

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKUSTO-OPTİK ETKİLEŞİMİN İNCELENMESİ VE KIZILÖTESİ LAZER  
UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Ziya KESKİN**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. İbrahim Tuna ÖZDÜR**

**ARALIK 2022**







## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Mehmet Ziya KESKİN



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### AKUSTO-OPTİK ETKİLEŞİMİN İNCELENMESİ VE KIZILÖTESİ LAZER UYGULAMALARI

Mehmet Ziya KESKİN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim Tuna ÖZDÜR

Tarih: Aralık 2022

Akusto-optik cihazlar ışığın gücünü kontrol etmek için elektriksel sürücü sinyali kullanan elektro-optik cihazlardır. Akusto-optik cihazlar akusto-optik (foto-elastik) etkiye yani ses dalgasının ortamda osilasyonu sonucu yarattığı mekanik gerinim sebebiyle kırılma indisi değişmesinden yola çıkarak çalışmaktadır. Yaklaşık 100 yıllık bir tarihi olan akusto-optik etkileşim özellikle yüksek güçlü lazerlerin, yüksek tekrarlama frekanslarında, zamansal ve uzamsal kontrolü için kullanılmakla birlikte mevcut teknolojide en etkin çözümlerendir. Akusto-optik cihazlar günümüzde askeri ve havacılık, astronomi, telekom, endüstri, yarı iletken ve elektronik, bilgi teknolojileri, sağlık ve benzeri alanlarda; modülasyon, defleksiyon, Q-anahtarlama, frekans kaydırma, mod kilitleme, ayarlanabilir filtreleme ve benzeri amaçlarla özellikle kızılötesi bölgede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma akusto-optik etkileşimin teorisi, cihazların üretim prensipleri ve modellenmesi şeklinde üç temel bölümden oluşmaktadır. Oldukça geniş bir tarihe sahip bu alanda akusto-optik etkileşim ve uygulamaları üzerine hatırı sayılır miktarda makale, kitap ve patent

mevcuttur. İlk bölümde, bu kaynaklardan faydalanılarak akusto-optik etkileşimin tarihinden ve teorisinden bahsedilmiş ve cihazlarda yaygın kullanılan materyallere değinilerek akusto-optik cihazların gerçek hayat uygulamaları ile bağlantısı sağlanmıştır. Devamında akusto-optik cihazların çalışma prensipleri, hangi amaçlarla kullanıldığı ve işlevsel hale gelmesi için hangi üretim adımlarının izlenmesi gerektiği literatür araştırması ile aktarılmıştır. Akusto-optik etkileşimin teorisi ve cihazların üretimi için gerekli detaylar aktarıldıktan sonra lazerlerin kızılötesi bant özelinde temel parametrelerinden bahsedilerek elde edilen bilgi birikimi ile iki boyutlu akusto-optik ve piezoelektrik etkileşim modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modelleme işlemi için sonlu eleman metodundan faydalanan Comsol Multiphysics uygulaması kullanılmıştır. Oluşturulan model kullanılarak benzetimler yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Akusto-optik cihazlar ışığın zaman ve frekans özelliklerini değiştirmesinin yanı sıra hüzme ışına profilini şekillendirme amacıyla da kullanılabilir. Halihazırda akusto-optik cihaz içeren ve hüzme şekillendirmeye ihtiyaç duyan sistemlerde pahalı ve yer kaplayan optik elemanlar kullanılmaktadır. Son olarak, bu tür sistemlerde hüzme şekillendirme ihtiyacının akusto-optik cihazlarla nasıl giderilebileceğini görmek amacıyla, oluşturulan iki boyutlu akusto-optik cihaz modeli kullanılarak hüzme şekillendirme benzetimleri yapılmıştır. Gaussian ışına profiline sahip bir lazer hüzmesinin akusto-optik etkileşim sonrasında düzgün (uniform) dağılıma sahip bir ışına profiline dönüştürülmesi için yapılan benzetimler detaylandırılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akusto-optik etkileşim, Piezoelektrik etkileşim, Akusto-optik cihazlar, Kızılötesi, Hüzme şekillendirme.



## ABSTRACT

Master of Science

### EXAMINATION OF ACOUSTO-OPTIC INTERACTION AND INFRARED LASER APPLICATIONS

Mehmet Ziya KESKİN

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. İbrahim Tuna ÖZDÜR

Date: December 2022

Acousto-optic devices makes use of the electric drive signal to control the power of light. An acousto-optic device is based on the acousto-optic (photo-elastic) effect which dynamically changes refractive index of the medium by the oscillation of sound signal that causes mechanical stress. Acousto-optic devices are essential for temporal and spatial control of the high power lasers with high repetition frequencies, and they are one of the most effective solutions. In todays world, an acousto-optic device is extensively used in military and space, astronomy, telecommunication, industry, semiconductor and electronics, information technologies, health sector and more. Acousto-optic devices can be used for modulation, deflection, Q-switching, tunable filtering, frequency shifting and mode locking in optical applications especially for the infrared region. This study composes of three main sections: the theory of acousto-optic interaction, principles of manufacturing of acousto-optic devices and modelling. There are considerable number of articles, books, and patents in acousto-optics field due to its wide history. In the first section, the theory of acousto-optic interaction is

explained by making use of the literature, subsequently common materials used in acousto-optic devices are mentioned and the connection with the real-life applications is made. In the next section, the types of acousto-optic devices, operation principles of modulators and manufacturing steps followed are explained using the literature. After the theory of the acousto-optic interaction and the necessary details for the manufacturing of the devices are given, the basic parameters of the lasers in the infrared band are mentioned, and the two-dimensional acousto-optic and piezoelectric modeling studies are carried out. The analysis is made using Comsol Multiphysics application, which employs the finite element method. Using the created model, simulations are made and obtained results are interpreted. Besides, being used for modification of the time and frequency features of light, acousto-optic devices can also be used to shape the beam radiation profile. Some systems use expensive and area consuming optic elements while already utilizing an acousto-optic device. Finally, the previously created two-dimensional acousto-optic device model is used for the simulation of the beam shaping capability of acousto-optic devices in this type of systems. Simulations are made for converting a laser beam having a Gaussian radiation profile into a uniform radiation profile where the obtained results are examined.

**Keywords:** Acousto-optic interaction, Piezoelectric interaction, Acousto-optic devices, Infrared, Beam shaping.

## TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans alıŐmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni her zaman yönlendiren hocam Do. Dr. İbrahim Tuna ÖZDÜR'e, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Doç. Dr. Ziya Gürkan FİGEN'e, sayın jüri üyelerine, destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>TEZ BİLDİRİMİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>xi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>1</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. AKUSTO-OPTİK ETKİLEŞİM</b> .....	<b>5</b>
2.1 Akusto-Optik Etkileşimin Tarihi.....	5
2.2 Akusto-Optik Etkileşimin Teorisi.....	9
2.2.1 Raman-Nath etkileşimi.....	10
2.2.2 Bragg etkileşimi.....	13
2.3 Akusto-Optik Materyaller.....	17
2.4 Piezoelektrik Etkileşim ve Materyaller.....	20
<b>3. AKUSTO-OPTİK CİHAZLAR</b> .....	<b>23</b>
3.1 Kristal Büyütme İşlemleri.....	25
3.2 Kristal Yönelimi ve Kesme İşlemleri.....	25
3.3 Kristal Yüzey Cilalanması.....	26
3.4 Yansıma Engelleyici Kaplama.....	26
3.5 Piezoelektrik Transdüser İşlemleri.....	27
3.5.1 Akustik empedans eşleme.....	28
3.5.1.1 Yapışkan ile bağlama.....	30
3.5.1.2 Isıl baskı ile bağlama.....	30
3.5.1.3 Soğuk vakum baskı ile bağlama.....	31
3.5.1.4 Optik kontakt ile bağlama.....	31
3.5.2 Kristal inceltme.....	32
3.5.3 Üst elektrod kaplaması.....	32
3.6 Son İşlemler.....	34
3.6.1 Elektriksel empedans eşleme.....	34
3.6.2 Tel bağlama.....	35
3.6.3 Akustik absorbe edici.....	36
3.6.4 Kutulama.....	36
3.6.5 RF sürücü devresi.....	37
<b>4. AKUSTO-OPTİK ETKİLEŞİMİN MODELLENMESİ</b> .....	<b>39</b>
4.1 Kızılötesi Lazer.....	39
4.2 Sonlu Eleman Metodu.....	42
4.3 Modelleme Çalışmaları.....	44

4.3.1 Piezoelektrik etkileşim benzetimi .....	45
4.3.2 Akusto-Optik etkileşim benzetimi .....	47
4.3.3 Hüzme şekillendirme benzetimi.....	51
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>65</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	Error! Bookmark not defined.



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Bragg kırılımının şematığı (üst) ve Bragg kırılımını sağlayan yapıcı girişim şartı şematığı (alt). .....	6
Şekil 2.2 : Debye-Sears ve Lucas-Biqard deneyleri sonucu elde edilen bir çok dereceye kırılım (Raman-Nath kırılımı).....	8
Şekil 2.3 : Kartezyan koordinat sisteminde kristal yönelimleri örnekleri (sol) ve kristallerin düzlem isimlendirmeleri örnekleri (orta ve sağ).....	18
Şekil 2.4 : AO materyal olarak $36^\circ$ X-kesim kristal kuvars kesim örneği.....	20
Şekil 2.5 : PE materyal olarak örnek $36^\circ$ Y-kesim $\text{LiNbO}_3$ geometrisi.....	22
Şekil 3.1 : Standart bir AO modülatör bileşenleri şematığı. ....	24
Şekil 3.2 : Sıcak duvar Czochralski kristal büyütme metodu şematik diyagramı (sol), büyütme sonrası elde edilen külçe formundaki $\text{TeO}_2$ kristali (sağ).....	26
Şekil 3.3 : PET yapısı ve ısıl baskı ile bağlama adımları, akustik empedans eşleme ve yapıştırma katmanların ile birlikte metalik katman uygulaması (A), PE katmana uygulanan metalik yapıştırma katmanı (B), Yapıştırma işlemi sonrası AO ve PE kristalin görünümü (C).....	31
Şekil 3.4 : Üst elektrod geometrisinin kırılma etkinliğine etkisi, apodize kaplama (A, kırmızı), standart dikdörtgensel kaplama (B, siyah).....	33
Şekil 3.5 : Safir ve YAG alttaşları için $36^\circ$ Y-kesim $\text{LiNbO}_3$ PE kristali ile akustik empedans eşleme bölgesi, bağlama katmanları ve elektrodları ile bir yenilikçi bir PET yapısı tasarımı örneği.....	34
Şekil 3.6 : AO cihaz tasarımı örnek şematığı ve bileşenlerinin isimlendirilmesi .....	35
Şekil 3.7 : Piyasada satılan bir AO modülatörün kasa içi görünümü. ....	36
Şekil 3.8 : Kutulu AO cihaz örnekleri.....	37
Şekil 3.9 : RF sürücü sinyali örneği .....	38
Şekil 3.10 : Modülasyon sinyali ve modülasyon uygulanmış RF sürücü sinyali örneği.....	38
Şekil 4.1 : Gaussian hüzmünün enine yoğunluk dağılımı (sol), iki boyutlu karşıdan görünümü (orta), optik yol üzerinde hareketi (sağ) .....	40
Şekil 4.2 : Hüzme genişliği $W(z)$ 'nin alınan optik yol ile değişimi .....	41
Şekil 4.3 : Gaussian hüzmünün dalga cepheleri .....	42

Şekil 4.4 : Ses frekansı 20 MHz için PE etkileşim ile elde edilen akustik basınç dağılımı.....	46
Şekil 4.5 : Ses frekansı 20 MHz için PE etkileşim ile elde edilen parçacık hız dağılımı.....	46
Şekil 4.6 : Ses frekansı 20 MHz için PE etkileşim ile elde edilen akustik yoğunluk dağılımı.....	46
Şekil 4.7 : Ses frekansı 20 MHz için PE etkileşim ile elde edilen dağılımın kırılma indisi karşılığı.....	47
Şekil 4.8 : Kırılma indisi dağılımının $x = 0$ mm ekseninde enine kesiti .....	47
Şekil 4.9 : 2 boyutlu AO cihaz benzetim modelinin kırınım ağı olmadan etkileşim ortamı (sol), lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı (sağ).....	48
Şekil 4.10 : PE etkileşim ile üretilen kırınım ağı yapısı kullanılarak elde edilen AO etkileşim sonucu; etkileşim bölgesi görünümü (a), etkileşim ortamı (b), lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı (c).....	49
Şekil 4.11 : Teorik kırınım ağı yapısı kullanılarak elde edilen AO etkileşim sonucu; etkileşim bölgesi görünümü (a), etkileşim ortamı (b), lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı (c).....	49
Şekil 4.12 : Sinüzoidal kırınım ağı yapısı ile $\Delta n = 2.4 \times 10^{-4}$ ile elde edilen azami kırılma örneği ve lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı.....	50
Şekil 4.13 : Kare kırınım ağı yapısı ile $\Delta n = 2 \times 10^{-4}$ ile elde edilen azami kırılma örneği ve lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı.....	50
Şekil 4.14 : Sinüzoidal ve kare kırınım ağı yapılarının kırılma etkinliğine etkisi. ....	51
Şekil 4.15 : Işıması kenarlara doğru Gaussian eşitliğine göre azalan Gaussian ışırma profili (sol), ışırma profili düzgün dağılıma sahip (süper Gaussian) ışırma profili (sağ) [83].....	52
Şekil 4.16 : Giriş açısı $2\theta_B$ ve kırınım ağı $\theta_B$ açılı Bragg etkileşimi geometrisi.....	53
Şekil 4.17 : Hüzme şekillendirme benzetimleri için AO etkileşim ortamı görünümü.....	53
Şekil 4.18 : Tek frekansı ile oluşturulmuş kırınım ağı yapısı ile AO etkileşim benzetim sonucu; (a) kırınım ağı yapısı için enine kırılma indisi dağılımı, (b) kırınım ağı yapısı temsili frekans spektrumu, (c) etkileşim ortamı, (d) $x = 500$ mm'de elde edilen enine kesitte elektrik alan dağılımı.....	54
Şekil 4.19 : Birden fazla frekans ile oluşturulmuş kırınım ağı yapısı ile AO etkileşim benzetim sonucu; (a) kırınım ağı yapısı için enine kırılma indisi dağılımı, (b) kırınım ağı yapısı temsili frekans spektrumu, (c) etkileşim ortamı, (d) $x = 500$ mm'de elde edilen enine kesitte elektrik alan dağılımı.....	54



- Şekil 4.20 : Birden fazla frekans ile oluşturulmuş kırınım ağı yapısı ile AO etkileşiminin mesafeye bağlı analizi; etkileşim ortamı (sol),  $x = 500$  mm,  $x = 1000$  mm ve  $x = 1500$  mm’de elde edilen enine kesitte elektrik alan dağılımları (sağ)..... 55
- Şekil 4.21 : 1 MHz ile ayrılmış frekans bileşenleri ile elde edilen AO etkileşim benzetim sonuçlarının etkileşim ortamı görünümü; (a) 1 frekans bileşeni, (b) 5 frekans bileşeni, (c) 9 frekans bileşeni, (d) 13 frekans bileşeni, (e) 17 frekans bileşeni, (f) 21 frekans bileşeni. .... 56
- Şekil 4.22 : 1 MHz ile ayrılmış frekans bileşenleri ile elde edilen AO etkileşim benzetim sonuçlarının  $x = 500$  mm’de enine kesitte elektrik alan dağılımları; (a) 1 frekans bileşeni, (b) 5 frekans bileşeni, (c) 9 frekans bileşeni, (d) 13 frekans bileşeni, (e) 17 frekans bileşeni, (f) 21 frekans bileşeni..... 56
- Şekil 4.23 : Birbirinden 1 MHz ile ayrılmış frekans bileşenleri ile elde edilen AO etkileşim benzetim sonuçlarının kırılma indisi dağılımının enine kesiti; (a) 1 frekans bileşeni, (b) 5 frekans bileşeni, (c) 9 frekans bileşeni, (d) 13 frekans bileşeni, (e) 17 frekans bileşeni, (f) 21 frekans bileşeni. .... 57
- Şekil 4.24 : Sürücü frekans bant genişliğine bağlı  $x = 500$  mm’de enine kesitte elektrik alanın FWHM değerleri. .... 58
- Şekil 4.25 : RF sürücü sinyali 21 frekans bileşenine sahip iken kırılma indisi yapısının doğal hareketi sonucu etkileşim ortamının görünümü (sol),  $x = 500$  mm’de enine kesitte elektrik alan dağılımının değişimi (orta), AO etkileşim bölgesinin enine kesitte kırılma indisinin 1 boyutlu ve 2 boyutlu değişimi (sağ)..... 59
- Şekil 4.26 : RF sürücü sinyali 21 frekans bileşenine sahip ve efektif bölge sayısı arttırılmışken kırılma indisi yapısının doğal hareketi sonucu etkileşim ortamının görünümü (sol),  $x = 500$  mm’de enine kesitte elektrik alan dağılımının değişimi (orta), AO etkileşim bölgesinin enine kesitte kırılma indisinin 1 boyutlu ve 2 boyutlu değişimi (sağ)..... 60
- Şekil 4.27 : Çoklu frekans kırılımı sonucu elde edilen hüzme profilinin lens ile kolimasyonu (sol),  $x = 2000$  mm - lens öncesi [siyah] ve  $x = 2500$ mm’de [mavi] elde edilen enine kesit elektrik alan dağılımları (sağ). .... 61
- Şekil 4.28 : Çoklu frekans kırılımı sonucu elde edilen hüzme profilinin lenssiz hareketi (sol),  $x = 750$  mm’de enine kesit elektrik alan dağılımı (sağ). .... 62
- Şekil 4.29 : Çoklu frekans kırılımı sonucu elde edilen hüzme profilinin hüzme genişletici lens düzeneği ile sonucu (sol),  $x = 750$  mm’de enine kesit elektrik alan dağılımı (sağ)..... 62



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1 : Dalga boyu bantları ve ilgili bantta serbest uzayda çalışan ticari ürünlerin AO materyalleri.....	17
Çizelge 2.2 : Yaygın kullanılan AO materyaller ve özellikleri.....	19
Çizelge 2.3 : Bazı yaygın kullanılan PE materyaller ve özellikleri .....	21
Çizelge 3.1 : Yaygın kullanılan elektrod ve bağlama materyallerinin akustik özellikleri.....	29



## KISALTMALAR

<b>AO</b>	: Akusto-Optik
<b>AlN</b>	: Aluminyum Nitrat
<b>AR</b>	: Yansıtma Engelleyici (Anti-Reflective)
<b>AOM</b>	: Akusto-Optik Modölatör
<b>CdS</b>	: Kadmiyum Sülfür
<b>EO</b>	: Elektro-Optik
<b>FWHM</b>	: Yarı Değerde Tam Genişlik (Full Width at Half Maximum)
<b>Ge</b>	: Germanyum
<b>kHz</b>	: Kiloherzt
<b>KÖ</b>	: Kızılötesi
<b>LiIO<sub>3</sub></b>	: Lityum İyodat
<b>LiNbO<sub>3</sub></b>	: Lityum Niyobat
<b>MHz</b>	: Megahertz
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>PE</b>	: Piezoelektrik
<b>PbMoO<sub>4</sub></b>	: Kurşun Molibdat
<b>SEM</b>	: Sonlu Eleman Metodu
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Kaynaşık Silika / Kristal Kuvars
<b>TeO<sub>2</sub></b>	: Tellür Dioksit
<b>THz</b>	: Terahertz
<b>MÖ</b>	: Morötesi
<b>YAG</b>	: İttriyum Aluminyum Partaşı (Yttrium Aluminium Garnet)
<b>ZnO</b>	: Çinko Oksit
<b>W</b>	: Watt
<b>µs</b>	: Mikrosaniye



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$M_2$	Akusto-Optik Yararlılık Katsayısı (Figure of Merit)
$\theta_B$	Bragg Açısı
$\theta_0$	Dalga İraksama açısı
$m$	Derece Numarası
$E$	Elektrik Alan
$p$	Foto-Elastik Katsayı
$R$	Gaussian Hüzmesi Eğrilik Yarıçapı
$\zeta$	Gaussian Hüzmesi Faz Gecikmesi (Retardation)
$W$	Gaussian Hüzmesi Hüzme Genişliği
$M^2$	Gaussian Hüzmesi Kalite Faktörü
$S_{kl}$	Gerinim Genliği
$\theta_i$	Giriş Açısı
$W_0$	Hüzme Belinde Hüzme Genişliği
$k_m$	Işık Dalga Vektörü
$E_m$	Işık Genliği
$\lambda$	Işık Dalga Boyu
$\omega_0$	Işık Frekansı
$\lambda_0$	Işık Vakum Dalga Boyu
$k_0$	Işık Vakum Dalga Sayısı
$c_0$	Işık Vakum Hızı
$n$	Kırılma İndisi
$K_p$	Kuplaj Katsayısı
$J_m$	$m$ . Derecenin Bessel Fonksiyonunu
$\Delta n$	Mutlak Kırılma indisi değişimi
$c$	Ortamda Işık Hızı
$\rho$	Ortam Kütle Yoğunluğu
$\Omega_a$	Ses Frekansı
$\Lambda$	Ses Dalga Boyu
$K_a$	Ses Dalga Sayısı
$f_s$	Ses Frekansı
$I_s$	Ses Yoğunluğu
$v_s$	Ses Hızı





## 1. GİRİŞ

Akusto-optik (AO) cihazlar ışığın (genellikle lazer ışınının) gücünü kontrol etmek için elektriksel sürücü sinyali kullanan elektro-optik (EO) cihazlardır. AO cihazlar akusto-optik (foto-elastik) etkiye yani ses dalgasının ortamda salınımı (osilasyonu) ile yarattığı mekanik gerinim sebebiyle ortamın kırılma indisinin değişmesinden yola çıkarak çalışmaktadır [1-3]. Bu kırılma indisi değişimi sayesinde ışığın (özellikle lazerlerin) kontrolü sağlanabilmektedir. AO cihazlar yüksek güçlü lazerlerin nispeten hızlı zaman, frekans ve uzamsal kontrolü için elzem olmakla birlikte mevcut teknolojide en etkin çözümlerdendir.

2016 yılında yapılan ve 2015 yılını baz alan bir çalışmada, AO cihaz marketinin değeri 285.1 milyon \$ olarak biçilmiş, ve 2022 yılına kadar 469.1 milyon \$'a yükseleceği öngörülmüştür [4]. Aynı zamanda 2021-2026 yılları arasında yıllık bileşik büyüme oranı %7.24 olarak tahmin edilmiştir [5]. AO cihazlar günümüzde askeri ve havacılık, astronomi, telekom, endüstri, yarı iletken ve elektronik, bilgi teknolojileri, sağlık ve benzeri alanlarda; modülasyon, defleksiyon, Q-anahtarlama, frekans kaydırma, mod kitleme, ayarlanabilir filtreleme ve benzeri amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3, 6-8]. Fiber optik ve serbest uzay haberleşme sistemlerinde ışığın zamansal modülasyonu [9]; atmosferde gaz parçacıklarını algılama amacıyla kullanılan sistemlerde ışığın kontrolü ve filtrelenmesi [10]; endüstride materyal işleme sürecinde ışığın açısal ve zamansal kontrolü [11]; biyomedikal alanında tıbbi ve kozmetik amaçlı kullanılan sistemlerde ışığın zamansal ve uzamsal kontrolü [12- 15]; otonom algılama sistemlerinde lazerin açısal ve zamansal kontrolü [16, 17]; mikroskop ve teleskoplarda ışığın açısal, zamansal kontrolü ve filtrelenmesi [18-21]; çip üretiminde düzeneklerinde yazma, kazıma ve görüntüleme sürecinde lazer hüzmelerinin şekillendirmesi ve zamansal kontrolü [22]; savunma sektöründe hedef takip, işaretleme, gece görüş, yüksek güçlü lazer sistemlerinde, keşif ve algılayıcı sistemlerde ve benzeri uygulamalarda ışığın zamansal, uzamsal ve frekans özelliklerini değiştirmek için yaygın olarak kullanılan akusto-optik cihazlar

sistemlerin elzem parçalarındandır [23-25]. AO cihazlar özellikle kızılötesi (KÖ) bantta geniş çaplı kullanıma sahiptir [26-29]. AO cihazlar elektro-optik sistemlerin kritik bileşenlerinden olmakla birlikte, radyo-frekans alanında da muhtelif kullanım alanlarına sahiptir [30-35].

AO etkileşim oldukça geniş bir tarihe sahiptir, teorisi ve uygulamaları üzerine ise hatırı sayılır miktarda makale, kitap ve patent mevcuttur. İlk bölüm bu geniş tarihi ve teoriyi kısa ve öz bir şekilde anlatmaya çalışmaktadır. AO etkileşimin yaklaşık yüz yıl önce başlayan tarihinden kısaca bahsedilerek başlayan ilk bölümün devamında, literatürde bulunan diğer kaynaklardan da faydalanılarak, dalga denkleminin AO etkileşim ortamı için çözülmesi sonucu Raman-Nath ve Bragg kırınımı olmak üzere iki ayrı alt başlık halinde teorisi incelenmiştir. Teorinin incelenmesi ile AO cihazların bazı kritik deneysel parametreleri ortaya çıkartılmış ve etkileşimi karakterize eden önemli eşitlikler elde edilmiştir. Doğada bulunan her materyalde AO etkileşim gerçekleşmediği için, AO etkileşimin daha etkin gerçekleşeceği AO materyallerden bahsedilmiş ve yaygın kullanılan materyaller hem AO cihaz üreten firmalardan hem de literatür araştırması ile aktarılmıştır. Son olarak, AO etkileşimin temel yapı taşı olan piezoelektrik (PE) etkileşime ve bu etkileşim ile AO etkileşim ortamında akustik dalgaların yaratılmasını sağlayan PE materyallere değinilerek AO etkileşimin gerçek hayat uygulamaları ile bağlantısı sağlanmıştır. Bu çalışmanın bir sonraki bölümünde akusto-optik cihazların çalışma prensiplerinden ve farklı AO cihazların hangi amaçlarla kullanıldığından bahsedilmiştir. Daha sonra bir AO modülatörün işlevsel hale gelmesi için hangi üretim adımlarının izlenmesi gerektiği literatür araştırması ile sırasıyla aktarılmıştır. Üretim süreci kısaca PE ve AO materyallerin sentetik olarak büyütülmesi ile başlar. Daha sonra materyaller uygulamaya göre seçilen yönelimlerde ve uygun geometride kesilir ve parlatılır. Materyallerin yüzeylerine optik ve akustik kaplamalar yapılarak PE ve AO materyaller birleştirilir. PE materyal gerekli kalınlığına inceltirilerek metalik kaplamalar tamamlanır. Son olarak, metalik elektrodları sürececek olan RF sürücü devresi ile ilgili işlemler tamamlandıktan sonra cihaz hazır hale gelir.

Çalışmanın son kısmında, önceki bölümlerde elde edilen teori ve üretim altyapısından hareketle modelleme çalışması yapılmıştır. Öncelikle, modelleme çalışması lazer ışınması üzerinden gerçekleştiği için, lazerlerin kızılötesi bant özelinde temel

parametrelerinden bahsedilerek modellenmenin lazer kısmı ile ilgili bilgi birikimi elde edilmiştir. Daha sonra modelleme çalışmasının gerçekleştirildiği ortam olan Comsol Multiphysics'in problemleri çözmek için kullandığı sonlu eleman metodunun temel çalışma adımlarından bahsedilmiştir. İki boyutlu modelleme çalışması üç temel başlıktan oluşmaktadır. İlk kısımda PE etkileşim modellenerek AO etkileşim ortamında kırınım ağlarının nasıl yaratıldığı gösterilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Daha sonra elde edilen kırınım ağı yapısı ile AO etkileşim benzetimler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aktarılmıştır. Akusto-optik cihazlar ışığın zaman ve frekans özelliklerini değiştirmesinin yanı sıra hüzmeye ışınma profilini şekillendirme amacıyla da kullanılabilir. Halihazırda akusto-optik cihaz içeren ve hüzmeye şekillendirmeye ihtiyaç duyan sistemlerde pahalı ve yer kaplayan refraktif / difraktif optik elemanlar kullanılmaktadır. Son olarak, bu tür sistemlerde hüzmeye şekillendirme ihtiyacının akusto-optik cihazlarla nasıl giderilebileceğini görmek amacıyla, oluşturulan iki boyutlu akusto-optik cihaz modeli kullanılarak hüzmeye şekillendirme benzetimleri yapılmıştır. Gaussian ışınma profiline sahip bir lazer hüzmelerinin akusto-optik etkileşim sonrasında düzgün (uniform) dağılıma sahip bir ışınma profiline dönüştürülmesi için yapılan benzetimler detaylandırılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.



