faults. Never operate in laboratory ambient conditions >36 °C or >80% RH.

Warranty

For important warranty information, visit [Q-Lab.com/Warranty](https://www.q-lab.com/Warranty).

For sales, technical, or repair support, please visit:

Q-Lab.com/supportWestlake, Ohio USA • Homestead, Florida USA • Wittmann, Arizona USA
Bolton, England • Saarbrücken, Germany • Shanghai, China

EK 7 :**SHG Kristal Verimlilikleri:**

Mironov S., 2010. Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission, s.192.

192

Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission

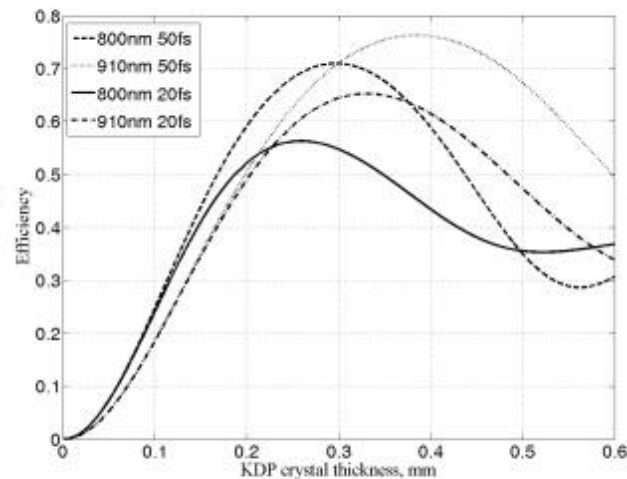


Fig. 1. The energy conversion efficiency vs KDP thickness, fundamental intensity $5\text{TW}/\text{cm}^2$

As can be seen from fig.1 optimal KDP crystal for effective SHG of 910nm, 50fs and $I=5\text{TW}/\text{cm}^2$ fundamental radiation is about 0.4mm, but the one for 800nm and the same parameters is about 0.3mm. The shorter pulses at the intensity level require thinner crystals. For instance, 20fs and 910nm the crystal length should be about 0.35mm, but for 800nm it is about 0.25mm. The right choice of nonlinear element thickness gives opportunity to obtain more than 50% efficiency of energy conversion even for 20fs, $5\text{TW}/\text{cm}^2$ fundamental radiation in KDP crystal.

The length of group velocity mismatch can be varied by means of changing parameters of frequency doubling element. Deuteration factor - D in DKDP crystals can be chosen during their growth stage. Refractive index of the crystal depends on the deuteration factor, and hence group velocities of fundamental and second harmonic pulses can be varied. In fig.2 we present dependence dispersion parameter $P(\lambda)$ from fundamental wave length at different level of deuteration factor in DKDP crystal. We used DKDP properties from the work (Lozhkarev, Freidman et al. 2005).

According to fig.2, dispersion parameter $P(\lambda)$ (calculated for DKDP crystal) is equal to zero only for one fundamental wave length. In this case group velocities of fundamental and second harmonic pulses are equal. Evidently, the situation is optimal for frequency doubling process. For the deuteration factor $D=0$ (KDP crystal) optimal central wave length of fundamental pulse is 1033nm. The increasing of deuteration factor leads to optimal wave length varying. The D range 0 - 1 corresponds to diapason of optimal wave lengths 1033-1210 nm. So, the level variation of the deuteration can be used for managing of dispersion properties of frequency doubling nonlinear element. The dependence of refractive index for KDP and DKDP crystals from temperature can not be used for managing of dispersion properties. At the present, the crystals are optimal for SHG of super powerful ultra short laser pulses. As far as, created from the crystals nonlinear elements can be done with large

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Yavuz KOCAOVA

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2018-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2013-2018	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 1989-1994	Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Müdür 2011-Devam Ediyor	Anora Medikal ve Endüstriyel Makina Ltd.Şti., Antalya
Müdür 2000-2009	Kocaova Sağlık Teknolojileri Ltd.Şti., Ankara
Müdür 1998-2000	RONTES Röntgen Servis Ltd.Şti., Ankara
Servis Mühendisi 1996-1998	İNCEKARA AŞ., Ankara
1994-1996	Askerlik
Teknisyen 1986-1988	Ankara Yüksek İhtisas Hastanesi, Ankara

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

Kocaova Y., Tuncel N., Unal N., Dose Reduction in Medical Radiography: Advancing Veterinary Diagnostic Solutions, *Qeios*, 2024 doi.org :10.32388/X7CKJS.3