## 2. AKUSTO-OPTİK ETKİLEŞİM

### 2.1 Akusto-Optik Etkileşimin Tarihi

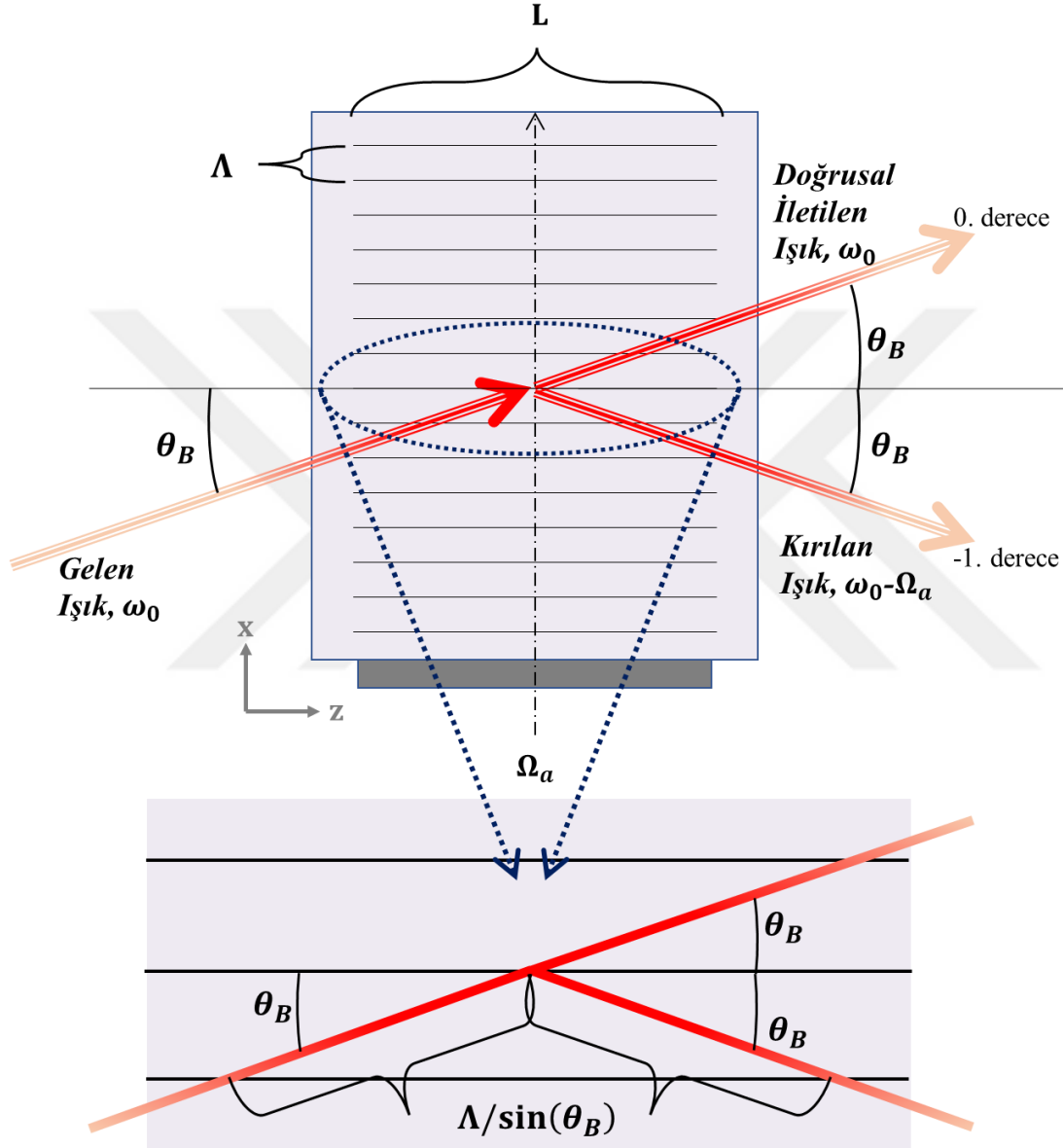
AO etkileşiminin tarihi, Fransız fizikçi Leon Brillouin'in 1922 yılında sıvı ve katılardaki termal akustik dalgalanmaların ışık veya x-ray kullanarak belirlenebileceğini öne sürmesi ile başlar [36-38]. Brillouin, sesin hareket ettiği ortamda neden olduğu yoğunluk değişimleri sonucu ortamın dielektrik sabitinde küçük miktarda değişimler yaratmasını modellemiştir. Böyle bir ortama gelen ışığın nasıl bir değişime uğrayacağı probleminin çözümünü ise polarizasyonu gelen ışık tarafından belirlenmiş, zamanda ve uzayda modüle edilen saçılan kaynakların dağılımı olarak formüle etmiştir [37]. Her bir saçılım küresel bir dalga yaymakta ve toplam saçılan alan ise tüm kaynakların toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu yaklaşımın uygulanabilir olmasının esas sebebi ortamdaki ses hızının/frekansının ışık hızına/frekansına göre çok daha yavaş/küçük kalması sonucu sesin yarattığı değişimlerin sabit olarak kabul edilebilmesidir (muhtelif uygulamalarda <1GHz'e karşın ~200THz) [1]. Şekil 2.1 Brillouin tarafından öngörülen geometrinin modern bir çizimini göstermektedir [37]. Görüldüğü üzere ses dalgaları yukarı yönlü (x ekseninde) hareket etmekte ve ışık sol taraftan (z ekseninden) gelmektedir. Işık yapıcı girişim (interferans) şartını sağlayan  $\theta_B$  açısı ile gelmekte ve aynı açı ile kırılmaktadır. Işığın kırılımının yapıcı girişim ile sonuçlanması için sesin yarattığı kırınım ağı (diffraction grating) yapısında aldığı mesafenin ışık dalga boyunun tam katı olması gereklidir. Buna göre  $\Lambda$  ses dalga boyu,  $\lambda$  ışık dalga boyu ve  $k$  bir tamsayıyı ifade ederken girişim şartını sağlayan giriş açısı  $\theta_i$  için şu ifade elde edilebilmektedir:

$$\frac{2\Lambda}{\sin(\theta_i)} = k\lambda \quad (2.1)$$

$k = \pm 1$  durumunda elde edilen açı değeri Bragg açısı ( $\theta_B$ ) olarak adlandırılmaktadır. Elde edilen bu açı değeri çok küçük olduğu için  $\sin(\theta_B) \cong \theta_B$  yaklaşımı

uygulanabilmektedir. Buna göre  $v_s$  sesin ortamdaki hızı ve  $f_s$  sesin frekansı ise  $\theta_B$  için eşitlik (2.2)'de verilen ifade elde edilmektedir:

$$\sin(\theta_B) \cong \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda} = \frac{\lambda f_s}{2v_s} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1 : Bragg kırılımının şematığı (üst) ve Bragg kırılımını sağlayan yapıcı girişim şartı şematığı (alt).

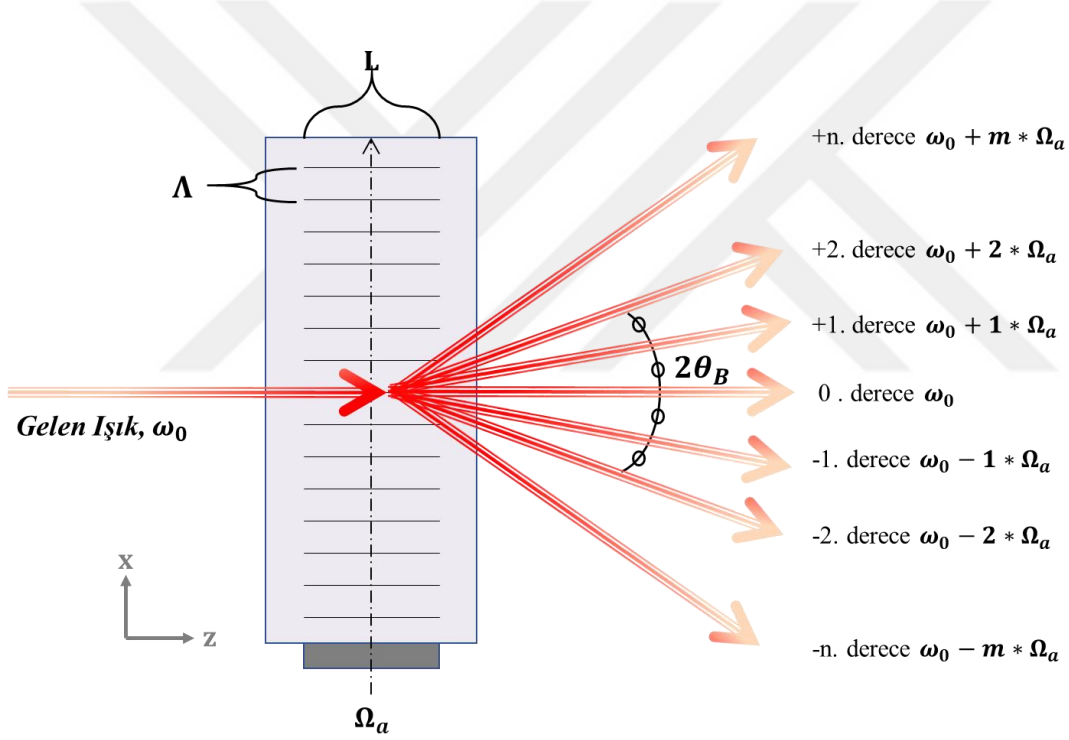
Brillouin tarafından elde edilen bir diğer çıkarım ise izotropik bir ortamda yaratılan kırılma indisi değişimi sonucu kırılan ışığın ( $\pm 1$ . derece) polarizasyonunun gelen ve doğrusal iletilen ışık (0. derece) ile aynı olacaktır [36]. Dolayısıyla, AO etkileşimde çoğu hesap ışık polarizasyonunu yoksayarak ve skalar işlemler ile gerçekleştirilebilir.

Brillouin son olarak insan üretimi yapay bir ses kaynağı kullanarak, özellikle Langevin tarafından ortaya çıkarılan piezoelektrik (PE) metodu ile ışığın kırılımının elde edilebileceğini öngörmüştür [37]. İlk deneysel sonuçların elde edilmesi teorisinin ortaya atılmasından yaklaşık 10 yıl sonra birbirinden bağımsız şekilde Amerikalı Debye-Sears [39] ve Fransız Lucas-Biquard [40] ikilileri tarafından gerçekleştirildi. Debye-Sears ve Lucas-Biquard tarafından gerçekleştirilen deneylerin geometrik çizimi Şekil 2.2’de sunulmaktadır [37]. Görüldüğü üzere, Brillouin’in öne sürdüğü  $\theta_B$  açısından ziyade, dereceler arasında  $2\theta_B$  kadar açı vardır. Bu deneylerde elde edilen sonuca göre Brillouin’in ifade ettiği kritik açı değerleri kırılma sonucu elde edilememektedir. Ayrıca, Brillouin’in bahsettiği 0. ve 1. derece ışığın yerine sesin kuvveti artırılması ile birçok derecenin ortaya çıktığı gözlenmişti. Debye ve Sears birden fazla derecenin ortaya çıkışını etkileşim bölgesinin ( $L$ ) çok kısa olmasından kaynaklandığını doğru şekilde tahmin etmiş ve daha iyi sonuç elde edebilmek için belirledikleri kritere göre  $L\lambda/\Lambda^2$  değerinin birden büyük olması gerektiğini belirtmişlerdir [37]. Bundan yaklaşık 35 yıl sonra, Klein ve Cook daha kapsamlı bilgisayar simülasyonları ile  $L\lambda/\Lambda^2$  kriterini bir miktar değiştirerek eşitlik (2.3)’te verilen Q kalite faktörünü (Klein-Cook parametresi) tanımladılar. Buna göre ışığın %90’ından fazlasının Bragg kırılımına uğrayabilmesi için Q değerinin  $2\pi$  değerinden yüksek olması gerektiğini öne sürdüler [41].

$$Q = \frac{2\pi L\lambda}{\Lambda^2} \quad (2.3)$$

Debye-Sears ve Lucas-Biquard ikilileri ışığın birçok dereceye kırılımını açıklayamamış olsa da, Brillouin 1933 yılında bu olayın ışığın tekrar saçılımından kaynaklandığını ileri sürmüştür [42]. Bu yıllardan sonra, ışığın ses ile kırılımının deneysel olarak da gözlemlenmesi ile, kırılım sonucu ortaya çıkan ışık dereceleri arasındaki ilişkiyi bulmak esas amaç haline gelmiştir. Raman ve Nath 1935-1936 yıllarında yayınladıkları makalelerde teorilerini basit bir kırınım ağı yapısı yaklaşımından, dereceler arasında gerçekleşen tekrarlı kırılımların tam bir çözümü haline getirmişlerdir [43-47]. Günümüzde Raman-Nath eşitlikleri olarak bilinen bu çözümler aynı zamanda Şekil 2.2’de gösterilen kırılıma adını vermiştir. Kırılan dereceler arasındaki döngüsel ilişkiyi türetmek için karmaşık bir matematiksel çözüm

getiren Raman ve Nath yerine Van Cittert fiziğe dayalı buluşsal bir yöntem kullanmıştır [48]. Bu yöntem, sesin yarattığı kırılma indisi değişimini sonsuz incelikte ışık yönüne dik dilimlere ayırmıştır. Böylece her bir dilim ince faz ağı gibi davranıp sonsuz inceliğinden dolayı gelen dalgayı ikiye ayıracaktır. Yeni oluşan bu iki dalga; gelen dalganın gücüyle, ses dalgasının gücüyle ve ışığın geliş açısındaki sonsuz incelikteki dilimin kalınlığı ile ilişkili olacaktır. Bu işlem dağılımdaki her bir düzlem dalga için tekrarlandığında sonuç sonsuz sayıda diferansiyel döngü ilişkisi, yani Raman-Nath denklemleri olacaktır [37]. 1960'lı yıllarda lazerin icadına kadar birçok araştırmacı aslında aynı matematiksel probleme (ışığın dikdörtgenel bir ses sütunu tarafından derecelere ayrılması) farklı açılardan yaklaşmıştır. Fakat, lazerin icadı ile AO alanının gidişatı olumlu anlamda değişmiştir.



Şekil 2.2 : Debye-Sears ve Lucas-Biqard deneyleri sonucu elde edilen bir çok dereceli kırılma (Raman-Nath kırılması).

Fotonların bir yükünün olmaması sebebiyle ışığın zamanda modülasyonu ve uzamsal olarak saptırılabilmesinin tek yolu ışığın geçtiği ortamın kırılma indisinin değiştirilmesidir [37]. Bu işlem direkt olarak EO (elektro-optik) etki ile veya dolaylı olarak AO etki ile başarılabilir. Elektro-optik etki ile elektrik gücü kullanılarak ortamın kırılma indisi doğrusal olarak değiştirilebilmektedir. AO etkinin EO etkiden bazı üstün özellikleri vardır. AO etkide ışığın saptırılması için doğrusal olarak sesin frekansının



değiştirilmesi oldukça fazla bir açısal ayırım sunmaktadır. EO etkiye nazaran AO etki ile ışık daha yüksek sönüm (extinction) oranları ile kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, AO kırılım sonucu ışığın frekansının kayması heterodin teknik kullanan uygulamalarda oldukça önemlidir. Yüksek güç yoğunluğuna sahip ve nispeten geniş lazer hüzmelerin hızlı bir şekilde kontrolünde ise AO cihazlar nerdeyse tek çözümdür. Lazerin icadıyla, AO cihazların öne çıkan özellikleri ve mevcut bilgi birikiminin hatırı sayılır seviyede olması sebebiyle AO alanında oldukça hızlı bir gelişme olmuş, teorik ve deneysel sonuçlar birbirinden ayrılmaz hale gelmiştir. Günümüzde, hem AO ve PE materyal hem de RF (Radyo-Frekans) konusunda ilerleyen teknoloji ile AO cihazlar birçok sektörde kullanılmaktadır.

## **2.2 Akusto-Optik Etkileşimin Teorisi**

AO etkileşim temelde bir optik dalganın akustik dalga ile olan etkileşimidir. Çünkü, bir optik dalganın varlığı akustik dalganın hareketini ve özelliklerini etkilememektedir. Bu sebeple AO etkileşime klasik optik metodolojisi ile bakıldığında, optik dalganın periyodik bir faz kırınım ağı yapısı ile etkileşimi şeklinde açıklanabilmektedir [37]. Standart bir faz kırınım ağı yapısı ve akustik kırınım ağı yapısı arasındaki temel fark ise akustik dalganın sesin materyal içerisindeki hızı ile hareket etmesidir. Bu hareket aynı zamanda optik dalgadaki Doppler frekans kaymasının da sebebidir. AO cihazlar izotropik ve anizotropik etkiye bağlı olarak ikiye ayrılabilir [2]. İzotropik etki izotropik kristallerde gerçekleşir. Bu etkileşimde gelen ve kırılan ışığın polarizasyonu değişmez ve maruz kaldıkları kırılma indisi aynıdır. Anizotropik AO etkileşim optik olarak anizotropik olan kristallerde gerçekleşir. Bu etkileşim sıradan (ordinary) ve sıradışı (extraordinary) optik dalgaların kırılımını içerir. Sıradan ve sıradışı dalgalar kırınım sonucu farklı kırılma indislerine maruz kalırlar, bu sebeple bu etkileşim ayrıca çift kırılımlı (birefringent) olarakta anlandırılır. Çift kırılımlı etkileşimlerde gelen ve kırılan ışık arasında  $90^\circ$  polarizasyon kayması mevcuttur [2]. Raman-Nath makalelerinde izotropik AO etkileşim üzerine çalışmıştır [43-47]. Bu kısımda da teori izotropik AO etkileşim üzerinden incelenecektir.

### 2.2.1 Raman-Nath etkileşimi

AO cihazlar, Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de gösterildiği üzere, Raman-Nath ve Bragg etkileşimi olmak üzere iki bölgede çalışmaktadır. AO etkileşim sonucu kırılan ışık hüzmesinin karakteristiği, optik dalganın AO kristal içerisinde ilerlemesini ifade eden dalga denkleminin çözülmesi ile elde edilebilir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de gösterilen etkileşim şematiğine göre, izotropik etkileşimde akustik dalga AO kristal içerisinde  $x$  ekseninde ilerlerken düzlemsel optik ışın  $x - z$  düzleminde,  $z$  eksenine  $\theta_i$  açısıyla ilerliyor ise dalga denklemi eşitlik (2.4)’te ifade edildiği şekilde yazılır. Eşitlik (2.5)’te ifade edilen kırılma indisi tanımı ve kırılma indisinin  $x$  ekseninde zamana bağlı olarak değiştiği baz alınarak eşitlik (2.6) elde edilir:

$$\left( c^2 \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (2.4)$$

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \left( \frac{n(x, t)}{c} \right)^2 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Akustik dalga düzlemsel ise AO etkileşim bölgesinin kırılma indis fonksiyonu  $n(x, t)$ , ortamın kırılma indisi  $n$ , kırılma indisi değişim genliği  $\Delta n$ , dalga sayısı  $K_a$ , akustik dalga frekansı  $\Omega_a$ , ortam fotoelastik sabiti  $p$ , ve gerinim genliği  $S_{kl}$  ile ifade edilirken şu şekilde tanımlanabilir [1, 2]:

$$n(x, t) = n + \Delta n \sin(\Omega_a t - K_a x) \quad (2.7)$$

$$\Delta n = \sqrt{0.5 p n^3 S_{kl}} \quad (2.8)$$

Dalga denkleminin çözümü mevcut durumda analitik formda gösterilemez, ama kırılma indisi fonksiyonu zaman ve uzayda periyodik olduğu için uyarılmış optik alan  $\mathbf{E}$  Fourier serisi ile açılarak dalganın propagasyonu hesaplanabilir.  $\mathbf{E}_m$  ve  $\mathbf{k}_m$  sırasıyla kırılan  $m$ . ışığın genliğini ve dalga vektörünü,  $\omega_i$  ve  $k_i$  ise gelen dalganın frekans ve dalga numarasını ifade ederken:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (\mathbf{E}_m(z) e^{j[(\omega_i + m\Omega_a)t - \mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}]} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r} = k_i(z \cos(\theta_i) - x \sin(\theta_i)) + mK_a x \quad (2.10)$$

Eşitlik (2.9) ve (2.10) AO etkileşim sonucu elde edilen ışık dağılımının düzlemsel dalgalar ile açılımını ifade etmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere kırılan  $\pm m$ . dalganın frekansı olan  $\omega_{dm}$ , AO etkileşim ve doppler etkisi sebebiyle  $m$ . harmonik frekansının kaymasına uğrayacaktır:

$$\omega_{dm} = \omega_i \pm m\Omega_a \quad (2.11)$$

Eşitlik (2.9) ve (2.10), eşitlik (2.6)'da yazıldığında Raman ve Nath tarafından elde edilen akuple dalga denklemlerine ulaşılacaktır [2];

$$\frac{dE_m}{dz} + \frac{u_1}{2L}(E_{m+1} - E_{m-1}) = j \frac{mK_a}{\cos(\theta_i)} \left[ \frac{mK_a}{2k_i} - \sin(\theta_i) \right] E_m \quad (2.12)$$

$$u_1 = -\frac{k_0 \Delta n L}{\cos(\theta_i)}, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2.13)$$

$L$ , AO etkileşimin gerçekleştiği ortamın  $z$  ekseninde genişliğini (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2),  $k_0$  ve  $\lambda_0$  sırasıyla ışığın serbest uzayda dalga sayısı ve dalga boyunu ifade etmektedir. Eşitlik (2.12)'nin çözümü ışığın kırılım derecelerinin optik dalga elektrik alanını vermektedir. Bu eşitlik çözülürken farklı optik dalgaların ortamda yol aldığı ve aralarında enerji transferi gerçekleştiği düşünülerek temel akuple dalga teorisi uygulanabilir [49]. Akustik dalgalar sinüzoidal ise optik dalgalar sadece komşu dalgalar ile enerji alışverişi yapabilir [2]. Bu durumda eşitlik (2.13)'de verilen  $u_1$  komşu dalgalar arasında kuplaj katsayısı olarak görülebilir. Transfer edilen enerji direkt olarak kuplaj katsayısı ve senkronizasyon derecesi ile orantılıdır. Eşitlik (2.12)'nin sağ tarafı açıldığında  $\frac{m^2 K_a^2}{2k_i \cos(\theta_i)}$  faktörü senkronizasyon derecesini ifade etmektedir [2]. Anlaşılacağı üzere, değer büyüdükçe  $\theta_i$ 'den kaynaklı dalgalar arası faz farkı büyücek ve transfer edilen enerji miktarı azalacaktır. AO etkileşim geometrisinde

ışığın ne kadarının sıfırdan diğer derecelere ayrılacağı, daha önce de bahsi geçen, Klein ve Cook tarafından tanımlanan Q parametresi kullanılarak eşitlik (2.14) ile anlaşılabilir. Q parametresi farklı yönlerde hareket eden parçalı dalgalar arasındaki faz farkını ölçmek için uygundur. Q parametresi eşitlik (2.12)'ye yerleştirildiğinde eşitlik (2.15) elde edilebilir [41]:

$$Q = \frac{K_a^2 L}{k_i \cos(\theta_i)} = \frac{2\pi \lambda_0 L}{n \Lambda^2 \cos(\theta_i)} \quad (2.14)$$

$$\frac{dE_m}{dz} + \frac{u_1}{2L} (E_{m+1} - E_{m-1}) = jAE_m \quad (2.15)$$

$$A = \frac{m^2 Q}{2L} - mK_a \tan(\theta_i) \quad (2.16)$$

Eşitlik (2.15)'ten anlaşılacağı üzere 0. dereceden yüksek miktarda ışığın  $\pm 1$ . dereceye transfer olabilmesi ancak eşitliğin sağ tarafındaki A bileşeninin olabildiğince küçük olmasıyla mümkündür. Buna göre  $\theta_i$  yaklaşık  $0^\circ$  ve Q değeri küçük ise, veya Q değeri büyük ve A değeri sıfıra yakınsıyorsa  $\pm 1$ . dereceye transfer gerçekleşebilir.  $Q \leq 0.3$  durumunda gerçekleşen AO etkileşim bir çok dereceye kırılım ile sonuçlanmakta ve Raman-Nath etkileşim bölgesi olarak değerlendirilmektedir (Şekil 2.2). Raman-Nath etkileşiminde ışık 0. dereceden  $\pm 1$ . dereceye,  $\pm 1$ . dereceden  $\pm 2$ . dereceye ve benzeri şekilde devam ederek diğer üst derecelere transfer olmaktadır. Her iki kırılım arasında  $\theta_m$  (Bragg açısının 2 katı) kadar açı vardır:

$$\theta_m \cong \pm m \frac{(\lambda_0/n)}{\Lambda} = 2\theta_B \quad (2.17)$$

$Q \leq 0.3$  için ve  $z = 0$  değerinde (etkileşim başlangıcında)  $E_0(0) = E_0$  ve  $E_m(0) = 0$  sınır değerleri kullanılarak eşitlik (2.12) çözülebilir:

$$E_m(z) = E_0 e^{-jmX} J_m \left[ \frac{2u_i \sin(X)}{K_a L \tan(\theta_i)} \right] \quad (2.18)$$

$$X = \frac{K_a z \tan(\theta_i)}{2} \quad (2.19)$$

Eşitlik (2.18)'de  $J_m$   $m$ . derecenin Bessel fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu eşitlik  $z = L$ , yani etkileşim bölgesinin sonunda çözülerek,  $E_m(L)E_m(L)^*$  ifadesi kullanılarak yoğunluk elde edilebilir.  $m$ . derecenin normalize ifadesi ise şu şekilde elde edilir:

$$I_k^m = \frac{I_m}{I_0} = J_m^2 \left[ u_1 \frac{2 \sin(K_a L \tan(\theta_i)/2)}{K_a L \tan(\theta_i)} \right] \quad (2.20)$$

$J_{-m}(u) = (-1)^m J_m(u)$  tanımını kullanarak eşitlik (2.20)'dan tüm giriş açı değerleri için kırılım deseninin aynı olduğu çıkarımında bulunulabilir. Raman ve Nath'ın belirttikleri üzere, elde edilen eşitlik üzerinden çıkış yüzeyi yoğunluk dağılımını incelendiğinde genlik modülasyonundan ziyade modülasyon derinliği  $u_1$  ile ifade edilebilen bir faz modülasyonunun mümkün olduğu söylenebilir [2].

### 2.2.2 Bragg etkileşimi

Günümüzde klasik cihazların büyük çoğunluğunun baz aldığı ve  $Q$  faktörünün 7'den büyük olduğu bölge Bragg etkileşim bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bragg etkileşiminde akustik kırınım ağı yapısı genişler ve AO etkileşim optik dalganın geliş açısına oldukça hassas hale gelir.  $Q$  değeri arttıkça geliş açısındaki hata toleransı da azalır. Enerji transferi aynı faza sahip optik dalgalar arasında en efektif gerçekleştiği için bu bölgede ışığın çoğu tek bir dereceye kırılabilir (Şekil 2.1). Işığın 1. dereceye azami oranda kırılabilmesi için eşitlik (2.16)'nın sifıra eşit olması gereklidir. Buna göre eşitlik eşitlik (2.21) ve (2.22) elde edilebilir:

$$\frac{m^2 Q}{2L} = m K_a \tan(\theta_i) \quad (2.21)$$

$$\tan(\theta_i) = \frac{\sin(\theta_i)}{\cos(\theta_i)} = \frac{mQ}{2K_a L} = \frac{m}{2K_a L} \frac{K_a^2 L}{k_i \cos \theta_i} \quad (2.22)$$

Bragg bölgesinde sadece tek bir dereceye kırılım olacağı için  $m = 1$  durumunda eşitlik (2.22)'deki ifade şu şekilde yazılarak yapıcı girişim için Bragg açısı şartı tekrardan elde edilebilir:

$$\sin(\theta_i) = \frac{K_a}{2k_i} = \frac{\lambda_0}{2n\Lambda} = \sin(\theta_B) \quad (2.23)$$

İdeal Bragg kırılımı için enerji alışverişi, gelen ışık  $E_0$  ve kırılan ışık  $E_k$  arasında gerçekleşir. Buna göre eşitlik (2.15),  $m = 0$  için eşitlik (2.25)'e indirgenebilir:

$$\frac{dE_m}{dz} + \frac{u_1}{2L}(E_{m+1} - E_{m-1}) = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{dE_0}{dz} + \frac{u_1}{2L}E_{\mp 1} = \frac{dE_0}{dz} - \frac{k_0\Delta n}{2\cos(\theta_i)}E_{\mp 1} = 0 \quad (2.25)$$

Mevcut durumda,  $\theta_i$  açısında  $\theta_B$  açısına yakinken eşitlik (2.15) şöyle yazılabilir:

$$\frac{dE_{\mp 1}}{dz} + \frac{u_1}{2L}E_0 = j\left(\frac{K_a\sin(\theta_B)}{\cos(\theta_i)} - \frac{K_a\sin\theta_i}{\cos(\theta_i)}\right)E_{\mp 1} = j\frac{2q}{L}E_1 \quad (2.26)$$

$$q = \frac{K_aL\sin\theta_B}{2\cos\theta_i} - \frac{K_aL\tan\theta_i}{2} \quad (2.27)$$

Eşitlikler (2.25) ve (2.26)'yı çözen Phariseau [50] şu çözümleri elde etmiştir:

$$E_1(z) = e^{-jqz/L} \left( \frac{u_1/2}{\sqrt{q^2 + (u_1/2)^2}} \right) \sin \left( \frac{z}{L} \sqrt{q^2 + \left(\frac{u_1}{2}\right)^2} \right) \quad (2.28)$$

$$E_0(z) = e^{-jqz/L} \left( \cos \left( \frac{z}{L} \sqrt{q^2 + \left(\frac{u_1}{2}\right)^2} \right) + j \frac{q}{\sqrt{q^2 + \left(\frac{u_1}{2}\right)^2}} \sin \left( \frac{z}{L} \sqrt{q^2 + \left(\frac{u_1}{2}\right)^2} \right) \right) \quad (2.29)$$

Kırılan derecenin normalize yoğunluk değeri  $I_k$ ,  $z = L$  için eşitlik (2.28) ve (2.29) çözümlere  $I_i$  girdi ışık yoğunluğunu ifade ederken şu şekilde hesaplanabilir:

$$I_k = 1 - I_i = \frac{(u_1/2)^2 \sin^2(\sqrt{q^2 + (u_1/2)^2})}{q^2 + (u_1/2)^2} \quad (2.30)$$

Eğer Bragg açısı tam olarak sağlanıyorsa ( $\theta_i = \theta_B$ ) bu durumda:

$$I_k = \sin^2\left(\frac{u_1}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{k_0 \Delta n L}{\cos(\theta_B)}\right) \quad (2.31)$$

Buna göre Raman-Nath ve Bragg bölgelerinde elde edilebilecek azami kırılma etkinliği eşitlikler (2.20) ve (2.31) kullanılarak karşılaştırılabilir. Ortama dik bir şekilde giren ( $\theta_i = 0$ ) ışık için eşitlik (2.20)  $I_i^m = J_m^2(u_1)$  şeklinde indirgenebilir. Buna göre, 1. derece için elde edilebilecek kırılma etkinliği  $J_1(u_1) = 0.58$  olduğu için %33.6 olarak hesaplanır. Raman-Nath bölgesinde gözlemlenen birden fazla dereceye kırılma durumu 1.dereceye kırılma oranını (etkinliğini) düşürmektedir. Aynı durum Bragg bölgesinde eşitlik (2.31) kullanılarak hesaplandığında  $u_1 = \pi$  için %100 etkinlik oranında tek bir dereceye kırılım elde edilebileceği görülmektedir.  $u_1$  parametresi akustik güç  $P_a(W)$  ve gerinim  $S_{kl}$  kullanılarak,  $\rho$  AO kristalin yoğunluğunu, ve  $H$  akustik hızının (aynı zamanda transdüser üst elektrodunun) yüksekliğini ifade ederken şu şekilde tekrardan yazılabilir [51, 52]:

$$P_a = 0.5\rho v_s^3 S_{kl} S_{kl}^* L H \quad (2.32)$$

Bunun yanı sıra, üst elektrod genişliği ( $L$ ) ve yüksekliğinin ( $H$ ) çarpımı akustik dalganın alanını ( $L * H$ ) tanımladığı için bu değer akustik güce oranı akustik yoğunluk  $I_a$  olarak ifade edilebilir [1]:

$$I_a = 0.5\rho v_s^3 S_{kl}^2 \quad (2.33)$$

Bu durumda Bragg bölgesi için normalize azami kırılma etkinliği  $I_k$ , eşitlik (2.31)'de verilen  $u_1$  yerine eşitlik (2.8) ve (2.32)'de kullanılarak elde edilecek eşitlik (2.34) ile şu şekilde ifade edilebilir:

$$u_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0 \cos \theta_i} \left( \frac{n^6 p^2}{\rho v_s^3} \right)^{0.5} \left( \frac{P_a L}{2H} \right)^{0.5} \quad (2.34)$$

$$I_k = \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda_0 \cos(\theta_i)} \left( \frac{n^6 p^2}{\rho v_s^3} \right)^{0.5} \left( \frac{P_a L}{2H} \right)^{0.5} \right) \quad (2.35)$$

Eşitlik (2.35) normalize kırılım ışık yoğunluğunu AO cihazın fiziksel, geometrik karakteristiğine ve akustik güce bağladığı için önemlidir. Pratikte kırılma etkinliği (KE)  $\eta$ ,  $u_1$ 'in küçük değerleri için şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\eta \cong \left( \frac{u_1}{2} \right)^2 = \frac{\pi^2}{2\lambda_0^2 \cos^2 \theta_i} \left( \frac{n^6 p^2}{\rho v_s^3} \right) \left( \frac{P_a L}{H} \right) \quad (2.36)$$

AO cihazın parametrelerinin çoğu sabit olduğu için, kırılma etkinliğini dinamik olarak değiştirebilecek parametreler frekans ve uygulanacak akustik güçtür. Frekans çoğu uygulama için sabit olduğundan,  $\eta$ 'nın birimi  $KE (\%) / Watt$ , birim güce düşen kırılma yüzdesi, şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik (2.36)'dan ayrıca bir yararlılık katsayısı ( $M_2$ , figure of merit) elde edilmektedir [52].  $M_2$  parametresi etkileşim geometrisinden bağımsız materyalin AO etkinliğinin bir ölçütüdür:

$$M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v_s^3} \quad (2.37)$$

Bir AO kristalin iyi bir  $M_2$  değerine sahip olması ile çok daha yüksek kırılma etkinliği elde edilebilir. Dolayısıyla, AO etkileşime yatkın materyallerin  $M_2$  değerleri yüksektir. Eşitlik (2.37)'den anlaşılacağı üzere, yüksek  $M_2$  için ise yüksek kırılma indisi ve foto-elastik sabit, ve düşük ortam yoğunluğunun yanısıra sesin ortamdaki hızında yavaş olması gereklidir. Aynı zamanda eşitlik (2.8) ve (2.33) kullanılarak akustik yoğunluk ve kırılma indisi arasında eşitlik (2.38)'de verilen bağıntı elde edilebilir [1]. Bu bağıntı akustik yoğunluk ile kırılma indisi değişim genliğini direkt olarak birbirine bağladığı için önemlidir.

$$\Delta n = \sqrt{0.5 M_2 I_a} \quad (2.38)$$



### 2.3 Akusto-Optik Materyaller

AO etkileşiminin karakteristiğini belirleyen en önemli parametrelerden biri etkileşim ortamıdır. Kullanılacak AO materyalin akustik ve optik özellikleri, ışığın geliş açısı, uygulanacak RF gücü, ışığın kırılma süresi, azami lazer gücü, ışığın polarizasyonu ve benzeri bir çok parametre etkileşim ortamı ile doğrudan ilişkilidir. Günümüzde ticari olarak satılan ürünlere bakıldığında boş uzayda AO modülasyon amacıyla morötesi (MÖ) bölgeden uzak dalga KÖ bölgeye kullanılan popüler AO materyaller mevcuttur. Çizelge 2.1 serbest uzay AO cihazları ticari olarak satan firmaların AO modülatör, deflektör, Q-anahtarlama, ve benzeri ürünlerinde kullandıkları AO materyalleri ürünlerin dalga boyu bantlarına göre vermektedir.

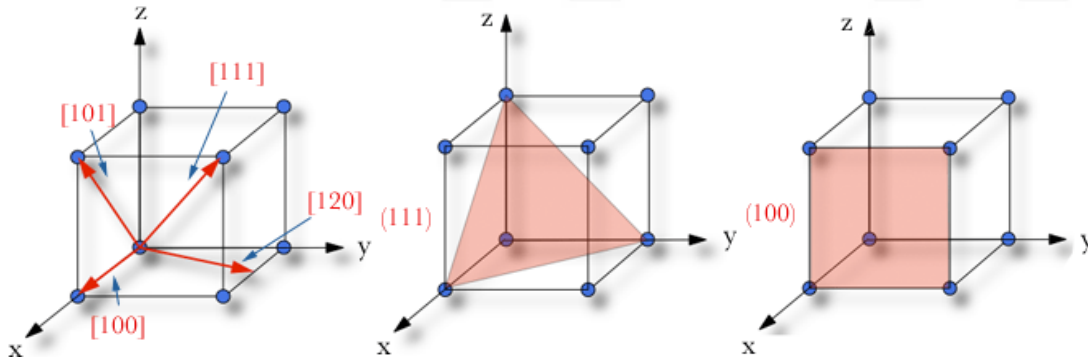
Çizelge 2.1 : Dalga boyu bantları ve ilgili bantta serbest uzayda çalışan ticari ürünlerin AO materyalleri.

Dalga Boyu Bandı		AO Materyaller
Morötesi	(<0.4µm)	Kaynaşık Silika <sup>2,3,4</sup> , Kristal Kuvars <sup>1,2,3</sup> , Tellür Dioksit <sup>2,3</sup>
Görünür	(0.4-0.75µm)	Kaynaşık Silika <sup>4</sup> , Kristal Kuvars <sup>1,2,3,4</sup> , Tellür Dioksit <sup>1,2,3</sup> , Kurşun Molibdat <sup>2</sup> , SF6 <sup>2,a</sup> , SF57 <sup>2</sup> , Galyum Fosfat <sup>3</sup> , İndiyum Fosfat <sup>3</sup>
Yakın KÖ	(0.75-1µm)	Kristal Kuvars <sup>1,2,3</sup> , Tellür Dioksit <sup>1,2,3,4</sup> , SF6 <sup>2</sup> , Kurşun Molibdat <sup>2</sup> , Germanyum <sup>3</sup> , SF10 <sup>2</sup> , AMM <sup>3</sup> , Galyum Fosfat <sup>3</sup> , İndiyum Fosfat <sup>3</sup>
Kısa Dalga KÖ	(1-2.5 µm)	
Orta Dalga KÖ	(3-5 µm)	Kristal Kuvars <sup>3</sup> , Tellür Dioksit <sup>3</sup> , Germanyum <sup>1,2,3</sup>
Uzak Dalga KÖ	(8-12 µm)	Germanyum <sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Gooch & Housego, <sup>2</sup>Isomet, <sup>3</sup>Brimrose, <sup>4</sup>AAoptoelectronic

Tablonun oluşturulmasında endüstriyel AO cihazlar satan firmalar (Gooch and Housego, Isomet, Brimrose, AAoptoelectronic) değerlendirilmiştir. Görüldüğü üzere genel olarak firmalar morötesi ve görünür bantta kaynaşık silika, kristal kuvars ve tellür dioksit; yakın ve kısa dalga KÖ bölgede kristal kuvars, tellür dioksit; orta ve

uzak dalga KÖ bölgesinde ise sıklıkla germanyum kullanılmaktadır. Çizelge 2.2, Çizelge 2.1’de göz önünde bulundurularak, yaygın kullanılan bazı AO materyallerin optik ve akustik özelliklerini vermektedir. Çizelgede görüldüğü üzere bu kristallerin farklı yönelimlerine göre farklı özellikleri mevcuttur. Dolayısıyla bazı yönelimlerde daha efektif AO etkileşimler elde edilebilmektedir. Örneğin kristal kuvars için farklı yönelimlere göre  $M_2$  değeri fotoelastik sabitteki değişimden kaynaklı olarak  $\sim 0.7$  ile  $\sim 3$  arasında değişmektedir [53]. Bunun yanısıra gelen ışığın polarizasyonunda önemlidir. Örneğin,  $\text{TeO}_2$  için ses yönü ve polarizasyonu  $[001]$ , ışık yönü  $[010]$  iken ışık polarizasyonu  $[100]$  için  $M_2$  değeri 34.5 ve ışık polarizasyonu  $[001]$  için  $M_2$  değeri 25.6 olarak hesaplanmaktadır [54]. Dolayısıyla ışığın polarizasyonuna göre kırılma etkinliği de değişmektedir. Farklı yönelimlerde sesin materyal içerisinde nasıl ilerleyeceğini ifade eden akustik mod da değişebilmektedir. AO cihazların PE materyal de dahil olmak üzere akustik modlarının yani yayılım yönlerinin uyumu gereklidir. Ayrıca, tabloda ifade edilen ses hızı ışığın yükselme zamanı ile ilişkili olduğu için oldukça önemlidir. Kristallerin yönelimleri Miller indeksleri kullanılarak üç boyutlu olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.3 kristallerin yönelimlerini ifade etmek için kullanılan indekslere birkaç örnek vermektedir [55].



Şekil 2.3 : Kartezyan koordinat sisteminde kristal yönelimleri örnekleri (sol) ve kristallerin düzlem isimlendirmeleri örnekleri (orta ve sağ) [55].

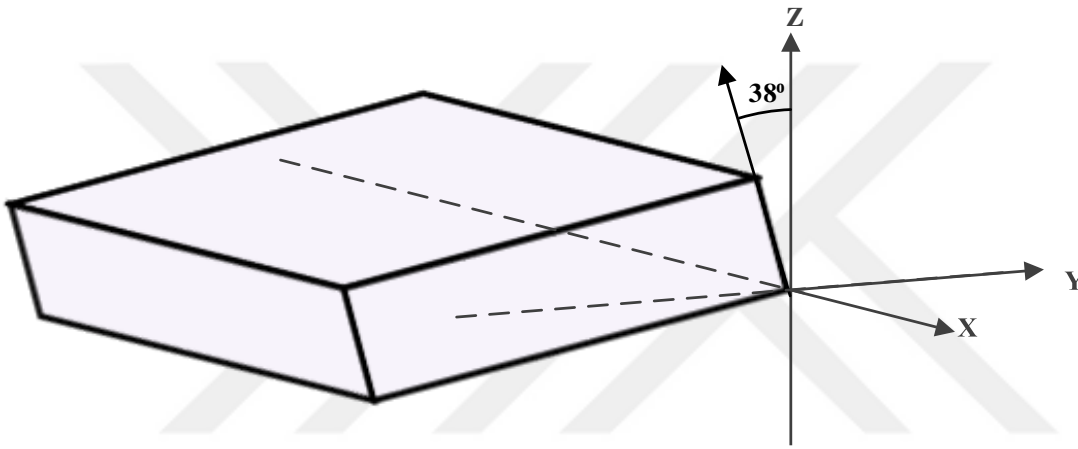
$(x,y,z)$  kartezyan kordinat sisteminde vektörler  $x$ ,  $y$  ve  $z$  bileşenlerine göre adlandırılmaktadır. Örneğin, sadece  $x$  yönünde olan bir vektör  $[100]$ , hem  $x$  hem de  $z$  yönünde eşit miktarda bileşeni olan vektör  $[101]$  olarak isimlendirilmektedir.  $[xyz]$  formatında ifade edilen yön vektörleri  $(xyz)$  formatında ifade edildiğinde ise ilgili vektöre dik olan düzlemi ifade etmektedir.

Çizelge 2.2 : Yaygın kullanılan AO materyaller ve özellikleri [3, 54, 56].

AO Materyal	Geçirgenlik ( $\mu m$ )	Yoğunluk, $\rho$ ( $\frac{g}{cm^3}$ )	Akustik Mod	Kırılma İndisi ( $\lambda = 2\mu m$ )	Ses Hızı, $v_a$ ( $\frac{mm}{\mu s}$ )	Akustik Empedans ( $Z = \rho * v_a$ )	$M_2$ ( $10^{-18} \frac{s^3}{g}$ )
Tellür Dioksit (TeO <sub>2</sub> )	0.35-5	6.02	L[001]	$n_o = 2.176$ $n_e = 2.313$	4.2	25.3	34.5
Tellür Dioksit (TeO <sub>2</sub> )	0.35-5	6.02	S[110]	$n_o = 2.176$ $n_e = 2.313$	0.62	3.73	1200
Kristal Kuvars (SiO <sub>2</sub> )	0.15-4.5	2.65	L	$n_o = 1.52$ $n_e = 1.528$	5.75	15.2	2.38
Kaynaşık Silika (SiO <sub>2</sub> )	0.2-4.5	2.2	L	1.4381	5.96	13.1	1.56
Kurşun Molibdat (PbMoO <sub>4</sub> )	0.4-5.5	6.95	L[001]	$n_o = 2.268$ $n_e = 2.177$	3.63	2.75	23.7
Germanyum (Ge)	1.5-22.0	5.33	L[111]	4.116	5.5	29.3	840

L: Longitudinal (Boylamsal), S: Shear (Transversal)

Örneğin,  $[100]$  vektörüne dik olan yüzey (100) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.4 bir AO uygulama için özel olarak kesilmiş bir kristal kuvars materyalinin örnek yönelimini vermektedir [53]. Görüldüğü üzere X (100) düzleminden  $38^\circ$ 'lik bir açı yapacak şekilde kesilmiştir bu yönelim  $36^\circ$  X-kesim olarak adlandırılmaktadır [53]. Bu kesimin fotoelastik sabiti ( $p$ ) dik ışık polarizasyonu için 0.328, paralel ışık polarizasyonu için 0.16 olarak belirtilmiştir. Buna müteakip  $M_2$  değerleri sırasıyla 3.066 ve 0.729 olarak hesaplanmıştır [53]. Bu durumda  $36^\circ$  X-kesim kuvars kristali AO uygulamada kullanılacaksa ışığın dik polarizasyonlu olması eşitlik (2.36)'dan da anlaşılacağı üzere daha etkin bir kırılım sağlayacaktır.



Şekil 2.4 : AO materyal olarak  $36^\circ$  X-kesim kristal kuvars kesim örneği.

## 2.4 Piezoelektrik Etkileşim ve Materyaller

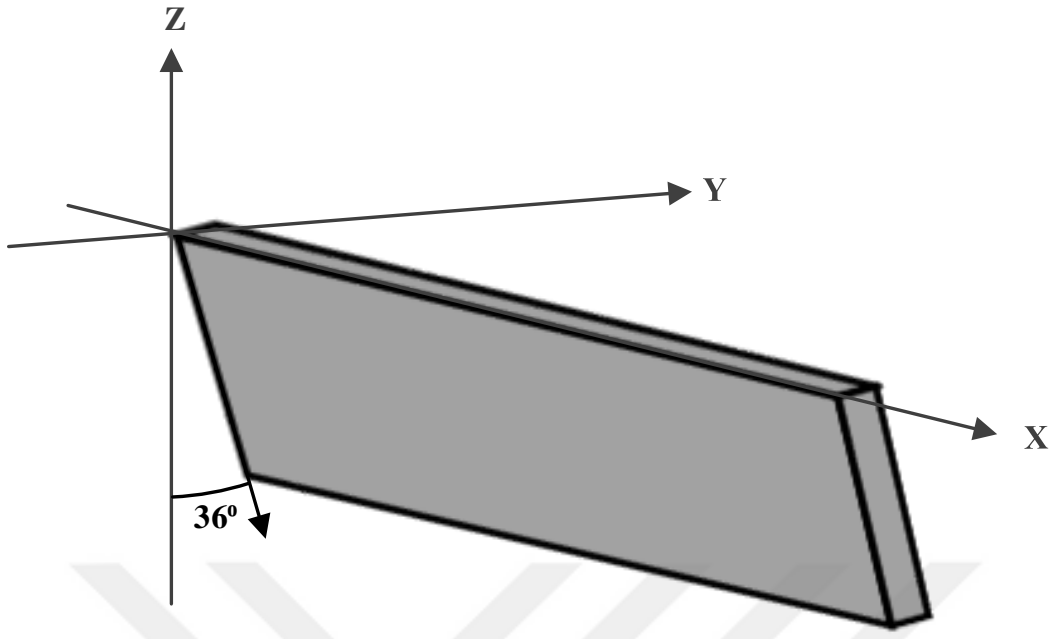
Piezoelektrik etki, PE özelliğe sahip materyallerde gözlemlenmektedir. PE materyaller ise temelde elektrik gücünü AO cihazda kullanılmak üzere akustik güce çevirmektedir. PE etki materyal üzerine binen mekanik stresten kaynaklı karşılıklı yüzeyler arasında bir potansiyel fark olarak veya bir PE materyalin iki yüzeyi arasına uygulanacak potansiyel fark sonucu materyalde oluşan mekanik stres şeklinde ortaya çıkabilir. PE materyallerde ortaya çıkan bu ikinci etki kullanılarak AO kristallerde kırınım ağı yapısı elde edilebilmektedir. PE kristalin iki yüzeyi arasına uygulanacak potansiyel fark sonucu PE materyalde oluşan mekanik stres PE materyali titreştirecektir [57, 58]. Bu titreşimler AO kristale hareket eden akustik dalgalar şeklinde transfer edilerek AO materyal üzerinde değişken basınç noktaları yaratacak ve kırılma indisinde uzamsal ve zamana bağlı değişimlere (kırınım ağlarına) sebep olacaktır. Bazı AO materyaller aynı zamanda PE etki yönünden de güçlüdür (germanyum gibi). Bu tür materyallerde ses

dalgalarının üretilmesi için ek bir PE materyale ihtiyaç duymadan direkt AO kristal üzerine uyarım yapılarak AO etkileşim gözlemlenebilmektedir. LiNbO<sub>3</sub> (lityum niyobat) AO cihazlarda yaygın şekilde kullanılan bir PE materyaldir [38, 1]. LiNbO<sub>3</sub>'ün yanısıra daha az popüler olan AlN, LiIO<sub>3</sub>, CdS ve ZnO gibi PE materyallerde hem ince film şeklinde hem de tabaka olarak kullanılmaktadır. AO materyallerde olduğu gibi PE materyallerde de ortaya çıkacak PE etki materyalin oryantasyonuna ve bağlandığı AO alttaşa göre değişkenlik gösterebilir. Çizelge 2.3 katman olarak kullanılan LiNbO<sub>3</sub> ve ince film olarak kullanılan ZnO PE materyallerinin yönelimine bağlı özelliklerini sergilemektedir [59, 60]. Şekil 2.5, Çizelge 2.3 verilen kesimlerden Y (010) düzleminden 36°'lik bir açı yapacak şekilde kesilmiş LiNbO<sub>3</sub> kristalinin şematini vermektedir [61, 62]. Bu yönelim 36° Y-kesim olarak adlandırılmaktadır ve boylamsal akustik modda kullanılan kuplaj katsayısı yüksek kesimlerden biridir.

Çizelge 2.3 : Bazı yaygın kullanılan PE materyaller ve özellikleri [59, 60].

Materyal	Yoğunluk, $\rho \left( \frac{g}{cm^3} \right)$	Akustik Mod	Kesim	Kuplaj Katsayısı	Ses Hızı, $v_a \left( \frac{mm}{\mu s} \right)$	Akustik Empedans ( $Z = \rho * v_a$ )
LiNbO <sub>3</sub>	4.65	QL	36° Y	0.485	7.34	34.1
LiNbO <sub>3</sub>	4.65	L	Z	0.162	7.32	34
LiNbO <sub>3</sub>	4.65	QS	163° Y	0.612	4.53	21
LiNbO <sub>3</sub>	4.65	S	41° X	0.684	4.80	22.3
ZnO	5.68	L	Z	0.282	6.40	36.4
ZnO	5.68	S	Y	0.316	2.88	16.4
ZnO	5.68	S	39.7° Y	0.35	3.24	18.4

L: Longitudinal (Boylamsal), S: Shear (Transversal), Q: Quasi (Benzeri)



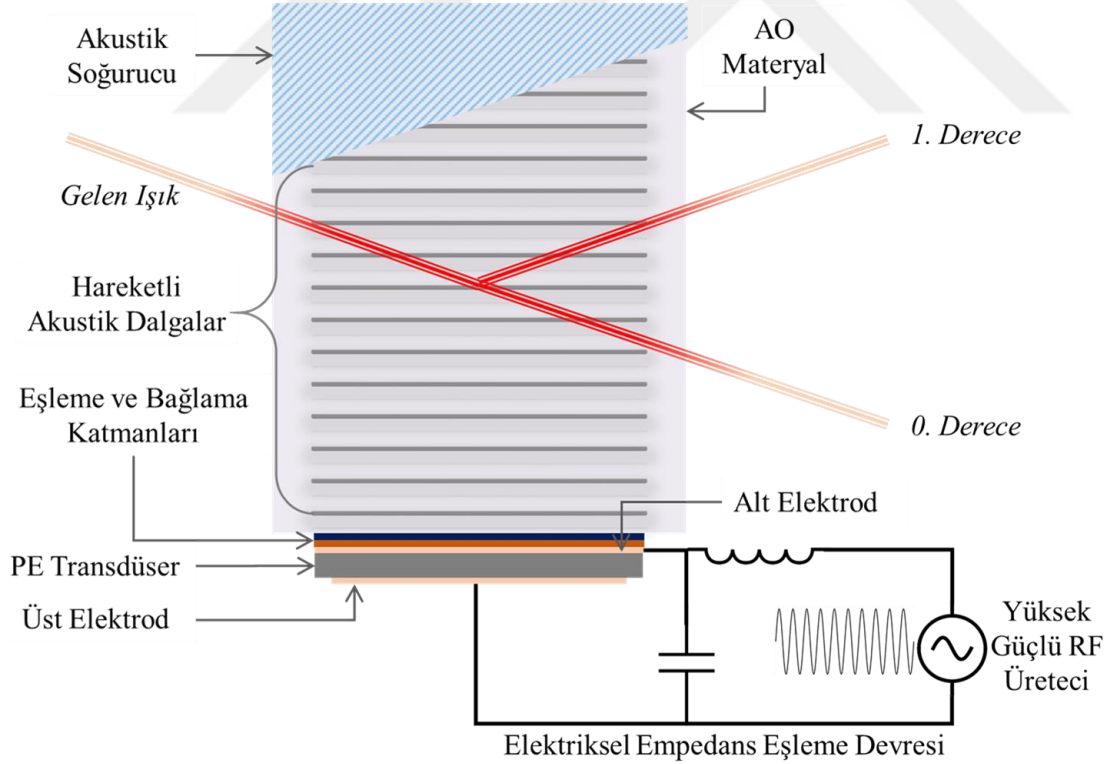
Şekil 2.5 : PE materyal olarak örnek 36° Y-kesim LiNbO3 geometrisi.

### 3. AKUSTO-OPTİK CİHAZLAR

AO cihazlar modülatör, deflektör, frekans kaydırıcı, mod kilitleyici, atım seçici, Q-anahtar, ayarlanabilir filtre ve benzeri amaçlarla kullanılmak üzere özel olarak üretilmektedir [1-3, 6-8]. AO cihazların en yaygın kullanım şekli olan AO modülatörler, genellikle tek bir dalga boyunda çalışan ve lazer gücünü zamanda analog veya dijital olarak kontrol etmek için kullanılan cihazlardır. Q-anahtarlama için kullanılan AO cihazlar da esasen modülatördür, fakat bu cihazların hızlı cevap vermesi ve yüksek ışık güç yoğunluğuna dayanıklı olması gereklidir. Dolayısıyla, Q-anahtar olarak kullanılan AO cihazlar soğutma ihtiyacını göz önünde bulunduran, hızlı cevap verebilen ve yüksek optik güce dayanıklı AO modülatörlerdir. Atım seçiciler temelde çok hızlı AO modülatörlerdir ve bir dalga katarı içerisinde spesifik atımları ayıklamak/seçmek için kullanılmaktadır. Normalde, tüm AO cihazlarda etkileşim sonucu ışığın hareketli ses dalgasına çarpmasından dolayı bir frekans kayması mevcuttur. Bu frekans kayması bazen aynı AO ortam içerisinde birden fazla etkileşim ile kompanse edilirken bazı uygulamalarda özellikle ihtiyaç duyulmaktadır. AO frekans kaydırıcı cihazların tek amacı gelen ışığın frekansını çok düşük güç kaybıyla bir veya birden fazla AO etkileşim sonucu yukarı (pozitif) veya aşağı (negatif) yönlü kaydırmaktır. AO deflektörler diğer uygulamalardan farklı olarak lazerin hem açışal yönünü hem de gücünü kontrol etmek için değişken RF frekansı kullanan cihazlardır. Temelde bir deflektör modülatör olarakta kullanılabilir. Deflektörü modülatörden ayıran esas özelliği daha geniş frekans spektrumunda yaklaşık olarak aynı performans ile çalışabilmesi ve bu sayede ışığın farklı açılara kırılabilmesidir. AO ayarlanabilir filtreler ise benzer çalışma prensibine sahip olmasına karşın çok daha farklı amaçla kullanılmaktadır. Bu cihazlar gelen geniş veya değişken bantlı ışığı hızlı ve dinamik bir şekilde dar bir dalga boyu bandı aralığında filtrelemek amacıyla özellikle görüntüleme sistemlerinde kullanılmaktadır.

Bu bölümde her ne kadar bir AO modülatörün nasıl üretilebileceği üzerine odaklanılacak olsada, diğer AO cihazların üretimi içinde benzer prosedürler gereklidir.

Örneğin, bir AO cihazın Q-anahtar olarak kullanılması için AR kaplamaların ve AO kristalin yüksek lazer gücüne dayanıklı olması ve hızlı cevap verebilmesi gereklidir. Bir deflektör tasarlanacaksa, kullanılacak kristalin ve diğer bileşenlerin geniş frekans bandını destekleyecek şekilde uygun seçilmesi ve üretimin bu minvalde yapılması gereklidir. Şekil 3.1 standart bir AO modülatör şematüğini vermektedir [1, 2, 52, 53]. Bir AO modülatörün esasen üç kritik bileşeni vardır. Bu bileşenler AO kristal, PE transdüser (PET) yapısı ve radyo-frekans (RF) üreteç devresidir. Bu bileşenler birbirleri ile uyum içerisinde çalışmaktadır. Yüksek güçlü RF üreteci ile uygun frekansta sağlanan RF gücü elektriksel empedans eşleme devresi ile ilgili frekansta azami şekilde PET üst ve alt elektroduna iletilmektedir. Bu uyarım ile titreşen PE transdüserin ürettiği ses dalgaları eşleme ve bağlama katmanları üzerinden AO etkileşim ortamında hareketli kırılma indisi değışimleri (kırınım ağıları) yaratmakta ve bu sayede gelen ışık kırılmaktadır. Son olarak, akustik dalgalar açılı akustik soğurucuya çarparak sönümlenmekte ve ihtimal dahilinde geri yansıyan dalgalarında dışa yönlendirilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.1 : Standart bir AO modülatör bileşenleri şematüğü.

Çok disiplinli bir çalışma prensibi ve üretim metoduna sahip olan AO cihazların üretimi ilk olarak kullanılacak AO ve PE kristallerin üretilmesi, yönelimlerinin



belirlenerek kesilmesi, uygun yüzeylerinin cilalanması ve optik yüzeylere yansıma engelleyici kaplama uygulanması ile başlar. Daha sonra, PET yapısı AO materyale bağlanarak PE tabaka rezonans kalınlığına inceltir. İnceltile kristal üzerine elektrod kaplaması yapılarak son adımlara geçilir. RF gücünü PET yapısına aktarmak için elektriksel empedans eşleme devresi ve devrenin PET'e tel bağlama işlemi ile bağlanması, akustik absorbe edici montajı ve kutulama gibi son işlemler ile cihaz fonksiyonel hale getirilir. Bu bölümün devamında her bir üretim adımı kısaca aktarılacaktır.

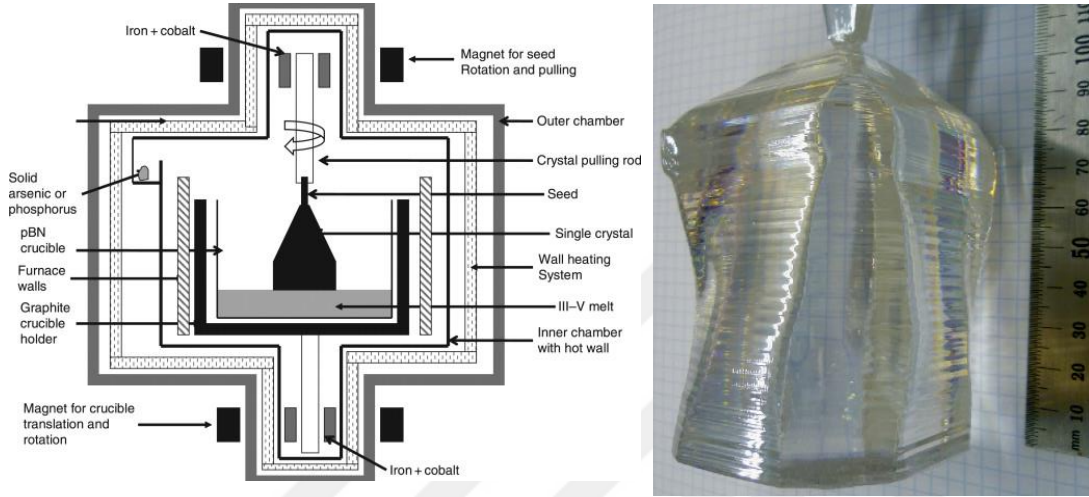
### **3.1 Kristal Büyütme İşlemleri**

AO cihaz üretme işlemi, temel yapı taşları olan AO ve PE materyallerin büyütülmesi ile başlar. Materyalin (kristalin) büyütülmesi için genelde Czochralski ve bazen de Bridgman büyütme teknikleri kullanılmaktadır [56, 63, 64]. Yaygın olarak kullanılan Czochralski metodu şu şekilde açıklanabilir [56, 63, 64]. Büyütülmek istenen kristalin tozu dairesel bir ısıtıcı içerisinde bulunan ve platin gibi reaksiyona girmeyen bir materyalin üzerine yerleştirilir. Daha sonra, etrafında bulunan ısıtıcı ile toz eritilir. Büyütme sırasında eriyen materyalin sıcaklığı titizlikle kontrol edilir. Dönen bir çubuğun (tipik olarak 60 rpm) ucuna yerleştirilen çekirdek kristal eriyen materyalin içerisine girer. Ardından, eriyen toz yukarı yönlü yavaşça hareket ettirilen soğuk çekirdek üzerinde çok kısa süre içerisinde katılaşır ve tek kristal külçe halini alır. Şekil 3.2 örnek Czochralski kristal büyütme yönteminin şematini ve bu şekilde büyütme sonrası külçe formundaki elde edilen örnek bir TeO<sub>2</sub> kristalini göstermektedir.

### **3.2 Kristal Yönelimi ve Kesme İşlemleri**

Daha önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere büyütülen kristallerin yönelimi (oryantasyonu) oldukça önemlidir, çünkü yönelimime göre materyalin optik, mekanik, termal ve elektriksel özellikleri değişebilmektedir. Kristal yönelimini ölçmek için en hassas metod X-ray gönyemetre kullanmaktır, bu sayede 0.5-3" mertebelerinde doğruluk sağlanabilmektedir [65]. Kristal külçesi yönlendirildikten sonra optik bloklar halinde metalik testereler ve aşındırıcı maddeli su yardımıyla kesilir [56]. Kesilen parçalar eritilebilir bir madde veya yapışkan yardımıyla kristal kesme masasına tutturularak daha küçük ve uygulamaya göre belirlenen geometride kesilir. Kesilen

parçaların optik yüzeyleri standart şekilde cilalanarak kolime ve polarize bir ışık ile kristal bloğunun optik olarak homojenitesi ve materyal üzerindeki kusurlar (çatlaklar, baloncuk, fissür vb.) kontrol edilir [56]. Homojen olarak iletilen optik hüzmeye kristalde herhangi bir kusur olmadığına işaret eder. Kusursuz optik kristaller daha sonra nihai oryantasyon işlemine tabi tutulur. Nihai oryantasyon ve oryantasyonun doğruluğu kristalin ne tür bir AO etkileşime maruz kalacağına göre değişmektedir.



Şekil 3.2 : Sıcak duvar Czochralski kristal büyütme metodu şematik diyagramı (sol), büyütme sonrası elde edilen külçe formundaki  $\text{TeO}_2$  kristali (sağ) [63, 64].

### 3.3 Kristal Yüzey Cilalanması

Kesme işlemi tamamlandıktan sonra kristallerin optik ve akustik yüzeylerine son cilalama işlemi yapılmalıdır. Yüzeylerin boyutları uygulamaya göre değişmekle birlikte, örnek bir AO modülatör uygulaması için, optik yüzeyler  $\sim 5 \text{ mm} \times \sim 10 \text{ mm}$ , akustik yüzeyler ise  $\sim 5 \text{ mm} \times \sim 20 \text{ mm}$  mertebelerindedir. Optik ve akustik yüzeyler tipik olarak  $30''$  paralellikte,  $\lambda/4$  düzlükte (flatness),  $10^{-5}$  kazıma (scratch-dig) yüzey kalitesindedir [56, 66].

### 3.4 Yansıma Engelleyici Kaplama

Optik yüzeylerdeki optik yansımaları/kayıpları azaltmak amacıyla optik yüzeylere yansıma engelleyici (Anti-Reflection/AR) kaplama yapılması tercih edilmektedir. Bu kaplama tek kat olabileceği gibi çok katlıda olabilir. Bu kaplamadaki kat sayısı arttıkça yüzeyin geçirgenliği artırılabilir ve geçirdiği dalga boyu bandı

genişletilebilmektedir [67]. Yüksek güçlü lazer uygulamalarında kullanılacak AO cihazlar için küçük kayıplar bile ısı olarak ortaya çıkacağı için AR kaplama oldukça önemlidir. AR kaplaması yapıldıktan sonra optik yüzeyler sonraki işlemlerde meydana gelebilecek mekanik hasarın önüne geçmek için koruyucu malzeme ile kaplanmaktadır.

### 3.5 Piezoelektrik Transdüser İşlemleri

Günümüzde,  $\text{LiNbO}_3$  kristali yaygın şekilde PE tabaka olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Çizelge 2.3'te akustik özellikleri verilen  $\text{LiNbO}_3$  kristali iyi derecede mekanik kuvvete, sertliğe, ve kararlılığa sahiptir [56]. Ayrıca,  $\text{LiNbO}_3$  ekonomik fiyatlarla yüksek kalitede birçok firmadan temin edilebilmektedir. Akustik dönüştürücü olarak kullanılan PE transdüser yapısı çok katmanlı olup AO alttaşa mekanik olarak bağlanmaktadır. Transdüser yapısı şekil 3.1'de gösterildiği gibi alt ve üst metalik katmanlar arasında bulunan PE materyal ve eşleme/bağlama katmanlarından oluşur. AO cihazın performans etkinliği nde olduğu için PET yapısının en önemli faktörlerinden biri PE tabakanın uygulanan elektrik enerjisini akustik dalgaya ne kadar efektif dönüştürdüğüdür (izelge 2.3 kuplaj katsayısı). Dönüşüm etkinliği, PE materyalin kuplaj katsayısının yanısıra dielektrik katsayı, akustik empedans, elektriksel direnç ve kırılım voltajı gibi parametrelere de bağlıdır. PE kuplaj katsayısı doğrudan elektrik enerjisinin akustik enerjiye dönüşümü ile ilişkilidir, dolayısıyla materyal seçiminde en etkin parametredir. Dielektrik katsayı PET'in elektriksel kapasitesini belirler ve elektriksel empedans eşleşmesi için önemli bir faktördür. Transdüserin empedansı ise eşleme katmanları ve AO materyal arasında enerjinin aktarımını ile direkt olarak ilişkilidir.

Genellikle, PE ve AO materyalleri ve yönelimleri akustik dalga üretiminin etkinliğini ve AO etkileşimi azami düzeyde tutacak şekilde seçilir. AO cihaz için PE ve AO materyaller seçildiğinde genleşme katsayıları arasında ne kadar fark olabileceği ve ne kadarlık sıcaklık altında bir problem olmadan üretim yapılabilceği de öngörülmelidir. Tabaka şeklindeki bir PE materyalin AO alttaşa bağlanma adımları şu şekildedir: (1) Akustik eşleme katmanlarının ve alt elektrodun AO materyal üzerine depozisyonu, (2) PE katmanın AO materyal üzerine bağlama metodları ile bağlanması, (3) PE katmanının gerekli rezonans kalınlığa inceltilmesi, ve (4) st elektrodun

depozisyonu. PE katmanın kalınlığı yapıştırma sonrası inceltme gereksinimini azaltmak için olabildiğince ince tutulmaktadır. Yine de, PE katmanı yapıştırma/bağlama işlemini kaldıracabilecek (işlem sırasında kırılmayacak) kadar kalın olmalıdır. Genellikle, 1-2 mm kalınlığında PE katman kullanılmaktadır [56].

### 3.5.1 Akustik empedans eşleme

AO ve PE ortamlar arasında akustik dalganın optimum transferi için materyallerin akustik empedanslarının birbirine olabildiğince yakın olması gereklidir. Daha önce Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’de yaygın kullanılan AO ve PE materyallerin akustik empedansları verilmişti. Bu durumda akustik empedansları bilinen AO ve PE materyaller için [68] numaralı kaynakta ifade edildiği üzere iki ortam arası güç yansımaya katsayısı (R) ve güç transferi (T) şu şekilde hesaplanabilir:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (3.1)$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.2)$$

AO ve PE materyaller arasında akustik güç aktarımının optimize edilmesi için iki ortam arasına empedans değeri  $\sqrt{Z_1Z_2}$  olan ve çeyrek dalga eşlemesi (quarter-wave matching) ile kalınlığı,  $n \geq 0$  için  $(2n + 1) * \Lambda/4$  olan bir katmanın eklenmesi gerekmektedir. Çoğu zaman, çeyrek dalga eşlemesi için hesaplanan empedans değerinde bir ara katman mevcut olmaması veya yapıştırma işlemi için elverişli olmaması gibi sebeplerle daha farklı tasarımlar da yapılabilmektedir. Bu sebeple eklenecek eşleme katmanının yanı sıra daha farklı ek katmanlara da hem empedans eşleme hemde yapıştırma amaçlı ihtiyaç duyulabilmektedir. Çizelge 3.1 yaygın olarak kullanılan elektrod ve eşleme materyallerinin listesini vermektedir. Kullanılacak materyaller AO etkileşimde kullanılan akustik modun boylamsal veya transversal olmasına bağlı olarak farklı özelliklere sahiptir. PET yapısının tasarımını belirleyen en önemli faktörlerden birinin PE kristalin AO kristale bağlama yöntemi olduğu öngörülmektedir. Zira izlenecek metoda göre kullanılacak materyaller ve parametreler değişkenlik gösterebilmekte ve buna istinaden bağlama metodu kısıtlayıcı

olabilmektedir. PE kristalin AO kristale bağlanması için yapışkan, ısı baskı, soğuk vakum baskı ve optik kontakt ile bağlama şeklinde dört metod vardır [56].

Çizelge 3.1 : Yaygın kullanılan elektrod ve bağlama materyallerinin akustik özellikleri [60].

Materyal	Longitudinal (Boylamsal)		Shear (Transversal)	
	Ses Hızı ( $\frac{mm}{\mu s}$ )	Akustik Empedans ( $10^9 \frac{g}{s.m^2}$ )	Ses Hızı ( $\frac{mm}{\mu s}$ )	Akustik Empedans ( $10^9 \frac{g}{s.m^2}$ )
Altın (Au)	3.38	65.2	1.25	24.0
Aluminyum (Al)	6.41	17.3	3.12	8.41
Bakır (Cu)	4.75	42.6	2.32	20.8
Çinko (Zn)	4.21	30.0	2.44	17.3
Epoksi	2.60	2.86	1.22	1.34
Gümüş (Ag)	3.70	38.8	1.70	17.8
İndiyum (In)	2.25	16.4	0.95	6.4
Kalay (Sn)	3.32	24.6	1.67	11.8
Krom (Cr)	6.65	47.2	4.03	28.6
Kurşun (Pb)	1.96	22.4	0.69	7.85
Nikel (Ni)	5.92	52.7	3.23	28.8
Platin (Pt)	3.26	69.7	1.73	37.0
Titanyum (Ti)	6.07	27.3	3.13	14.1

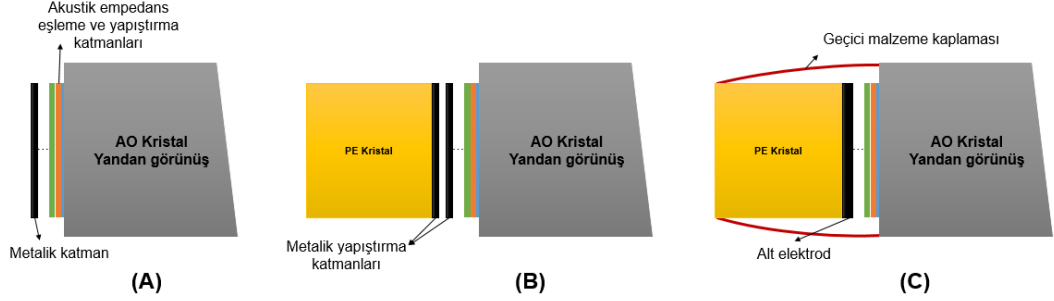
### 3.5.1.1 Yapışkan ile bağlama

Yapışkan ile bağlama işleminde organik bileşikler (epoksi, vernik, makine yağı, silikon yağı, fenil bileşenler vs.) kullanılmaktadır [56]. Bu şekilde oldukça kolay bir şekilde bağlama yapılabilmektedir. Bu metodun dezavantajları: çok yüksek frekanslarda çalışan cihazlar yapılamaması, organik bileşiklerin akustik empedanslarının düşük olması sebebiyle eşleşmemesi sonucu AO cihazın etinliğinin düşmesi, ve bağlamanın yeterince sağlam olmaması sebebiyle PE kristalin mekanik inceltmesi sırasında yerinden ayrılmasıdır [56].

### 3.5.1.2 Isıl baskı ile bağlama

Isıl baskı (thermocompression) metodu ile metalleri eritecek kadar yüksek sıcaklıklara çıkmadan yüksek basınç ( $\sim 10^8$  Pa) ortamında metal yüzeyler birbirine bağlanabilmektedir [56]. Şekil 3.3 PET yapısının AO altına, AO cihazın yandan görünüşü için ısıl baskı yöntemi ile bağlama adımlarını sade bir şekilde aktarmaktadır. Çizelge 3.1'de gösterilen (fakat bunlar ile sınırlı olmayan) materyallerin bir veya daha fazla katmanda, hesaplanan kalınlıklarda, AO ve PE kristal arasında akustik empedans eşleme sağlaması amacıyla kaplanması sürecin ilk adımıdır. Bu adımda dikkat edilmesi gereken hususlardan ilki kullanılan eşleme materyallerinin akustik olarak eşleşmelerinin yanısıra birbirleri arasında da kimyasal olarak uyumlu olmasıdır. Şekil 3.3 (A) adımında eşleme katmanlarının üzerine akustik olarak ince bir metalik katman (alt elektrod) kaplanması ile bir sonraki adıma geçilebilir. Bir katmanın akustik olarak ince katman kabul edilmesi için kalınlığının katmanın içerisindeki akustik dalga boyundan ( $\Lambda$ ) çok daha ince ( $\ll \Lambda/10, \ll \Lambda/100$ ) olması gereklidir [68]. Şekil 3.3 (B) adımında, ısıl baskı ile bağlama durumunda, eşleme katmanları üzerine kaplanan metalik katmanın aynısı PE kristalin yapılandırılacak yüzeyi üzerine de akustik olarak ince bir kalınlıkta kaplanır. Daha sonra  $250^\circ\text{C}$ - $350^\circ\text{C}$  civarlarında  $10^8$  Pa basınçta bir kaç saat içerisinde metalik yüzeylerin birbiri içerisine geçmesi ve kaynaşması ile oldukça sağlam bir bağlantı elde edilir [56]. Bu işlemde vakum ortamının kırılmaması yüzeylerin oksidasyon ve tozdan korunması için önemlidir. Vakum ortamı kırılırsa oksidasyon yüzeyinin ortadan kaldırılması için daha uzun bir kaynaşma süresi gereklidir. Bağlama işleminden sonra kristaller oda sıcaklığına döneceği için kristallerin ve bağlantı noktalarının genleşme sonucu zarar görmemesi için

materyallerin termal genleşme katsayılarının uyumluluğu hesaba katılmalıdır. Şekil 3.3 (C) adımında gösterildiği üzere eşleme katmanlarının zarar görmemesi için geçici bir kaplama yapılır ve sonraki adımlara geçilir.



Şekil 3.3 : PET yapısı ve ısıl baskı ile bağlama adımları, akustik empedans eşleme ve yapıştırma katmanların ile birlikte metalik katman uygulaması (A), PE katmana uygulanan metalik yapıştırma katmanı (B), Yapıştırma işlemi sonrası AO ve PE kristalin görünümü (C).

### 3.5.1.3 Soğuk vakum baskı ile bağlama

Soğuk vakum baskı (cold vacuum compression) ile bağlama işlemi oda sıcaklığında gerçekleşmektedir. Bir çok AO cihaz üreten firma bu metodu kullanmaktadır. Bu metod ile hem PE kristal hem de AO kristal metalik (indiyum, gümüş, kalay ve altın gibi) bir katman ile kaplanmakta ve beklenmeksizin yüksek vakum (en az  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  Pa basınç) ortamında kontakt haline getirilmektedir [56]. Kısa süre ve yüksek vakum ortamı bağlama işlemini zayıflatan oksidasyon katmanının oluşumunu engellemektedir. Bağlama işleminin tamamlanması için transduser yapısına  $10^9$  Pa basınç uygulanarak kaynaşması sağlanmaktadır [56].

### 3.5.1.4 Optik kontakt ile bağlama

Optik kontak PE ve AO kristalin ilgili yüzeylerinin yüksek derecede parlatılması ile aralarındaki mesafenin bir kaç nm'den az olduğu durumda gerçekleşmektedir. İki yüzey arasındaki yapışma gücü dielektrik sabitlerin ve yüzeyler arası mesafenin bir fonksiyonudur. İki yüzey arasında ayrıca alt elektrod olarak kullanılacak akustik zayıflatması ve elektriksel direnci düşük ve akustik olarak ince bir metalik katman ihtiyacı vardır. Bu işlemler için sıklıkla altın ve bakır-krom ikilisinin kullanıldığı belirtilmektedir [56]. Optik kontakt ile bağlama adımları şöyledir: AO kristale metalik katmanın deposisyonu, su vasıtasıyla iki yüzeyin birbirine teması, ve son olarak suyun

bölgeden uzaklaştırılması. PE kristal ıslak AO kristal üzerine yerleştirildikten sonra hafifçe bastırılmaktadır. Daha sonra, bölgedeki suyun uzaklaştırılması için  $10^6$  Pa basınç uygulanır [56]. Bu metodun diğer metodlara göre avantajı vakum ortamına ihtiyaç duyulmamasıdır. Bunun yanısıra hizalama işlemi daha doğru ve kolay yapılmakta, bağlama katmanı olmaması sebebiyle gerçekleşecek bant genişliği ve güç kayıplarının önüne geçilmektedir. [25] numaralı kaynakta optik kontakt teknolojisinin kristal kuvars, germanyum, tellür dioksit gibi materyaller üzerinde geniş çaplı kullanıldığı belirtilmiştir.

### 3.5.2 Kristal inceltme

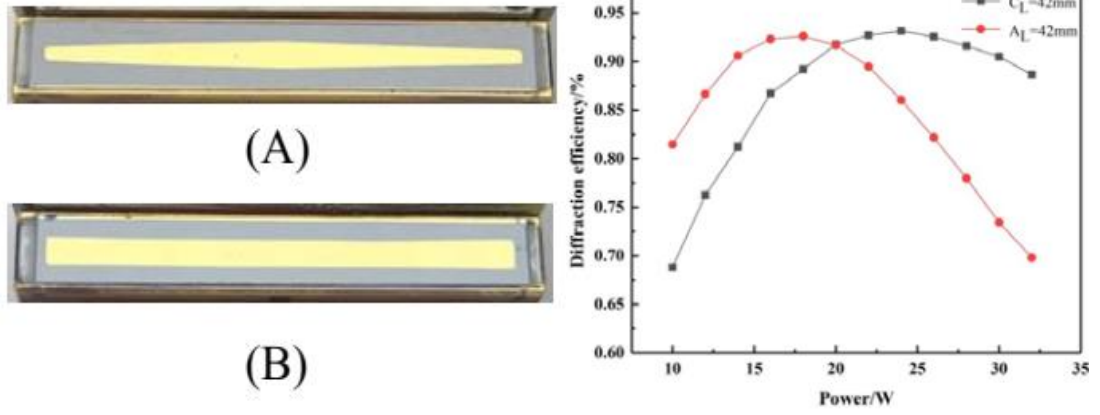
PE katman ifade edilen bağlama metodlarından birisi ile AO kristale bağlandıktan sonra PE katmanın kalınlığı istenilen merkez frekansını üretecek seviyeye indirgenmelidir. İstenilen kalınlık ise rezonans frekansının kalınlığıdır. PE materyalin kalınlığı akustik dalga boyu  $\Lambda$ 'nın yarısı kadar ( $\Lambda/2 = v_a/2f_0$ ) olmalıdır [56, 68]. Fakat tam kalınlık eşleme katmanında kullanılan materyallerin de hesaba katılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Katman inceltme işlemi için mekanik parlatma (cilalama) ve iyon öğütme yöntemleri kullanılmaktadır [56]. Mekanik parlatma işlemi aşındırıcı bileşim kullanılarak katman materyalinin kaldırılmasına dayanır. İyon öğütme işleminde PE materyale iyon püskürtülmesi sonucu materyalden atomların uzaklaştırılması ile kalınlığı azaltılmaktadır. İnceltme işlemi öncesinde transdüserin bağlantı bölgesine, daha önce de ifade edildiği üzere, hasarı önlemek için optik boya uygulanmaktadır.

### 3.5.3 Üst elektrod kaplaması

PET bağlama işlemi üst elektrodun depozisyonu ile tamamlanır. Üst elektrod PET yapısına elektrik bağlantısı sağlamanın yanı sıra üretilecek ses geometrisinin yükseklik ve genişliğinde (alanını) tanımlar. Dolayısıyla, üst elektrod yapısı iyi bir AO tasarımın ayrılmaz ve kritik bir parçasıdır. Sıkça kullanılan üst elektrod materyalleri bakır, alüminyum ve altındır [56]. Üst elektrodun kalınlığı tel bağlama işlemi için yeterince kalın, aşırı transdüser yüklemesi ve geçirgen frekans bandının bozulmasından kaçınmak için ise yeterince incedir. Üst elektrod tipik olarak tek bir materyal ile bir kaç 100 nm kalınlığındadır. Genellikle fotolitografik teknikler kullanılarak elektrod geometrisi tanımlanmaktadır. Ek olarak, elektrod kaplama işleminde elektrodun



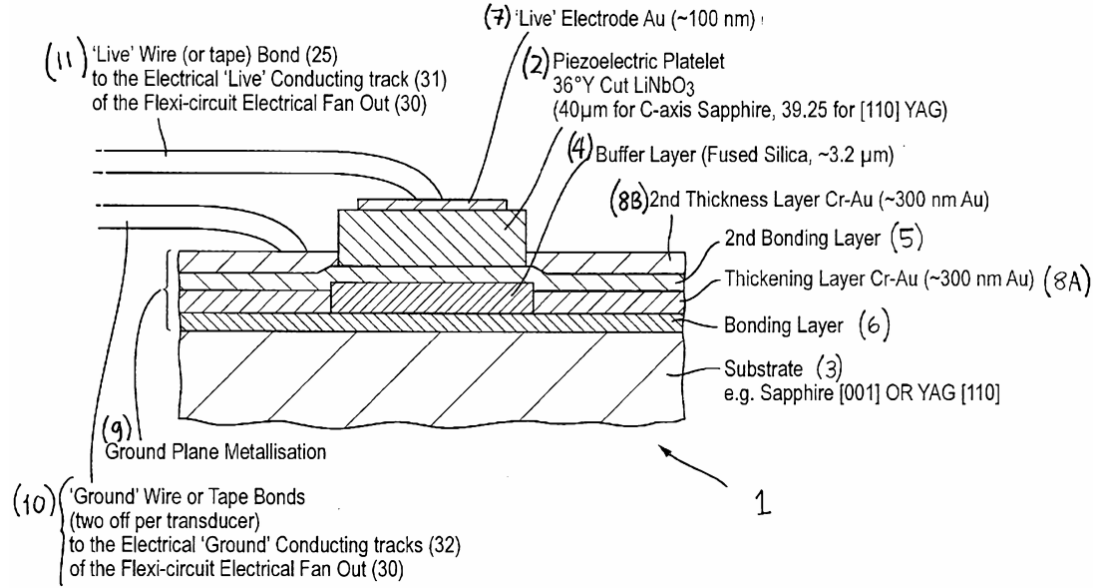
boyutları ve kalınlığı uygun şekilde ayarlanarak elektriksel empedansının RF sürücü devresinin empedansına (tipik olarak  $50 \Omega$ ) olabildiğince yakın olması sağlanabilir. Bu sayede empedans eşleme devre tasarım ve üretim süreci basitleştirilebilir, veya doğrudan ihtiyaç ortadan kaldırılabilir. Standart olarak dikdörtgenel kaplama yapılsada, daha farklı geometrilere üretilen üst elektrodlar ile çok daha efektif kırılmalar elde edilebilmektedir [69-71]. Şekil 3.4 üst elektrod geometrisinin kırılma etkinliğine etkisinin incelendiği bir makaleden aktarılan şekilleri göstermektedir [70]. Görüldüğü üzere apodize bir kaplama ile dikdörtgenel bir kaplamaya oranla %60'a kadar daha az RF gücü ihtiyacı doğmaktadır. Farklı üst elektrod geometrilerinde göze çarpan parametrelerden ilki elektrod alanının değişimidir. Farklı geometrilere aynı RF gücü beslendiğinde yüzey alanı daha az olan geometrinin üreteceği akustik yoğunluk değeri daha yüksek olacaktır.



Şekil 3.4 : Üst elektrod geometrisinin kırılma etkinliğine etkisi, apodize kaplama (A, kırmızı), standart dikdörtgenel kaplama (B, siyah) [70].

Şekil 3.5 [68] numaralı kaynakta verilen örnek bir PET yapısını detaylı olarak göstermektedir. Bu tasarımda yenilikçi bir yaklaşım kullanılarak safir ve YAG alttaşları ile  $36^\circ$  Y-kesim  $\text{LiNbO}_3$  PE kristali arasında akustik empedans eşleme işlemi için yaklaşık  $3.2 \mu\text{m}$  kalınlığındaki aracı bir kaynaşık silika katmanı yerleştirilmiştir. Görüldüğü üzere üst elektrod olarak yaklaşık  $100 \text{ nm}$  kalınlığında altın katmanı kullanılmıştır. Tasarıma bağlı olarak yaklaşık  $0.5 \Lambda$  ( $100 \text{ MHz}$ 'de  $0.4 \Lambda - 0.6 \Lambda$  arası)  $36^\circ$  Y-kesim  $\text{LiNbO}_3$  kristali PE katmanı olarak kullanıldığı belirtilmiştir [68]. Kaynaşık silikanın aracı katman olarak bağlanabilmesi için her iki tarafına (5) ve (6) numarayla gösterilen bağlama katmanları da eklenmiştir. (5) ve (6) numaralı katmanların yaklaşık  $50 \text{ nm}$  kalınlığında bir altın katmanı ile yaklaşık her iki tarafta

10 nm'lik krom katmanına (toplam yaklaşık 70 nm) sahip olduğu ve katmanların uygulaması için soğuk vakum baskı kullanıldığı belirtilmiştir [68]. (8A) ve (8B) katmanlarının yaklaşık 300 nm kalınlığında altın-krom kullanılarak kalınlaştırma katmanları olarak kullanıldığı ve bu katmanların amacının alt elektrod yapısının elektriksel direncinin azaltılmasının yanı sıra PET yapısının mekanik inceltme için sağlamlığının artırılması olduğu ifade edilmiştir [68].



Şekil 3.5 : Safir ve YAG alttaşları için 36° Y-kesim LiNbO<sub>3</sub> PE kristali ile akustik empedans eşleme bölgesi, bağlama katmanları ve elektrodları ile bir yenilikçi bir PET yapısı tasarımı örneği [68].

### 3.6 Son İşlemler

Üst elektrodun kaplaması ile PET bağlama işlemleri tamamlandıktan sonra geriye AO cihazı ürün haline getirmek için bir kaç adım kalmaktadır.

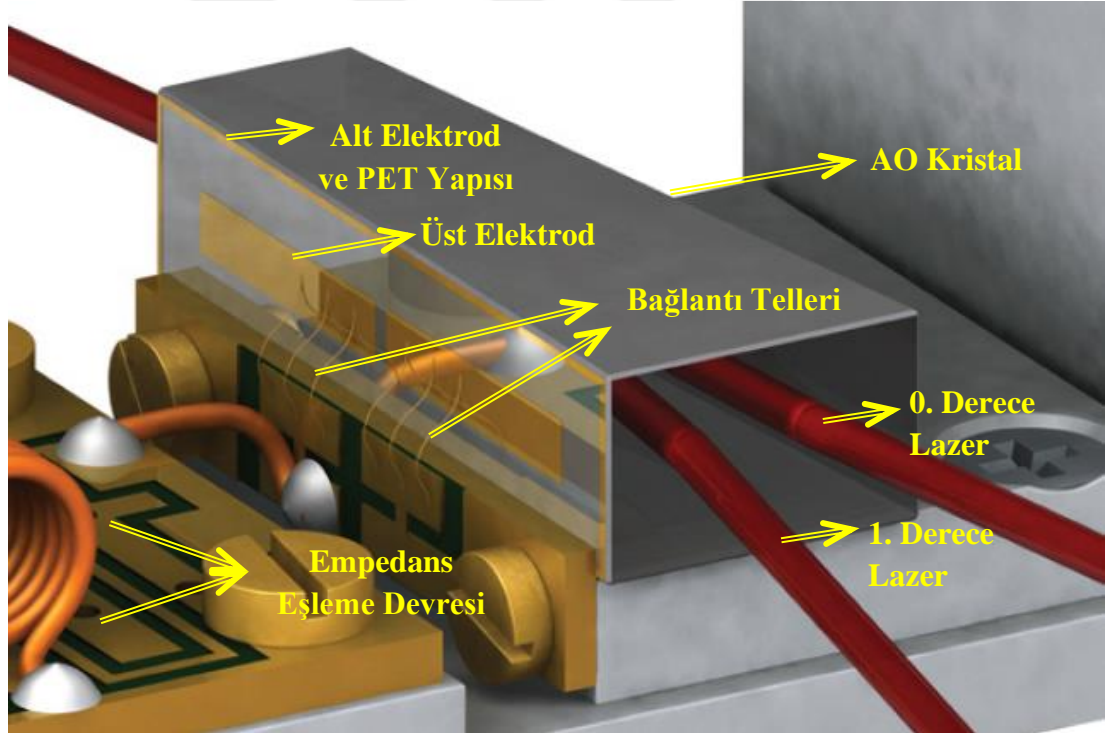
#### 3.6.1 Elektriksel empedans eşleme

AO cihazı sürececek RF sürücü devresi tipik olarak 50 Ω çıkış empedansına sahiptir. 50 Ω çıkış empedansına uygun bir empedans eşleme devresi ile RF gücü PET elektrodlarına aktarılmaktadır. Üst elektrodun elektriksel empedansı elektrodun elektriksel özellikleri ve geometrisi ile belirlenmekte, ve bir network analizörü ile ölçülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla seçilen elektrod materyali ve geometrisi elektriksel empedans hesaplamalarını etkilemektedir. Elektriksel empedans eşlemesi

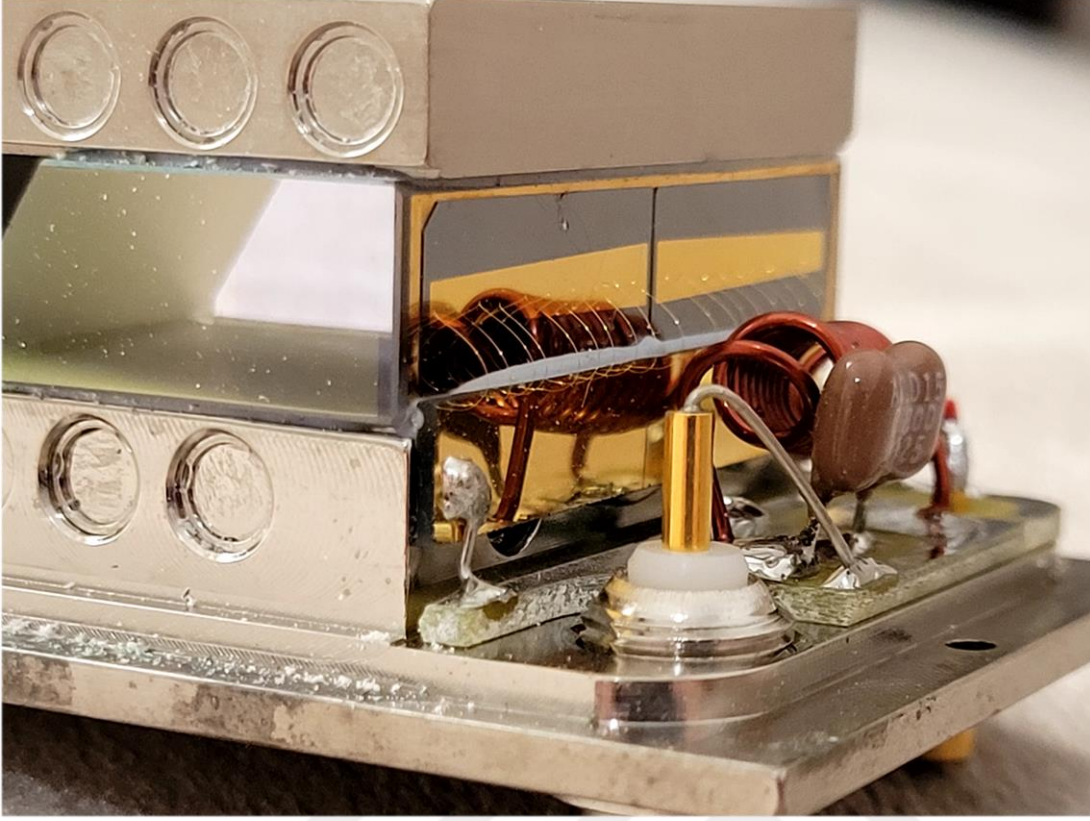
için kapasitör ve indüktör gibi bileşenlerin yanısıra, direkt kart üzerinde üretilen mikroşerit devre metodlarında kullanılabilir.

### 3.6.2 Tel bağlama

Üst elektrod kaplaması yapıldıktan sonra tel bağlama (wire bonding) yöntemi ile üst ve alt elektrod empedans eşleme devresine bağlanmaktadır. Tel bağlama işlemi için üst elektrod materyali ile tel materyalinin aynı olması bağlama işleminin sağlamlığı için önem arz etmektedir [56]. Güç aktarımı için tel bağlamanın tercih edilmesinin esas sebebi ters yöne olabilecek muhtemel akustik yansımaların bağlantı yüzey alanı azaltılarak önüne geçilmesidir. Hatta, akustik dalgaların havaya olabilecek aktarımını önüne geçilmesi için üst elektrod üzerine sıvısal materyaller eklenebilmektedir [72]. Şekil 3.6 örnek bir AO kristali, PET yapısını, tel bağlama uygulamasını ve empedans eşleme devresini göstermektedir. Şekil 3.7 piyasada satılan bir AO modülatör cihazının iç kasa görünümünün fotoğrafını vermektedir.



Şekil 3.6 : AO cihaz tasarımı örnek şematığı ve bileşenlerinin isimlendirilmesi [73].



Şekil 3.7 : Piyasada satılan bir AO modülatörün kasa içi görünümü.

### 3.6.3 Akustik absorbe edici

Tüm işlemler tamamlandıktan sonra AO kristalin akustik empedansına yakın bir materyal ile akustik dalgaların çıkış yapacakları yüzeye absorbe edici bir katman uygulaması yapılır. Ayrıca, akustik yansımaların daha fazla önüne geçilmesi için absorbe edici yüzeyin Şekil 3.6'da gösterildiği gibi açılı bir şekilde kesildiği bilinmektedir. Absorbe edici katman için yaygın olarak epoxy ve indiyum karışımı ile akustik empedansının ayarlandığı ve bu şekilde uygulama yapıldığı AO cihaz üreten bir firma aracılığıyla öğrenilmiştir.

### 3.6.4 Kutulama

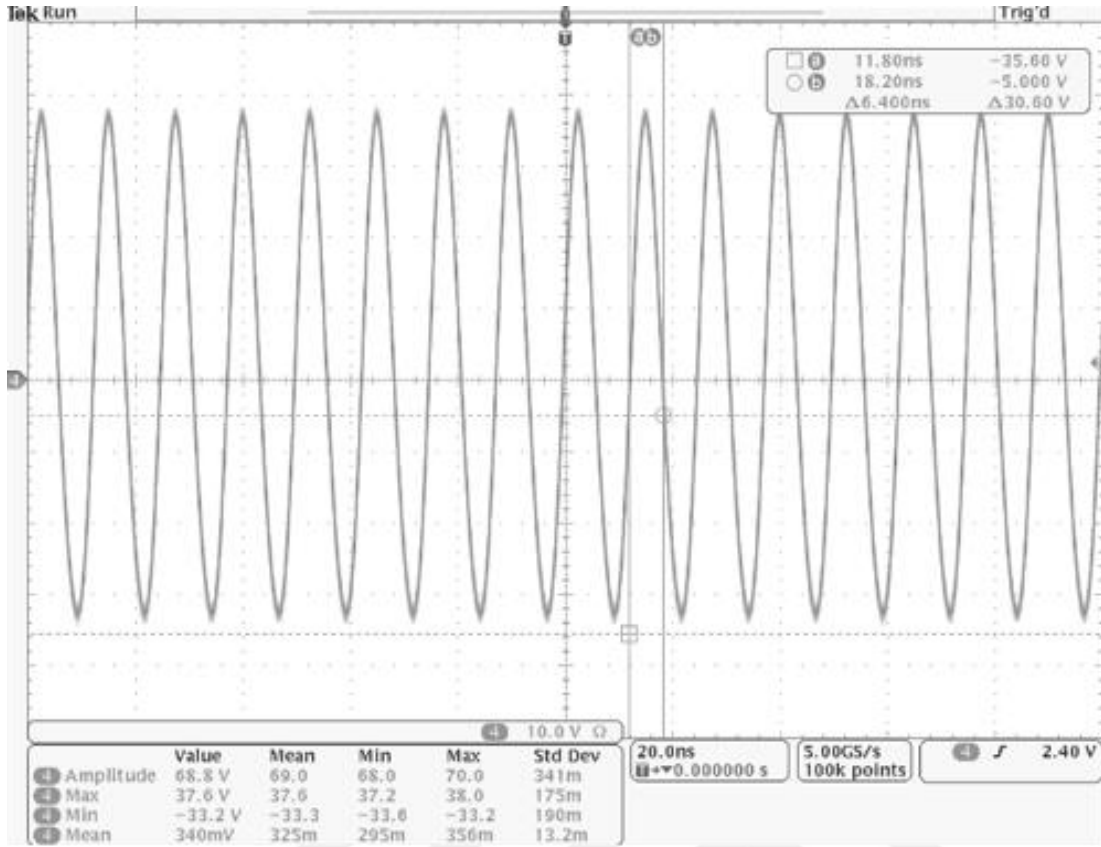
Tüm işlemler tamamlandıktan sonra AO cihazın ısınmasını engellemek, toz ve kir gibi dış etkenlere karşı korumak adına optik açıklıklara ve RF besleme arayüzlerine sahip, ihtiyaca göre ısı iletimi veya sıvı ile soğutmaya elverişli bir şekilde kutulanabilir. Şekil 3.8 kutulama işlemi yapılmış cihaz örneklerini göstermektedir.



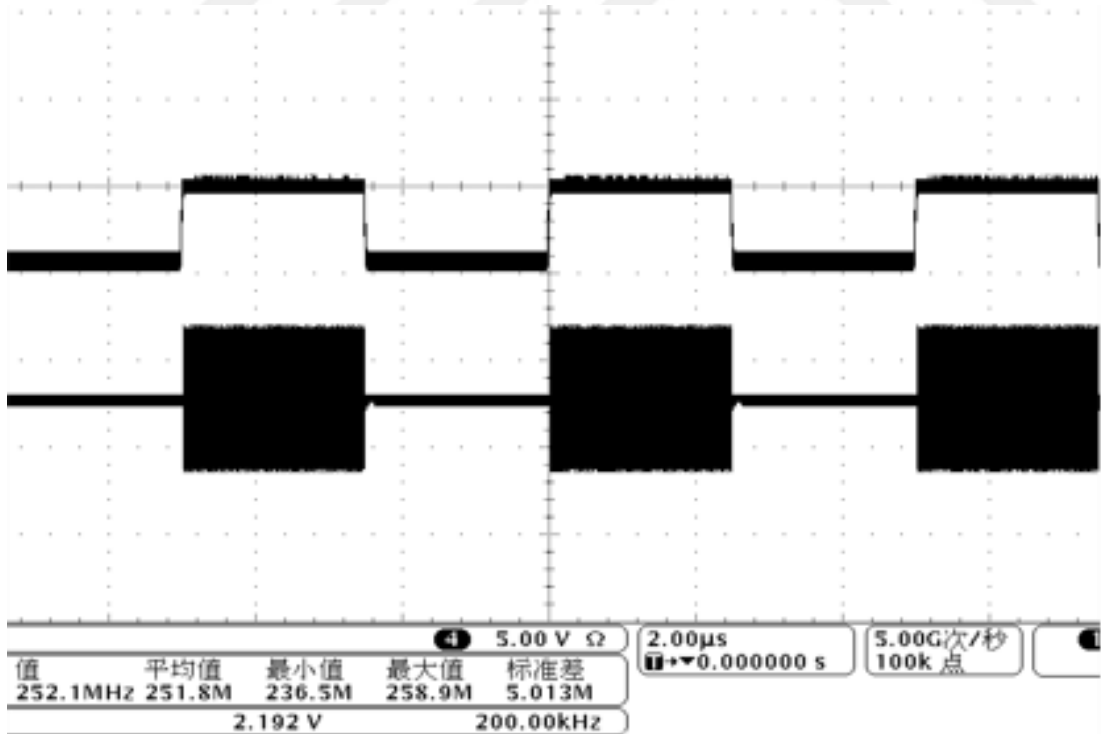
Şekil 3.8 : Kutulu AO cihaz örnekleri [74].

### 3.6.5 RF sürücü devresi

Empedans eşleme devresinin girişine, tipik olarak  $50 \Omega$  çıkış empedansına sahip, bir RF sürücü devre bağlanmaktadır. Sürücü devre AO cihaza yüksek frekans sabitliğinde, ve uygun güçte sinyal sağlamaktadır. Muhtelif AO sürücü devreleri tipik olarak 40 MHz'den 160 MHz'e piyasada yaygın şekilde mevcuttur. Sürücü frekansı tasarlanan AO cihaza göre değişmektedir. Piyasada mevcut bir çok RF sürücü devresi AO cihazı sürmek için kullanılabilir. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 AO cihazı sürmek için kullanılan örnek bir sürücü devrenin örnek çıktılarını seğilemektedir.



Şekil 3.9 : RF sürücü sinyali örneği [75].



Şekil 3.10 : Modülasyon sinyali ve modülasyon uygulanmış RF sürücü sinyali örneği [75].

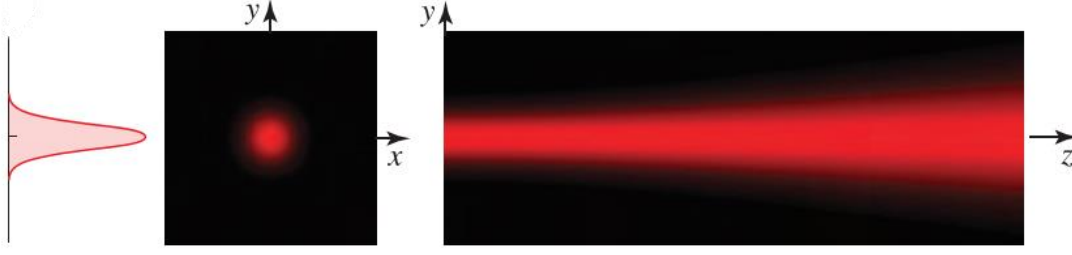
#### 4. AKUSTO-OPTİK ETKİLEŞİMİN MODELLENMESİ

Bu kısma kadar elde edilen bilgi birikimi ile AO etkileşimin teorisinden yola çıkarak ve gerçek hayat AO cihaz uygulamaları da göz önünde bulundurularak bir modelleme çalışması gerçekleştirilebilir. AO etkileşimin modellenmesi için PET yapısı elektrodlarının uyarımı sonucu PE etkileşim ile kırınım ağı yapısının elde edilmesi ve daha sonra bu kırınım ağı yapısına gelen bir ışık için dalga denkleminin çözülmesi gereklidir. İdeal sinüzoidal kırınım ağı yapısı için dalga denkleminin çözümü daha önce Raman-Nath denklemleri ile elde edilmişti. Bu modelleme çalışmasında kırınım ağı yapısının dikdörtgensel ve sinüzoidal olmayabileceği, etkileşim geometrisinin değişebileceği ve AO etkileşim sonrası optik dalganın havada ilerlediği dikkate alınarak dinamik bir şekilde modelleme yapılmıştır.

##### 4.1 Kızılötesi Lazer

Model ile benzetim sonuçlarının elde edilmesinden önce AO etkileşime girecek olan optik dalganın (lazer hüzmesinin) parametrelerinin tanımlanması gereklidir. Daha önce de belirtildiği üzere AO cihazlar çoğunlukla lazerlerin kontrolü için ve özellikle KÖ bandında kullanılmaktadır. Optik bir hüzmenin davranışı açıklanırken hüzmenin özelliklerine sahip olan Gaussian hüzmesi tanımı kullanılmaktadır [76]. Gaussian hüzmesinin gücü hüzme eksenin çevreleyen küçük bir daire içerisine konsantre olmuştur. Güç yoğunluğunun dağılımı ise Şekil 4.1’de gösterildiği üzere tüm yönlerde simetrik olacak şekilde bir Gaussian fonksiyonudur.  $r$  pozisyon vektörünü,  $A_0$  genliği,  $W_0$  hüzme belinde hüzme genişliğini,  $W(z)$  aksel harekette hüzme genişliğini,  $z$  aksel mesafeyi,  $\rho$  radyal mesafeyi,  $k$  dalga numarasını,  $R(z)$  eğrilik yarıçapını ve  $\zeta(z)$  faz gecikmesini temsil ederken Gaussian hüzmesinin karmaşık genliği şu şekilde ifade edilmektedir [76]:

$$U(r) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp \left[ -\frac{\rho^2}{W^2(z)} \right] \exp \left[ -jkz - jk \frac{\rho^2}{2(R(z))} + j\zeta(z) \right] \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 : Gaussian hüzmesinin enine yoğunluk dağılımı (sol), iki boyutlu karşından görünümü (orta), optik yol üzerinde hareketi (sağ) [76].

Gaussian hüzmesinin yoğunluğu aksenal ( $z$ ) ve radyal ( $\rho$ ) mesafenin bir fonksiyonudur ve eşitlik (4.2)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Hüzme ekseni üzerinde ( $\rho = 0$ ) alınan mesafeye göre değişim ise eşitlik (4.3)'te verildiği gibi değişmektedir [76].

$$I(\rho, z) = I_0 \left[ \frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[ -\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] \quad (4.2)$$

$$I(0, z) = I_0 \left[ \frac{W_0}{W(z)} \right]^2 = \frac{I_0}{1 + (z/z_0)^2} \quad (4.3)$$

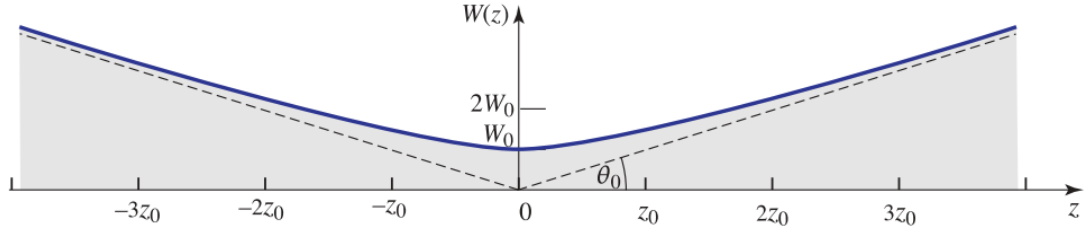
Gaussian hüzmesinin gücü, güç yoğunluğunun eksen boyunca toplamı olarak şu şekilde ifade edilebilir [76]:

$$P = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho = 0.5I_0\pi W_0^2 \quad (4.4)$$

Görüldüğü üzere toplam güç azami güç yoğunluğunun hüzme alanı ile çarpımının yarısı kadardır ve mesafeye bağlı olarak değişmemektedir. Yani, hüzme aldığı mesafe boyunca gücünü korumaktadır fakat güç yoğunluğu hüzmenin genişlemesinden dolayı azalmaktadır. Şekil 4.2'de gösterildiği üzere hüzme genişliği alınan optik mesafeye göre değişmektedir. Optik yol boyunca hüzme genişliğinin değişimi için odak noktasında ( $z = 0$ , hüzme beli) hüzme genişliği  $W_0$  iken şu ifade kullanılmaktadır:

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2} \quad (4.5)$$





Şekil 4.2 : Hüzme genişliği  $W(z)$ 'nin alınan optik yol ile değişimi [76].

Hüzme genişliğinin tanımında  $1/e^2$  değeri, yani ışığın %13.53 gücüne düştüğü nokta, kullanılmaktadır. Hüzme çapı bu değerin iki katı olarak  $2W_0$  şeklinde ifade edilmektedir [76].  $z_0$  değeri Rayleigh mesafesi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere hüzme belinde hüzme en düşük genişliğe sahip iken her iki ( $\pm z$ ) yönde de alınan mesafe ile hüzme gittikçe genişler.

Hüzmenin ıraksama açısı için  $z \gg z_0$  iken eşitlik (4.6)'da verilen formül kullanılmaktadır.  $\theta_0$  değeri yarı ıraksama değerini ifade etmektedir ve gücün yaklaşık %86'lık kısmı bu açı içerisinde. Eşitlik (4.5) kullanılarak hüzme çapı için ıraksama açısı eşitlik (4.7)'de verildiği şekilde elde edilir.

$$W(z) \cong \frac{W_0}{z_0} z = \theta_0 z \quad (4.6)$$

$$2\theta_0 = \frac{4}{\pi} \frac{\lambda}{2W_0} \quad (4.7)$$

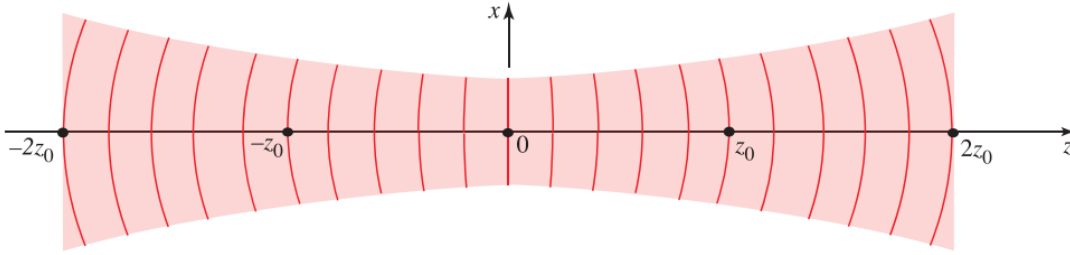
Gaussian hüzmesinin faz terimi eşitlik (4.1)'den gelmektedir ve eşitlik (4.8)'de gösterildiği şekilde tanımlanmaktadır. Hüzme ekseninde ( $\rho = 0$ ) faz terimi ise eşitlik (4.9)'da verildiği gibi yazılır.

$$\varphi(\rho, z) = kz - \zeta(z) + \frac{k\rho}{2R(z)} \quad (4.8)$$

$$\varphi(0, z) = kz - \zeta(z) \quad (4.9)$$

$kz$  düzlem dalgaının fazını,  $\zeta(z)$  ise faz gecikmesini ifade eder.  $\zeta(z)$  bileşeni  $z = -\infty$  için  $-pi/2$  ve  $z = +\infty$  için  $+pi/2$  arasında değişir. Dolayısıyla toplam faz gecikmesi

$\pi$  kadardır. Eşitlik (4.8)'in üçüncü terimi dalga cephesinin eğrilmesinden sorumludur ve fazın merkez etrafındaki sapmasını ifade eder.  $\zeta(z)$  ve  $R(z)$  yavaş değişen fonksiyonlar olduğu için Şekil 4.3'te gösterilen her bir dalga cephesi için sabit kabul edilebilir. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere  $z = 0$ 'da  $R(z)$ 'nin eğimi sonsuz ve dalga cephesi düzdür. Dalga cephesinin düz olduğu yer hüzmeyin tam anlamıyla kolime olduğu bölgedir. Pratik uygulamalarda ıraksama açısının çok küçük olduğu durumlar da kolime kabul edilmektedir. Eğrilik yarıçapı  $R(z)$ ,  $z \gg z_0$  için  $R(z) \cong z$  şeklinde yakınsanabilir. Bu yakınsamayla dalga cephesi küresel bir dalga ile aynı hale gelir.



Şekil 4.3 : Gaussian hüzmeyinin dalga cephesi [76].

Gaussian hüzmeyi aslında gerçek bir hüzmeyin idealleştirilmiş halidir. Hüzmeyin ne kadar Gaussian'a yakınsadığı ise bir kalite faktörü ile ölçülmektedir. Bu kalite faktörü  $M^2$  olarak ifade edilmektedir.  $2W_m$  hüzmeyi çapına ve  $2\theta_m$  ıraksama açısına sahip bir hüzmeyin  $(2W_m * 2\theta_m)$  ideal bir Gaussian hüzmeyi profili  $(2W_0 * 2\theta_0 = 4\lambda/\pi)$  ile karşılaştırılması ile şu eşitlik elde edilir:

$$M^2 = \frac{2W_m \cdot 2\theta_m}{4\lambda/\pi} \quad (4.10)$$

$M^2$  değeri 1 olan bir hüzmeyi ideal bir Gaussian hüzmeyidir. Fakat gerçek hayatta lazer hüzmelerinin  $M^2$  değeri 1'den büyüktür. Modelleme çalışmasında ışık kaynağının ideal bir Gaussian hüzmeyi ( $M^2 = 1$ ) olduğu varsayımıyla benzetimler gerçekleştirilmiştir.

## 4.2 Sonlu Eleman Metodu

Modelleme çalışması, problemleri çözmek için sonlu eleman metodu (SEM) kullanan Comsol Multiphysics uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. SEM, bir diferansiyel denklem ile tanımlanan sınır değer problemlerini bir takım sınır şartları ile çözmek

için kullanılan numerik bir metod olarak tanımlanmaktadır [77]. SEM mühendislik problemlerinde sıkça kullanılan bir numerik analiz tekniğidir. Temel fikir, çözümün yapılacağı alanın daha küçük alt-alanlar (sonlu elemanlar) ile ifade edilmesinde yatmaktadır. SEM ile diferansiyel denklemin çözülmesinin zahmetli olduğu veya mümkün olmadığı karmaşık geometrilere, problemin çözüleceği (1, 2 veya 3 boyutlu) bölge sonlu büyüklükteki küçük alt bölgelere bölünerek çözüm elde edilir. Bu alt bölgelerde çözümün elde edilip birleştirilmesi ile gerçek sonuca çok yakın çözümler elde edilir. Doğru sonucun elde edilebilmesi için alt bölgelerin problemin sınır değerleri ve değişkenleri doğrultusunda yeterince küçük seçilmesi gereklidir. Örneğin, dalga boyu 1 mm olan bir dalga problemi için 1 mm'den daha küçük yapıların kullanılması gereklidir. Böylece, en küçük değişkenden kaynaklı etkiler dikkate alınabilir. Benzer metodoloji izlenerek diğer problemler de tam olarak veya bazı sınır değerleri ve varsayımlar ile kısmen çözümlenerek çözüm elde edilebilmektedir.

Örnek olarak iki boyutlu bir problemin SEM ile çözülmesi için ilk adım problemin modellenmesi, kullanılan materyallerin ilgili özelliklerinin tanımlanması ve problemin sınır koşulları atanmasıdır. Sonraki adım problemin çözüleceği alanın üçgensel, dörtgensel ve benzeri metodlarla alt-alanlara ayrıştırılmasıdır. Alt-alanların köşeleri düğüm noktaları olarak adlandırılır ve esasen problemin çözüleceği noktalardır. Düğüm noktalarının tüm problem alanını kapsamasının yanı sıra sınır koşullarının tanımlandığı kaynak yüzeylerini de tam olarak ifade etmesi gereklidir. Alanın ayrıştırılmasından sonraki adım alt-alanlar için doğrusal veya üssel enterpolasyon polinomlarının oluşturulmasıdır. Böylece alt-alan içerisinde herhangi bir noktanın çözümü düğüm noktalarından yola çıkılarak (enterpolasyon ile) elde edilebilir. Sonraki adım, mevcut diferansiyel denklemin süreklilik şartlarını sağlaması ve polinom derecelerinin azaltılması için zayıf formülasyonunun elde edilmesidir. Zayıf formülasyonun elde edilmesi için ağırlıklı kalan metodu gibi yollar izlenebilmektedir [77]. Zayıf formülasyon için genellikle diferansiyel denklem bir integral formuna sokulur. Böylece integral formu matrisler halinde ifade edilebilir. Matrisler halinde ifade edilen tüm alanın çözümünü elde etmek için mevcut cebirsel algoritmalar kullanılabilir.

Modelleme çalışmasının yapıldığı Comsol Multiphysics uygulaması da ifade edildiği üzere dalga denkleminin çözmek için sonlu eleman metodunu kullanmaktadır. Fakat,

problemin çözüleceği alt-alanların boyutunun benzetimin gerçekleştirildiği KÖ ışık dalga boyunu ( $2\mu\text{m}$ ) katlaması gerekmektedir. Bu değerin tüm alan için katlanması ise çözümün karmaşıklığını arttırıp, çözüme ulaşma süresini uzatmaktadır. Bu sebeple modelleme çalışması Comsol'un BEM (Beam Envelope Metodu) olarak adlandırıldığı bir arayüz ile yapılmıştır. BEM arayüzü ile çözüm sağlayabilmek için faz teriminin önceden sağlanması gerekmektedir. Bu metoda göre, faz ve genlik bileşenine sahip bir optik dalganın ( $\mathbf{E} = E_1 e^{-i\phi_1}$ ) faz teriminin ( $\phi_1$ ) bilinmesi durumunda geriye bilinmeyen olarak sadece genlik terimi ( $E_1$ ) kalacaktır. Faz teriminin girdi olarak sağlanması ve genlik teriminin faz terimine göre çok daha yavaş değişmesi varsayımı altında faz terimi dalga denkleminde kaldırılabilir [78]. Eğer genliğin yavaş değişmesi varsayımı doğru ise dalga boyunun katlanarak çözülmesine gerek yoktur. Bu durumda sadece yavaş değişen genlik teriminin katlanması yeterlidir. Girdi olarak tanımlanan faz terimi bilinemezse veya doğru olarak hesaplanamazsa bu durumda elde edilen çıktının faz terimi yanlış olacaktır. Fakat, elde edilen elektrik alanın normuna bakıldığında elde edilen genlik terimi yine doğru olacaktır. Bu durumda elde edilen mutlak elektrik alan değeri doğru olup faz bilgisi girdi olarak hesaplanan faz terimine bağlı olarak çok doğru olmayabilir. Böyle bir yaklaşım optik dalganın tamamından ziyade genlik bilgisine ihtiyaç duyulduğunda uygulanabilir. Örneğin, bir lens veya kırınım ağına gelen optik dalganın benzetiminde elde edilecek hüzmeye ışın profili çözümü için genlik bilgisi çoğu zaman yeterlidir. Bu yaklaşım ile büyük geometrilerde çözülmesi zor olan optik problemleri kişisel bilgisayarlarda çözülebilir hale gelmektedir.

### 4.3 Modelleme Çalışmaları

Modelleme çalışması iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Model benzetimi için kullanılan AO kristalin boylamsal akustik modda  $\text{TeO}_2$ , ve PE kristalin de  $36^\circ$  Y-kesim  $\text{LiNbO}_3$  olduğu varsayılmıştır. AO etkileşimin modellenmesi için ilk olarak elektrodların uyarılmasıyla PE katmanın titreşimi ve mekanik stresin AO ortama aktarımı sonucu akustik basınç dağılımı elde edilmiştir. Daha sonra akustik basınç dağılımı, anlık hız vektörleri ve akustik yoğunluk dağılımı kullanılarak kırılma indisi değişiminin genliği elde edilmiştir. Elde edilen kırılma indisi değişimi AO etkileşimde kullanılmak üzere AO kristalin kırılma indisi profilini oluşturmaktadır. Sonrasında

elde edilen kırılma indisi profiline bir lazer ışması gönderilmiş ve AO etkileşim sonrasında hava ortamına aktarılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

#### 4.3.1 Piezoelektrik etkileşim benzetimi

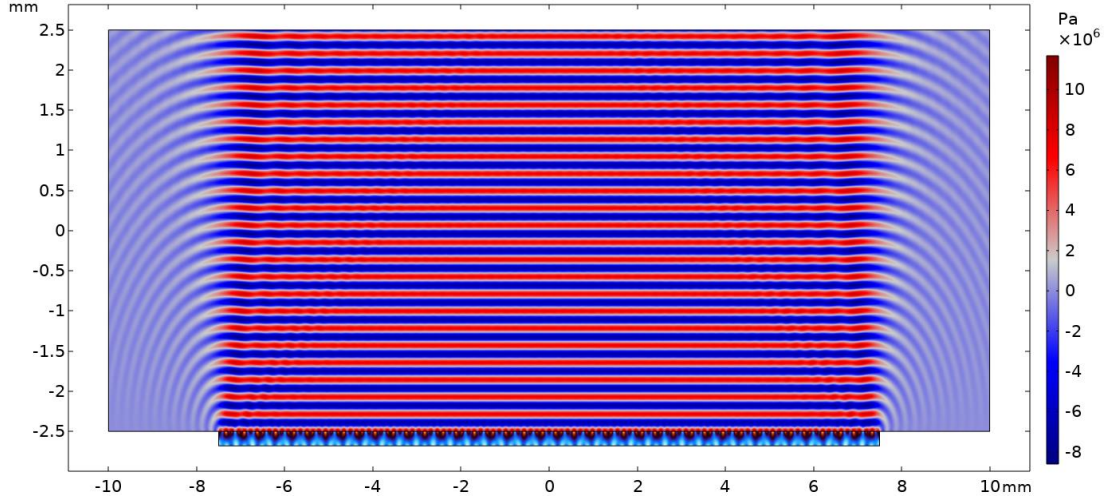
PE etkileşim ile ortamda vuku bulan mekanik stres kendisini basınç dağılımı olarak göstermektedir. Bir optik dalğanın kırılabilmesi için ise ortamın kırılma indisinde değişime ihtiyaç vardır. Dolayısıyla, elde edilen basınç dağılımının kırılma indisi olarak tekrardan değerlendirilmesi gereklidir. Bu durumda daha önce eşitlik (2.7)'de verilen ifadeye göre  $\Delta n$  değerinin elde edilmesi için eşitlik (4.11) kullanılabilir:

$$I_s = 2M_2(\Delta n)^2 \quad (4.11)$$

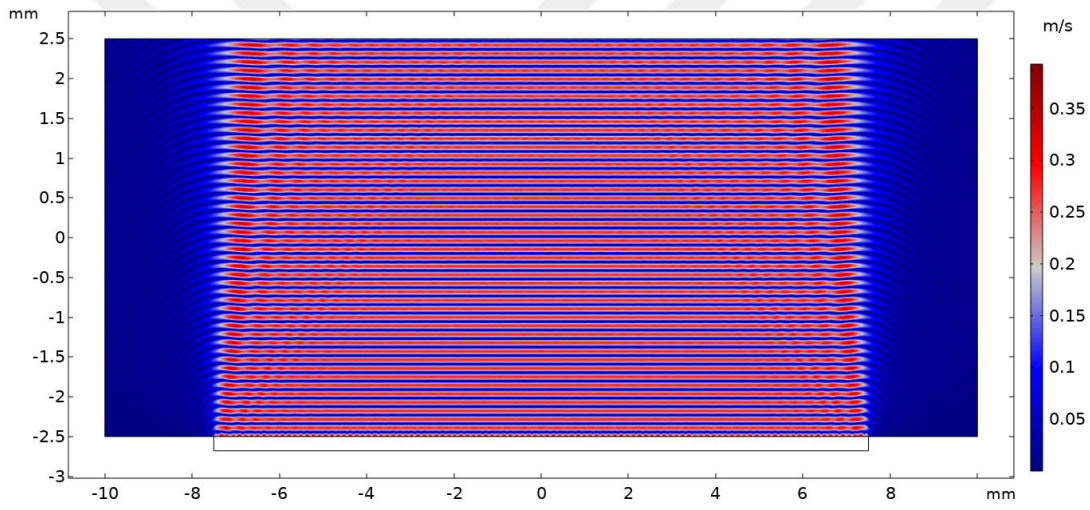
Eşitlikteki  $M_2$  değeri kullanılan AO materyale göre sabittir. Dolayısıyla, kırılma indisi değişimini yaratacak olan akustik yoğunluk dağılımıdır. Akustik yoğunluk dağılımı  $I_s$  için ise kaynaklarda şu ifade geçmektedir [58, 79]:

$$I_s = P * U \quad (4.12)$$

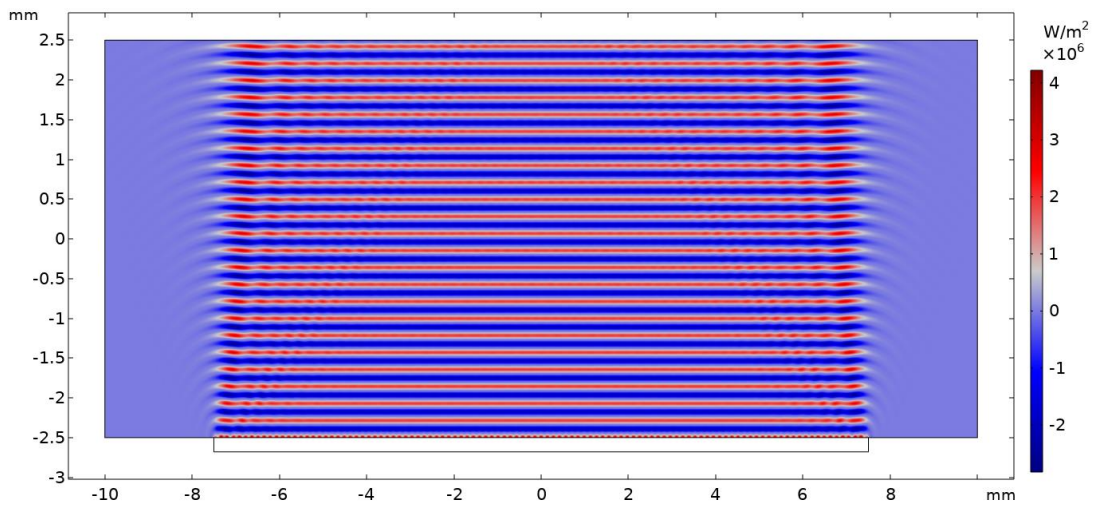
$P$  akustik basınç dağılımını ve  $U$  parçacık hızını ifade ederken akustik yoğunluk zamanda değişen bu iki dağılımın çarpımı ile elde edilebilmektedir. PE etkileşim ile elde edilen akustik basınç ve parçacık hız dağılımı grafikleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu dağılımlardan yola çıkarak, eşitlik (4.11) ve eşitlik (4.12) kullanılarak Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilen akustik yoğunluk dağılımı ve kırılma indisi karşılığı elde edilebilir. Şekil 4.7'de görüldüğü üzere PE etkileşim ile elde edilen kırınım ağı yapısı alınan mesafe ile bir miktar ıraksamaktadır. Elde edilen bu dağılım için PE kristal elektrodlarına 500 V'luk bir potansiyel farkı uygulanmış ve karşılığında yaklaşık olarak  $180 * 10^{-6}$ 'ya karşılık gelen bir  $\Delta n$  elde edilmiştir. Şekil 4.8 elde edilen kırılma indisi dağılımının  $x = 0$  mm'de enine kesitini vermektedir. Görüldüğü üzere ilgili ses dalga boyunda teoride tanımlanana benzer şekilde sinüzoidal bir dağılım elde edilmiştir.



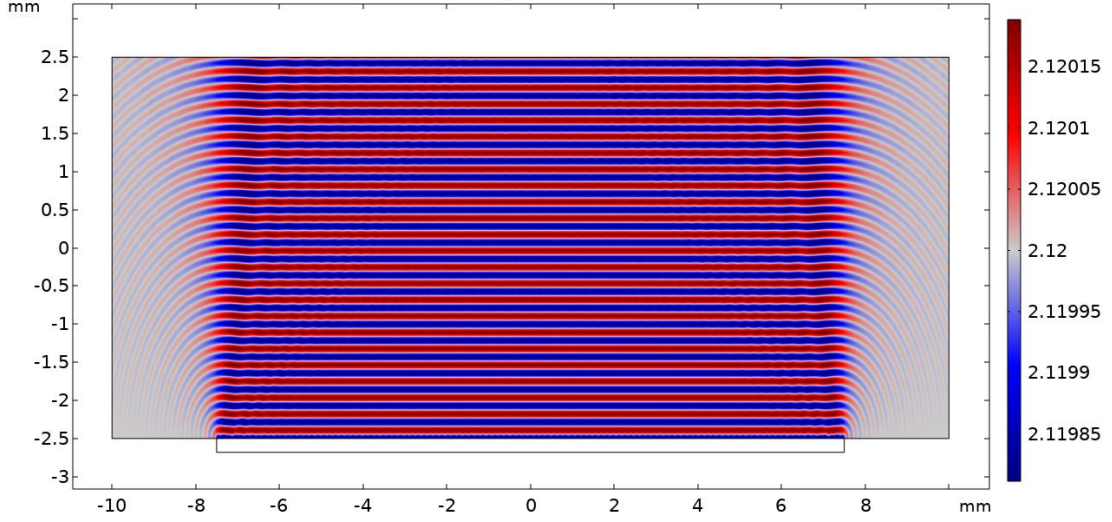
Şekil 4.4 : Ses frekansı 20 MHz için PE etkileşim ile elde edilen akustik basınç dağılımı.



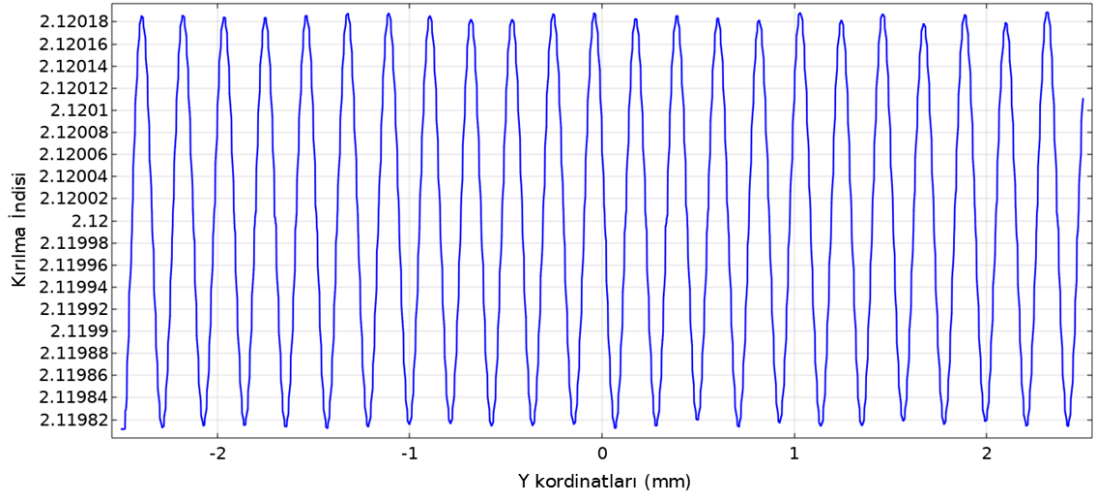
Şekil 4.5 : Ses frekansı 20 MHz için PE etkileşim ile elde edilen parçacık hız dağılımı.



Şekil 4.6 : Ses frekansı 20 MHz için PE etkileşim ile elde edilen akustik yoğunluk dağılımı.



Şekil 4.7 : Ses frekansı 20 MHz için PE etkileşim ile elde edilen dağılımın kırılma indisi karşılığı.

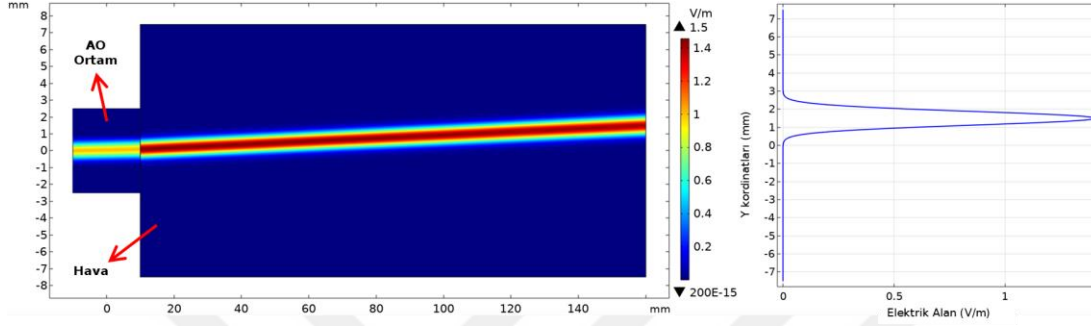


Şekil 4.8 : Kırılma indisi dağılımının  $x = 0$  mm ekseninde enine kesiti

### 4.3.2 Akusto-Optik etkileşim benzetimi

AO etkileşimin incelenmesi için Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de olduğu gibi  $5 \times 20$  mm lik bir AO kristalinin 15 mm'lik genişlikteki bir üst elektroda sahip olduğu ve daha sonra değişken yükseklik ve uzunluktaki hava ortamında yol aldığı varsayılmıştır. AO kristal ile hava geçişinde yansıma ve kayıpları yok saymak için yansıma engelleyici kaplama ilgili dalga boyunda tam efektif çalışır şekilde modellenmiştir. Etkileşim için ses frekansı 40 MHz olarak alınmıştır. Lazer  $2 \mu\text{m}$  optik dalga boyunda ideal Gaussian hüzmeye profiline sahip olacak şekilde modellenmiş ve AO etkileşim bölgesinin tam ortasına odaklanmıştır. Lazer hüzmelerinin FWHM (yarı değerde tam genişlik) hüzmeye genişliği 1 mm olarak belirlenip lazerin kırınım ağı

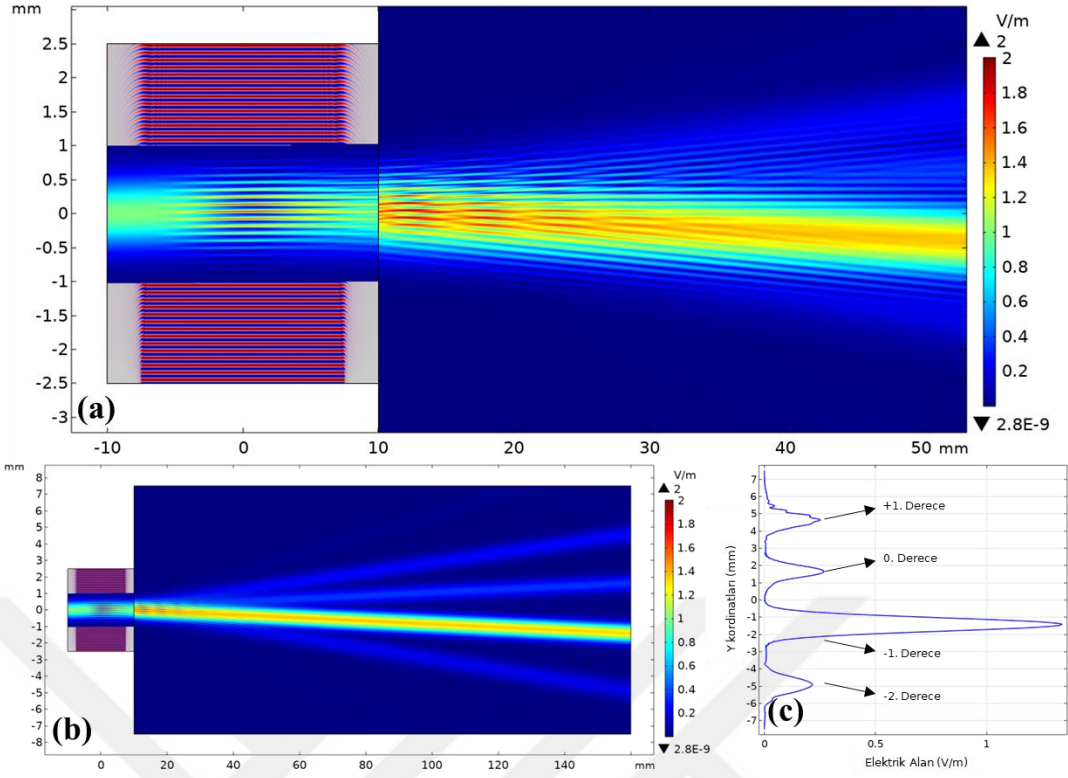
yapısına geliş açısı (boylamsal TeO<sub>2</sub> kristali ve 40 MHz için) eşitlik (2.2) kullanılarak  $\theta_B$  olarak belirlenmiştir. Şekil 4.9 ortamda herhangi bir akustik dalga (AO cihaza elektrik beslemesi) olmadığı zaman elde edilen sonuçları sergilemektedir. Görüldüğü üzere AO ortamda herhangi bir etkileşim olmadığı için lazer hüzmesi herhangi bir kırılmaya uğramadan AO kristalden havaya geçerek ve doğal bir şekilde ıraksayarak yoluna devam etmiştir.



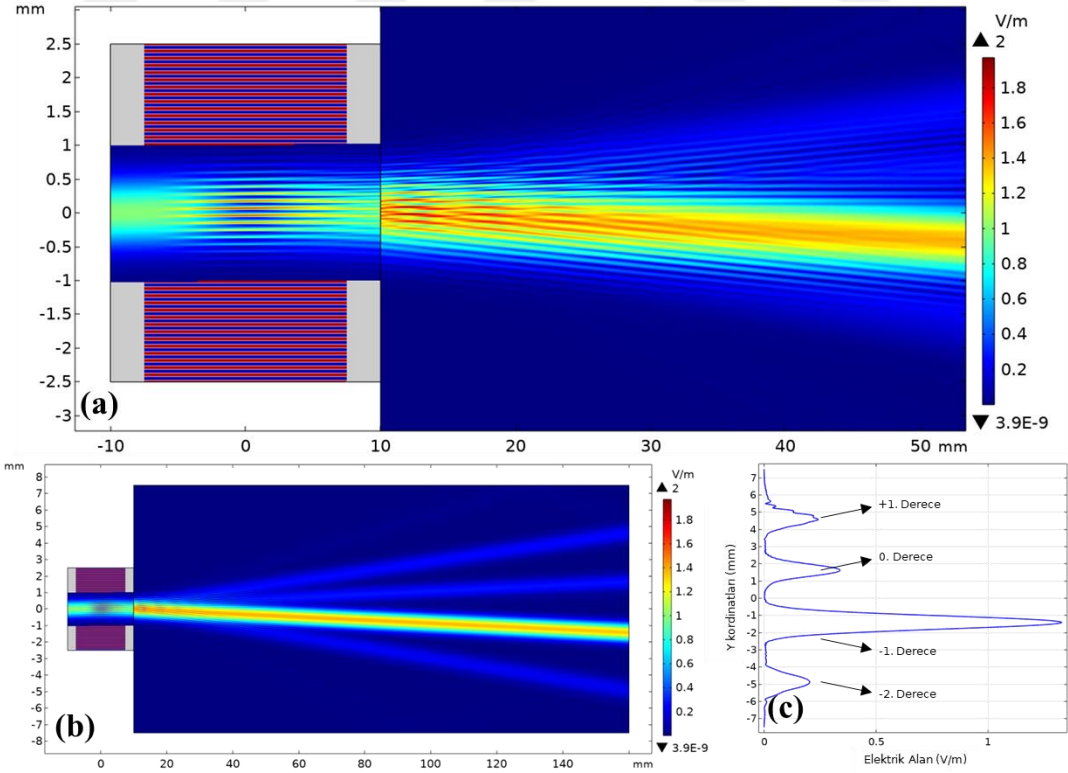
Şekil 4.9 : 2 boyutlu AO cihaz benzetim modelinin kırınım ağı olmadan etkileşim ortamı (sol), lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı (sağ).

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 sırasıyla PE etkileşim ile elde edilen kırınım ağı yapısı ve ideal dikdörtgensel bir sinüzoidal kırınım ağı yapısı arasındaki ilişkiyi incelemek adına oluşturulan AO etkileşim benzetimlerinin sonuçlarını sergilemektedir. Görüldüğü üzere her iki benzetimde de Bragg kırılımı gözlenmiştir ve gelen ışık çoğunlukla 1. dereceye ve bunun yanı sıra az miktarda diğer derecelere de ayrılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, PE etkileşim ve ideal kırınım ağı yapısı ile elde edilen etkileşimler arasında asgari derecede farklar mevcuttur. Kırınım ağı yapısı Şekil 4.8’de gösterildiği ve teoride olduğu gibi sinüzoidal bir dağılıma sahiptir. Sinüzoidal yapı ise doğrudan RF sinyalinin içeriği ile alakalıdır. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 kırınım ağı yapısının sinüzoidal ve kare dalga yapıda olması durumunda elde edilen sonuçların daha etkin olup olmayacağını incelemek adına oluşturulan benzetim sonuçlarından enine çıkış ekseninde elde edilecek azami elektrik alan dağılımının görünümünü vermektedir. Görüldüğü üzere kırınım ağının sinüzoidal veya kare olması azami kırılım durumunda elektrik alan dağılımını asgari düzeyde etkilerken, kare dalga kırınım ağı yapısı ile azami kırılım daha düşük  $\Delta n$  değerinde sağlanabilmektedir. Bu şekilde RF sinyalinin içeriği kare dalgaya yakınsanarak daha etkili kırılımların elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

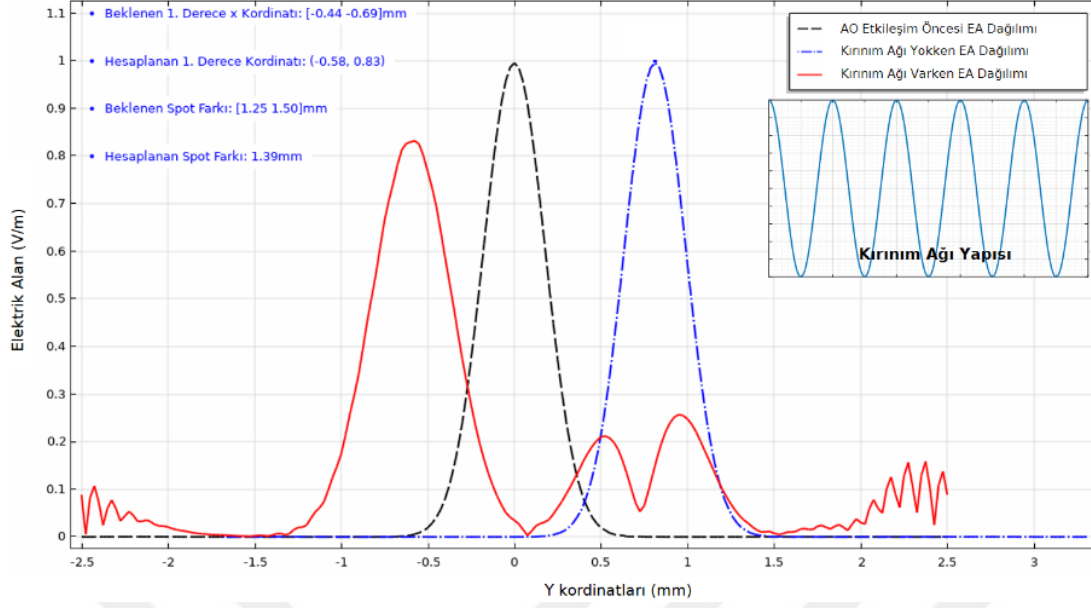




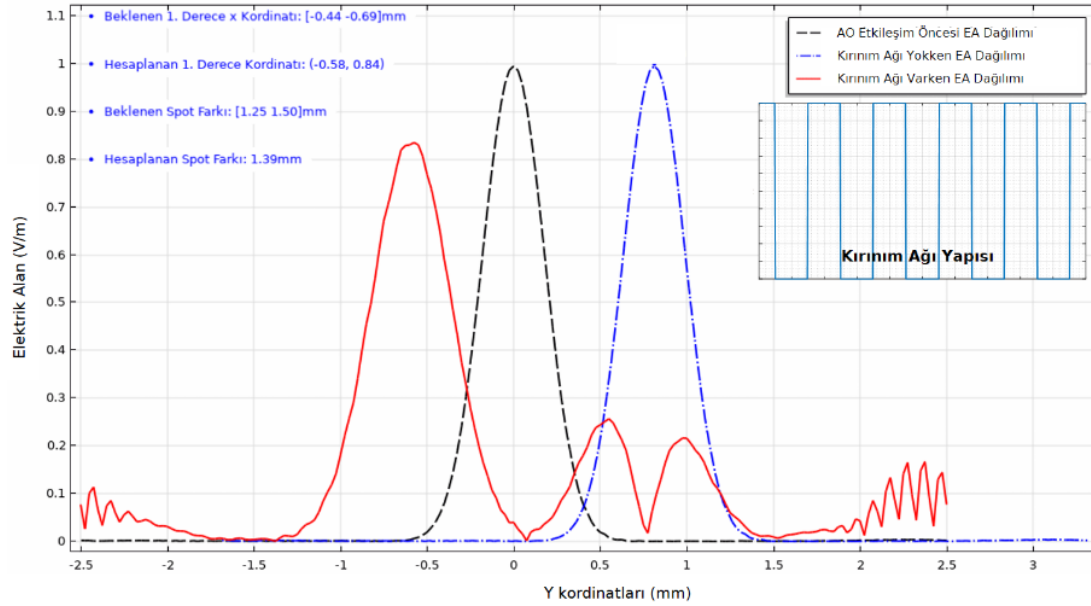
Şekil 4.10 : PE etkileşim ile üretilen kırınım ağı yapısı kullanılarak elde edilen AO etkileşim sonucu; etkileşim bölgesi görünümü (a), etkileşim ortamı (b), lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı (c).



Şekil 4.11 : Teorik kırınım ağı yapısı kullanılarak elde edilen AO etkileşim sonucu; etkileşim bölgesi görünümü (a), etkileşim ortamı (b), lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı (c).



Şekil 4.12 : Sinüzoidal kırınım ağı yapısı ile  $\Delta n = 2.4 \times 10^{-4}$  ile elde edilen azami kırılma örneği ve lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı.

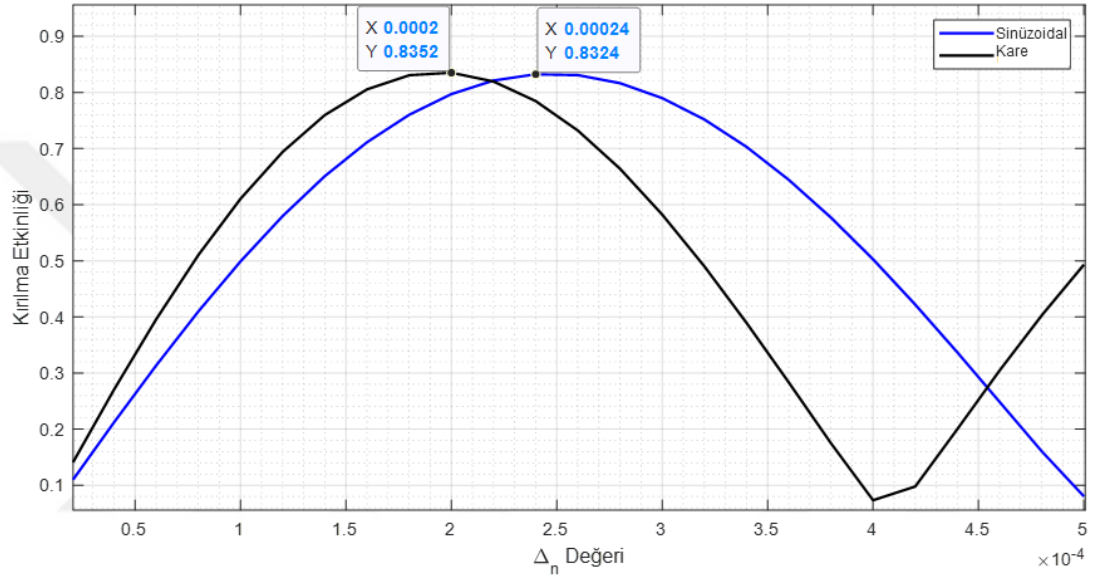


Şekil 4.13 : Kare kırınım ağı yapısı ile  $\Delta n = 2 \times 10^{-4}$  ile elde edilen azami kırılma örneği ve lazer hüzmesinin çıkış yüzeyinde enine elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.14 sinüzoidal ve kare kırınım ağlarında  $\Delta n$  değişimine bağlı olarak kırılma etkinliğinin grafiğini vermektedir. Görüldüğü üzere kare dalga kırınım ağları ile daha düşük  $\Delta n$  değerinde sinüzoidal ile benzer sonuç elde edilebilmektedir. Bir AO modülatörden azami kırılmanın elde edilmesi için gerekli güç,  $k$  dönüşüm kaybını (tipik olarak 1.12) ifade ederken, şu şekilde tanımlanmıştır [80]:

$$P_{azm} = \frac{k\lambda^2 H}{2LM_2} = I_{azm} * LH \quad (4.13)$$

Buna göre, eşitlik (2.38)'de göz önünde bulundurulduğunda, gerekli kırılma indisi değişim genliği  $\Delta n$  azaldıkça gerekli güçte üssel olarak (karesi oranıyla) azalmaktadır. Dolayısıyla, daha düşük  $\Delta n$  değeri doğal olarak daha düşük RF gücü gereksinimi manasına gelmektedir.

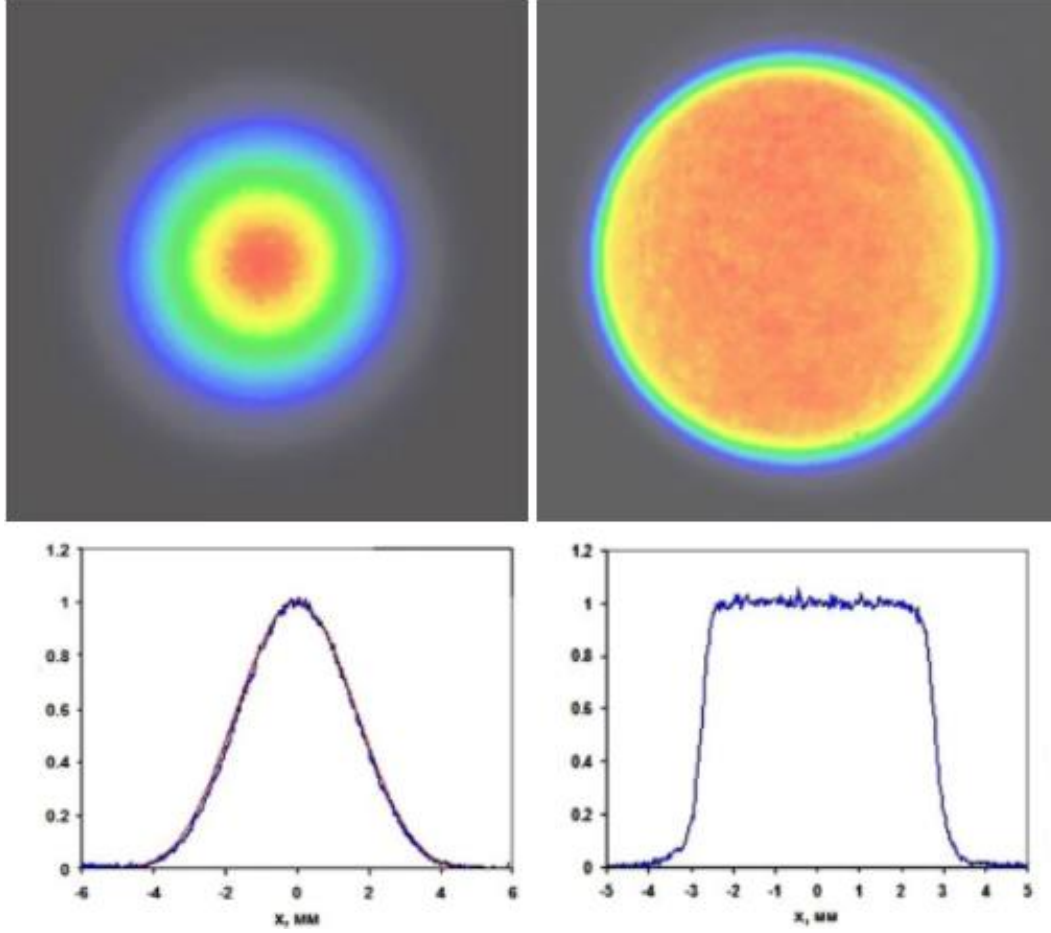


Şekil 4.14 : Sinüzoidal ve kare kırınım ağı yapılarının kırılma etkinliğine etkisi.

### 4.3.3 Hüzme şekillendirme benzetimi

Hüzme şekillendirme optik radyasyonun ışınmasının ve fazının tekrardan belirlenmesi sürecidir [81]. Hüzme şekli ışınmanın dağılımı ile tanımlanmaktadır. Şekillendirilen hüzmenin fazı ise hüzme profilinin yayınımlarını etkileyen esas etkidir. Mesela, düzgün bir faz profiline (kolime) sahip geniş bir hüzme, ışınma profilini uzun bir yayınımlar mesafesinde koruyacaktır [81]. Litografi, lazer yazıcılar/kaynak/kesme, görüntüleme sistemleri, optik veri depolama, optik cımbızlama ve benzeri muhtelif uygulamalarda hüzme şekillendirme süreci işletilmektedir [82]. Bu uygulamaların yanısıra birçok alanda da hüzme şekillendirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Hüzme şekillendirme için rekraktif ve difraktif metodlar, fiber optik sistemler, yansıtıcı aksikonlar, uzamsal ışık modülatörleri ve metamateryel kullanılmaktadır [82, 83]. Şekil 4.15 standart bir

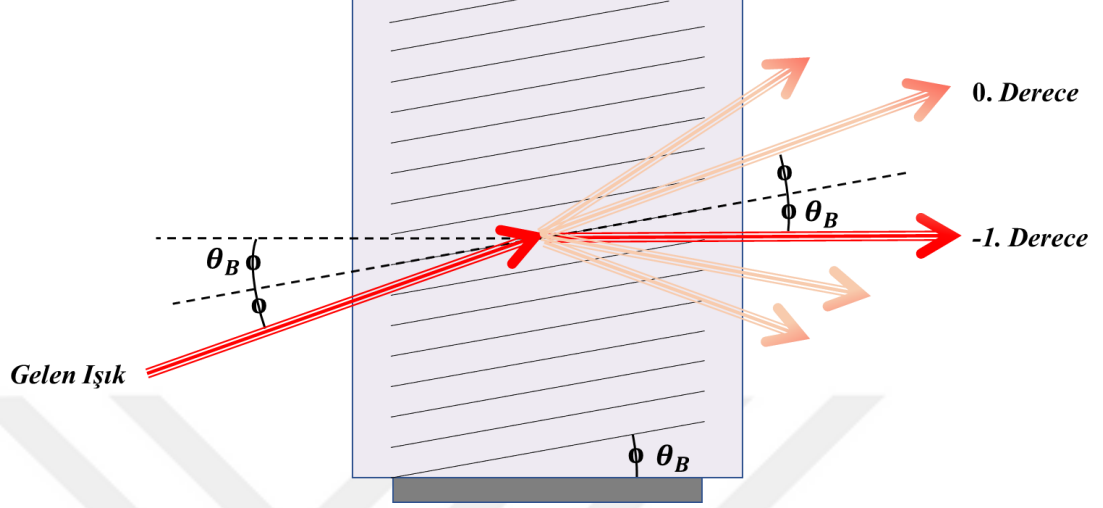
Gaussian hüzmeye profilinin ve düzgün dağılımın tek ve iki boyutlu görünümünü vermektedir.



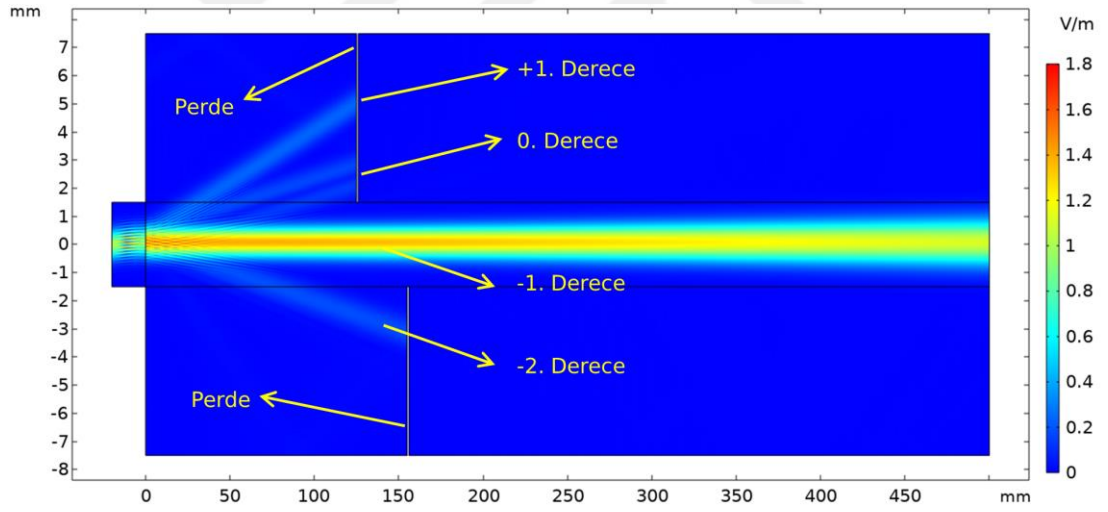
Şekil 4.15 : Işıması kenarlara doğru Gaussian eşitliğine göre azalan Gaussian ışınma profili (sol), ışınma profili düzgün dağılıma sahip (süper Gaussian) ışınma profili (sağ) [83].

AO etkileşim benzetimlerinden farklı olarak hüzmeye şekillendirme benzetimlerinde dikkat edilmesi gereken bir husus vardır. Normal şartlar altında kırınım ağı yapısı x eksenine paralel olduğu için ışığın AO kristale  $\theta_B$  açısı ile gelmesi Bragg şartını sağlamaktadır. Şekil 4.16'da görüldüğü üzere, normalden farklı olarak ışık AO etkileşim ortamına  $2\theta_B$  açısı ile gelmektedir. Buna müteakip kırınım ağının yatay eksen ile  $\theta_B$  kadar açı yapmasıyla gelen ışık için kırınım yönü -1. derece için tam olarak etkileşim ortamının orta bölgesine olacaktır. Bu sayede istenmeyen diğer dereceler daha kolay elenerek hüzmeye şekillendirme benzetim sonuçları daha iyi elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, etkileşim ortamının enine büyümesinin önüne geçilerek benzetimlerin koşma süreleri azaltılmaktadır. Şekil 4.17 hüzmeye

şekillendirme benzetimlerinde AO etkileşim ortamının görünümünü vermektedir. Görüldüğü üzere hem pozitif hem de negatif dereceler için perde kullanılarak bu ışımaların elenmesi sağlanmış, ve hüzme şekillendirme işlemi izole edilmiştir.



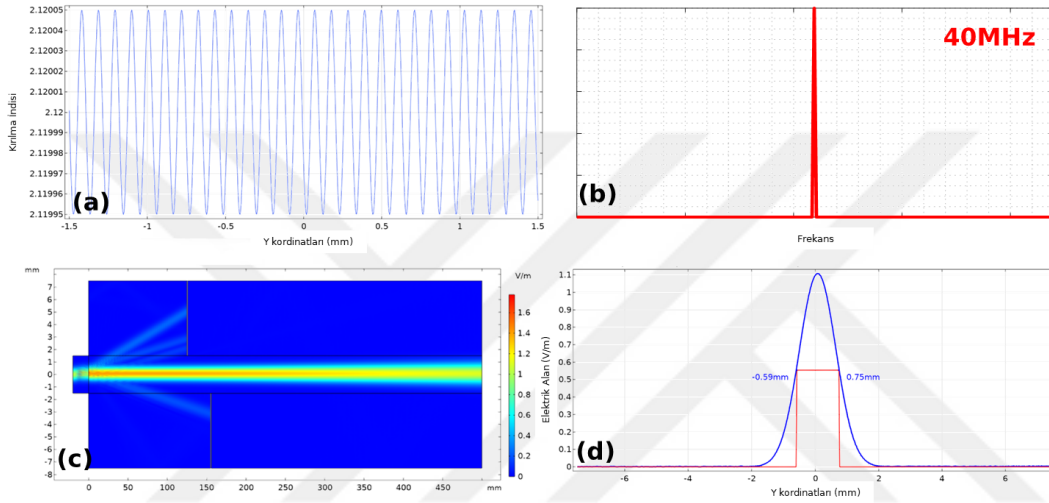
Şekil 4.16 : Giriş açısı  $2\theta_B$  ve kırınım açısı  $\theta_B$  açılı Bragg etkileşimi geometrisi.



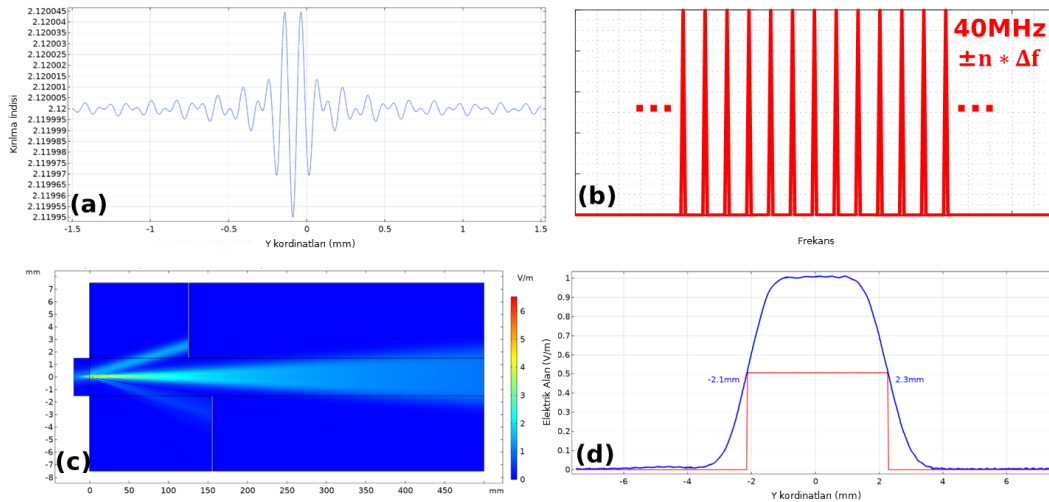
Şekil 4.17 : Hüzme şekillendirme benzetimleri için AO etkileşim ortamı görünümü.

AO modülatörler (ve cihazlar) ortak kullanım amaçları olan modülasyonun yanı sıra bir lazer hüzmesinin Gaussian ışın profiline çeşitli ışın profillerine çevrilmesi amacı ile de kullanılabilir [18, 84-92]. Daha önce verilen şekillerde de görüldüğü üzere normal şartlar altında ses dalgasının tek bir frekans bileşeninin ortamda yarattığı kırılma indisi değişimi ortama gelen lazer hüzmesi ışın ve faz profillerinin yaklaşık olarak korunarak kırılması ile sonuçlanmaktadır. Fakat, ses dalgasının birden fazla frekans bileşenine sahip olması durumunda gelen ışık her bir

frekans bileşeni ile etkileşime girmekte, çapraz ve ara modülasyon ile yeni kırılımlar oluşmaktadır [93]. Aslına bakılırsa, çok frekanslı kırılım ile ortaya çıkan derecelerin kombinasyonu hüzmeye profilini şekillendirmenin bir yolunu açmaktadır. Bu noktadan hareketle, ses dalgasının frekans spektrumunu, yani girdi RF sinyalinin her bir frekans bileşeninin genlik ve fazı kontrol edilerek kırılma sonucu ortaya çıkacak ışık hüzmesi profili optik yol üzerinde bir noktada arzu edilen biçimde kontrol edilebilir. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19, sırasıyla, tek bir frekans ve bir çok frekans bileşenine sahip bir uyarım sinyali ile elde edilen sonuçları sergilemektedir.



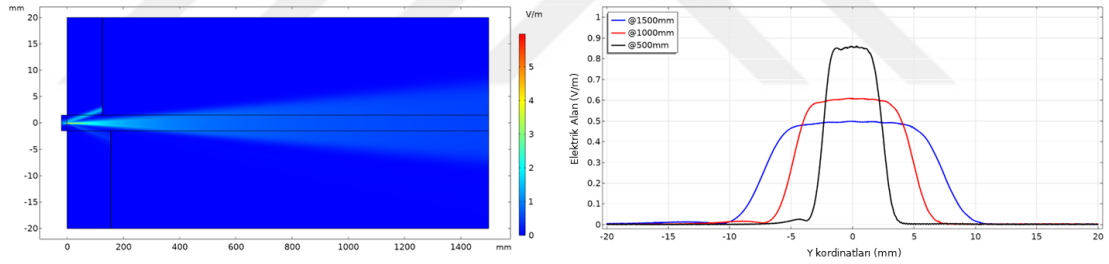
Şekil 4.18 : Tek frekanslı ile oluşturulmuş kırılım ağı yapısı ile AO etkileşim benzetim sonucu; (a) kırılım ağı yapısı için enine kırılma indisi dağılımı, (b) kırılım ağı yapısı temsili frekans spektrumu, (c) etkileşim ortamı, (d)  $x = 500$  mm'de elde edilen enine kesitte elektrik alan dağılımı.



Şekil 4.19 : Birden fazla frekans ile oluşturulmuş kırılım ağı yapısı ile AO etkileşim benzetim sonucu; (a) kırılım ağı yapısı için enine kırılma indisi dağılımı, (b) kırılım ağı yapısı temsili frekans spektrumu, (c) etkileşim ortamı, (d)  $x = 500$  mm'de elde edilen enine kesitte elektrik alan dağılımı.

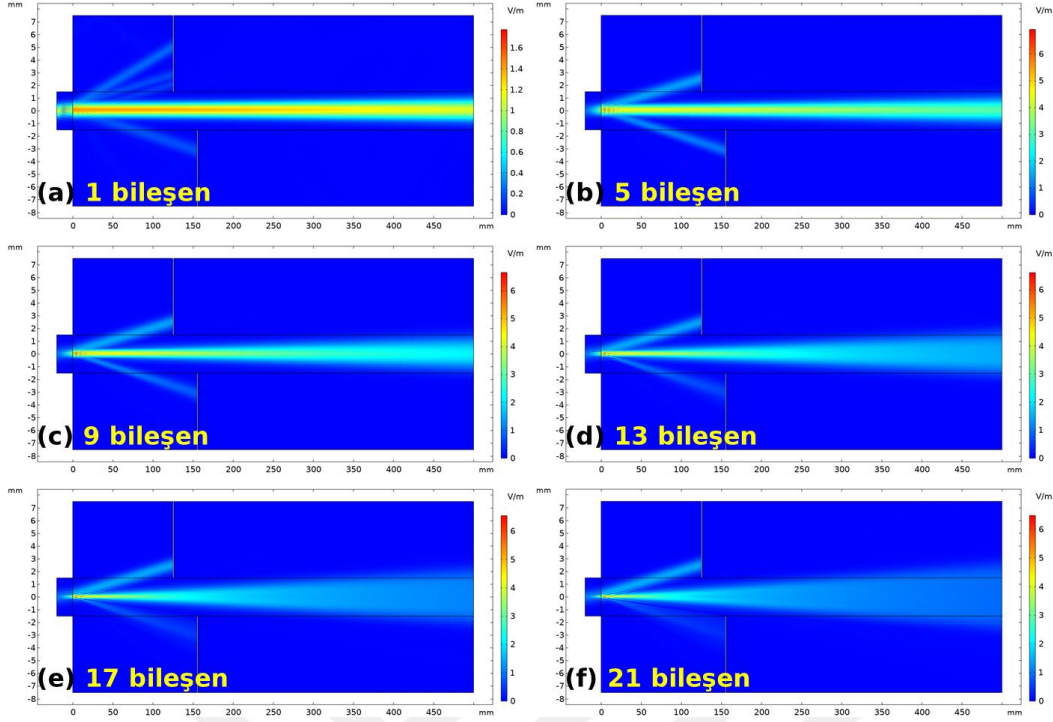
Tek frekans bileşeni ile elde edilen sonuçlarda sadece 40 MHz uyarım frekansı kullanılırken, diğer senaryoda 40 MHz etrafında 1 MHz aralıklar ile dağılmış 21 frekans bileşeni mevcuttur. Şekil 4.18 (d) ve Şekil 4.19 (d)'de verilen ve etkileşim ortamının sonunda enine kesitte elde edilen elektrik alan dağılımları bakıldığında tek frekans etkileşimde ortama gelen gelen Gaussian hüzmeye ışınma profili çoğunlukla korunurken çoklu frekans etkileşimi sonucunda ortama gelen Gaussian ışınma profilinin nerdeyse düzgün bir dağılıma dönüştürülmüştür. Ayrıca, kırmızı çizgi ile yarı değerde hüzmeye genişlikleri (FWHM)'de gösterilmiştir. Buna göre tek frekanslı etkileşimde hüzmeye genişliği yaklaşık 1.34 mm iken çoklu frekans etkileşimi ile yaklaşık 4.4 mm elde edilmiştir.

Şekil 4.20 alınan optik yol ile elektrik alan dağılımının değişimini göstermektedir. Faz profilinin doğal ıraksamasından dolayı hüzmeye genişliği yayılım mesafesi ile doğal olarak artmaktadır. Ayrıca, etkileşim sonucu faz profilinin tekrardan şekillendirilmesiyle, frekans bileşenlerinin sayısı (ve bant genişliği) arttıkça ışınma profilinin daha düzgün olma eğiliminde olduğunu görülmektedir [89].

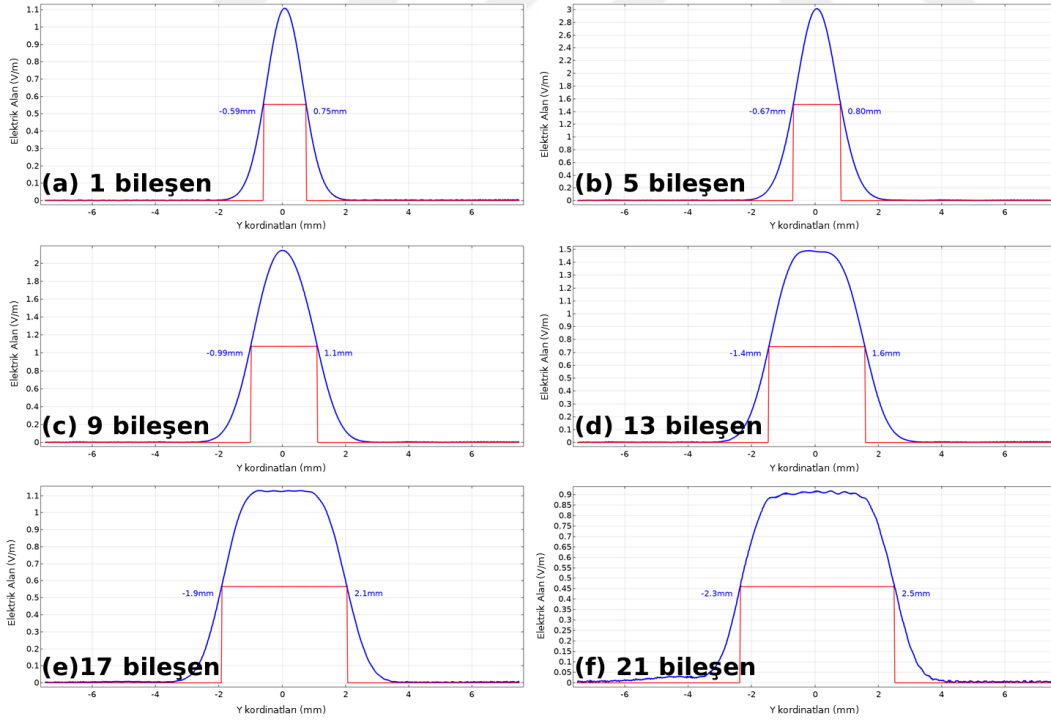


Şekil 4.20 : Birden fazla frekans ile oluşturulmuş kırınım ağı yapısı ile AO etkileşiminin mesafeye bağlı analizi; etkileşim ortamı (sol),  $x = 500$  mm,  $x = 1000$  mm ve  $x = 1500$  mm'de elde edilen enine kesitte elektrik alan dağılımları (sağ).

Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 sırasıyla artan sayıda frekans bileşenlerine sahip bir RF sinyali ile elde edilen AO etkileşim sonuçlarını, etkileşim bölgesi sonunda enine kesitteki elektrik alan dağılımlarını ve kırılma indisi dağılımının enine kesitlerini sergilemektedir. Görüldüğü üzere frekans bileşenlerinin sayısının artmasıyla kırılma indisi dağılımı ışığın geçtiği bölgede daralmakta, buna müteakip hüzmeye genişliği ve hüzmeye ışınma dağılımının düzgünlüğü artmaktadır.

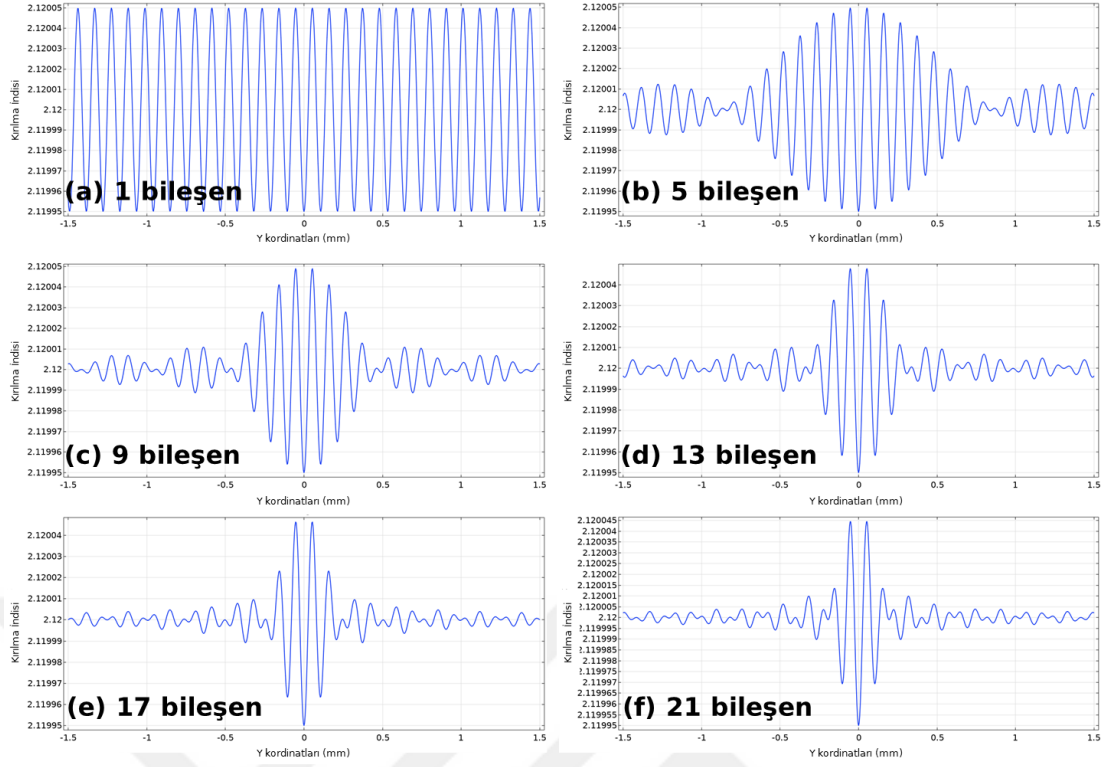


Şekil 4.21 : 1 MHz ile ayrılmış frekans bileşenleri ile elde edilen AO etkileşim benzetim sonuçlarının etkileşim ortamı görünümü; (a) 1 frekans bileşeni, (b) 5 frekans bileşeni, (c) 9 frekans bileşeni, (d) 13 frekans bileşeni, (e) 17 frekans bileşeni, (f) 21 frekans bileşeni.



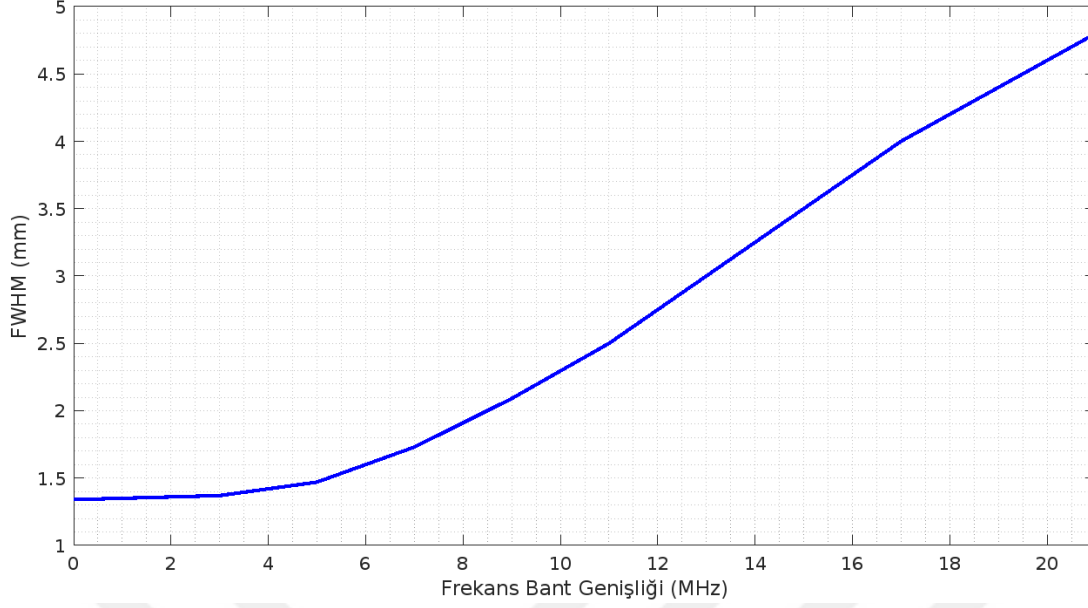
Şekil 4.22 : 1 MHz ile ayrılmış frekans bileşenleri ile elde edilen AO etkileşim benzetim sonuçlarının  $x = 500$  mm'de enine kesitte elektrik alan dağılımları; (a) 1 frekans bileşeni, (b) 5 frekans bileşeni, (c) 9 frekans bileşeni, (d) 13 frekans bileşeni, (e) 17 frekans bileşeni, (f) 21 frekans bileşeni.





Şekil 4.23 : Birbirinden 1 MHz ile ayrılmış frekans bileşenleri ile elde edilen AO etkileşim benzetim sonuçlarının kırılma indisi dağılımının enine kesiti; (a) 1 frekans bileşeni, (b) 5 frekans bileşeni, (c) 9 frekans bileşeni, (d) 13 frekans bileşeni, (e) 17 frekans bileşeni, (f) 21 frekans bileşeni.

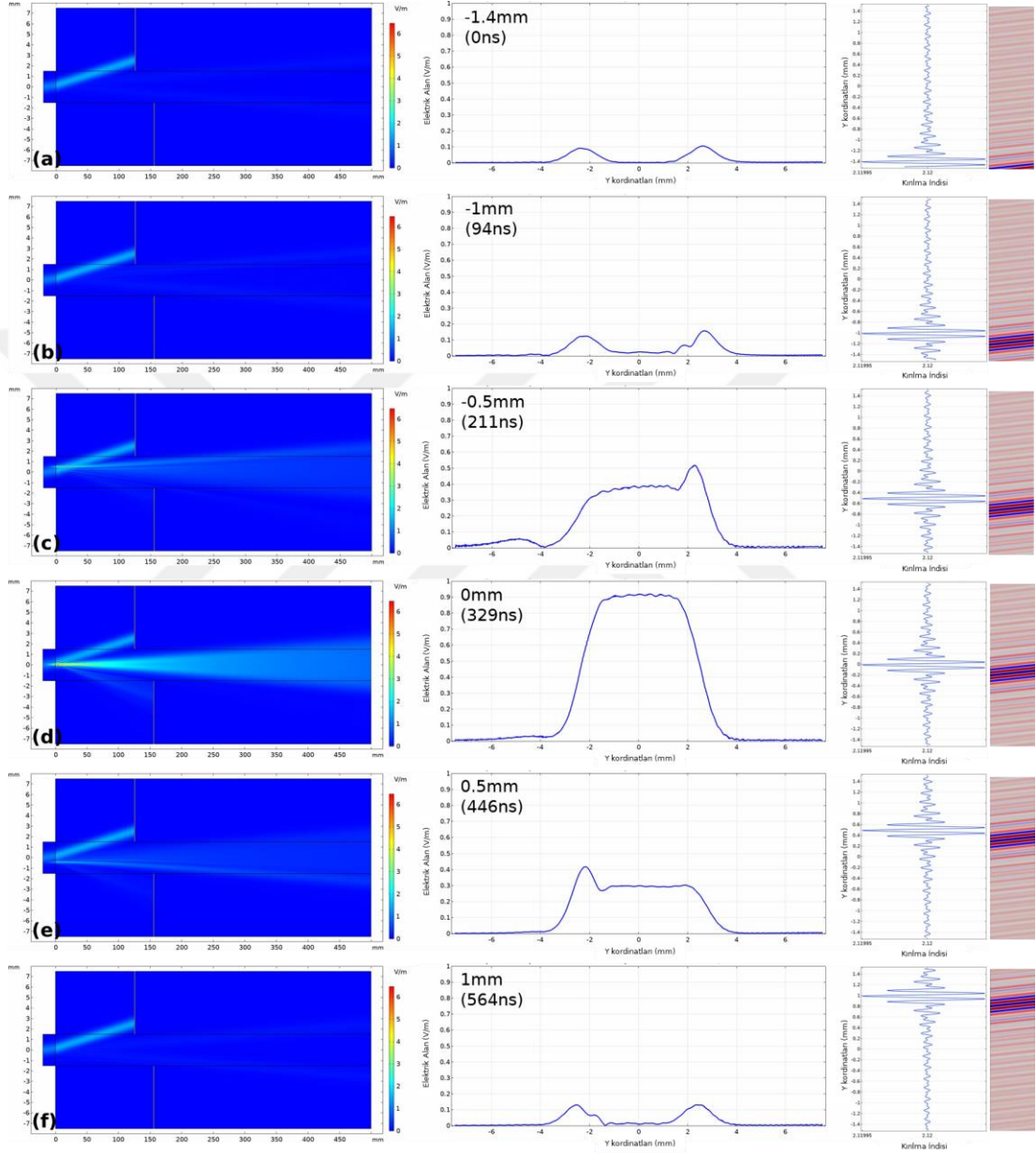
Şekil 4.24 artan frekans bileşeni ve frekans bant genişliği ile hüzmelerin FWHM değerinin değişimini grafiksel olarak sergilemektedir. Görüldüğü üzere frekans bileşenlerinin sayısı ile FWHM arasında doğrusal bir ilişki vardır. FWHM değerindeki artış aslında doğal olarakta hüzmelerin ıraksaması sonucu yayılım mesafesi ile de elde edilebilir. Ancak, frekans bileşenleri artırılarak çok daha kısa mesafede çok daha geniş ve düzgün dağılıma sahip ışımaya profiline sahip hüzmeler elde edilebilmektedir. Ayrıca, eğer frekans bant genişliği belirli bir seviyenin üzerindeyse hüzmelerin faz profilinin çok hızlı ıraksamasından dolayı hüzmelerin ışımaya profili yayılım mesafesine bağlı olarak bozulacaktır. Anlaşılacağı üzere, hüzmeye ışımaya profilinin şekillendirilmesinde esas etken frekans bant genişliğidir. Bunun yanısıra frekans bileşenlerinin sayısının artırılması ile hüzmeye üzerinde kontrol edilebilir nokta sayısı yükselmekte ve ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir.



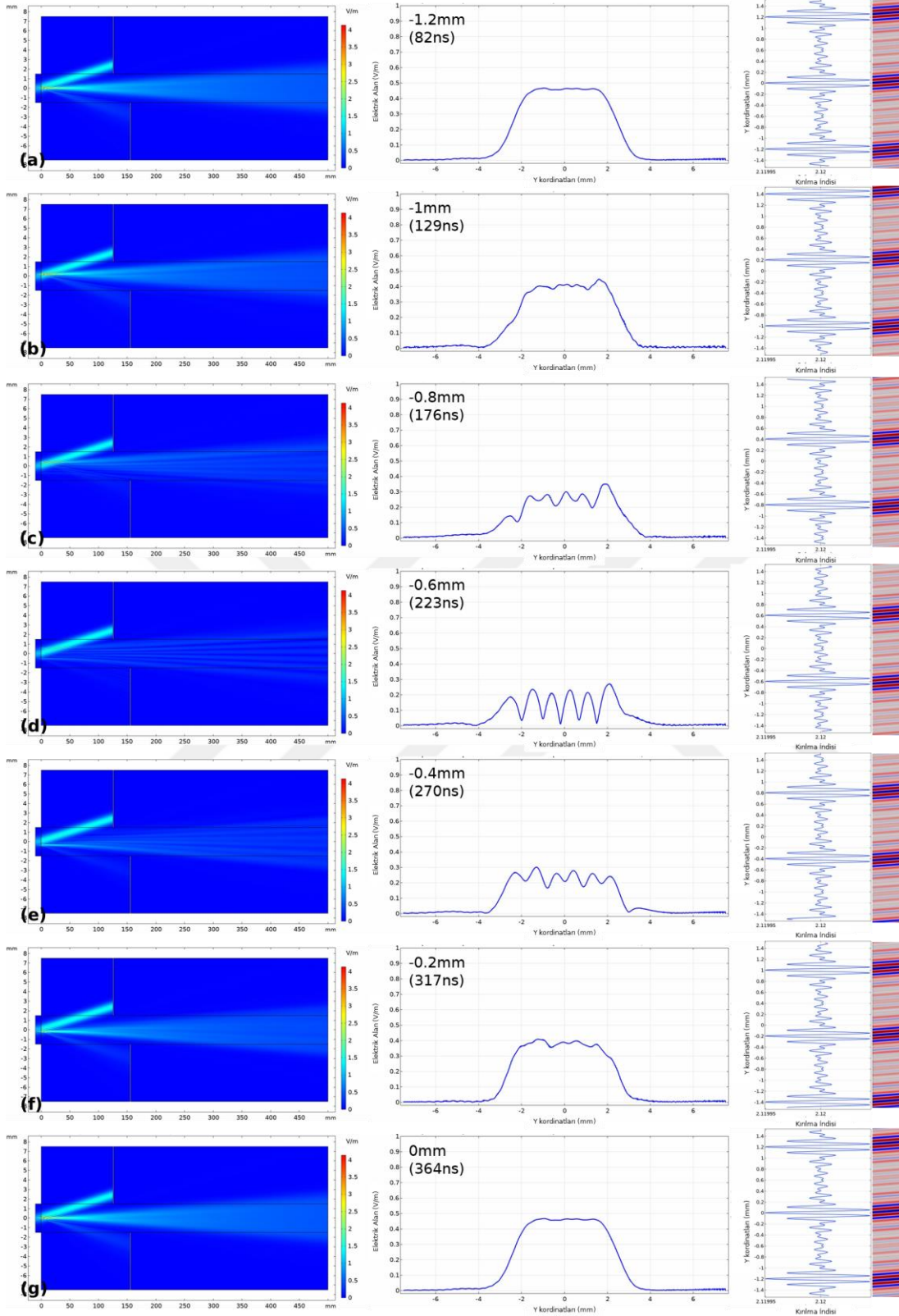
şekil 4.24 : Sürücü frekans bant genişliğine bağlı  $x = 500 \text{ mm}$ 'de enine kesitte elektrik alanının FWHM değerleri.

Hüzme ışıma profilinin AO bir cihaz ile şekillendirilmenin birkaç zorlu noktası vardır. Bunlardan biri akustik dalganın PET yapısından başladığı yolculukta AO ortamda hareketinden dolayı kırınım ağının yer değiştirmesi ve bundan dolayı hüzme ışıma profilinin sürekli şekil değiştirmesidir. şekil 4.25 kırınım ağının hareketini ve bunun sonucunda hüzme ışıma profilinin değişimini göstermektedir. AO hüzme şekillendirme işleminin geçerli olabilmesi için şekil 4.25'te en sağda gösterilen kırılma indisi dağılımının sürekli olarak ( $329\text{ns}$ 'de olduğu gibi) ışığın odak noktasında olması gereklidir. Bu durum kısa atımlı lazerlerde, ışığın ortamdaki hızının sesin ortamdaki hızına göre çok daha hızlı olması sebebiyle, lazerin yükselme anı ile RF uyarımın başlama zamanı arasında senkronizasyon ile başarılabilir. Eğer zamanda sürekli dalga yayını yapan bir lazer kullanılıyorsa şekil 4.25'te görüldüğu üzere durum biraz daha farklıdır. Sürekli dalga yayını sebebiyle kırınım ağının hareketi optik dalga üzerinde sürekli bir etki sağlayacaktır. Bu sebeple zamana bağlı olarak elde edilen hüzme ışıma profili değişecektir. Fakat kırınım ağının tüm AO ortamda boyunca hareketi çoğu zaman mikrosaniye (MHz) mertebelerindedir. Dolayısıyla, alıcı yüzeye ulaşan lazer ışıma profiline bakıldığında aslında elde edilen ışıma profili, eğer alıcı yüzeyin algılama frekansı ışıma profilinin değişim frekansından düşükse, yine düzgün bir dağılıma sahip olacaktır. Bunun yanısıra, yüzeye ulaşan ortalama ışıma profiline bakıldığında tekrardan düzgün bir hüzme ışıma profili algılanacaktır. Bu durumda zamana bağlı hüzmenin profilinin değişmesinin yanısıra, ortalama güç beklenenden

daha düşük olacaktır. Sürekli lazer uygulamasında ortalama gücün artırılması için kırınım ağı yapısının tekrarlama oranı artırılabilir. Şekil 4.26 kırınım ağının etkin bölgesinin (hüzme ışıma profilinde istenilen etkiyi yaratan bölge) tekrarlama sayısı artırılmış olarak gerçekleştirilen simülasyonun örnek çıktılarını sergilemektedir.

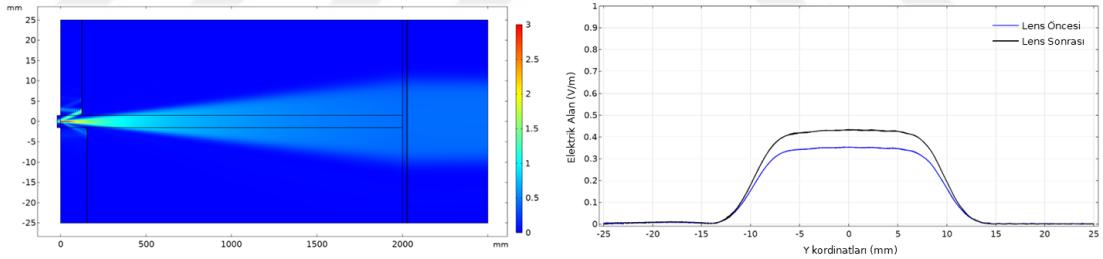


Şekil 4.25 : RF sürücü sinyali 21 frekans bileşenine sahip iken kırılma indisi yapısının doğal hareketi sonucu etkileşim ortamının görünümü (sol),  $x = 500$  mm’de enine kesitte elektrik alan dağılımının değişimi (orta), AO etkileşim bölgesinin enine kesitte kırılma indisinin 1 boyutlu ve 2 boyutlu değişimi (sağ).



Şekil 4.26 : RF sürücü sinyali 21 frekans bileşenine sahip ve efektif bölge sayısı artırılmışken kırılma indisi yapısının doğal hareketi sonucu etkileşim ortamının görünümü (sol),  $x = 500$  mm'de enine kesitte elektrik alan dağılımının değişimi (orta), AO etkileşim bölgesinin enine kesitte kırılma indisinin 1 boyutlu ve 2 boyutlu değişimi (sağ).

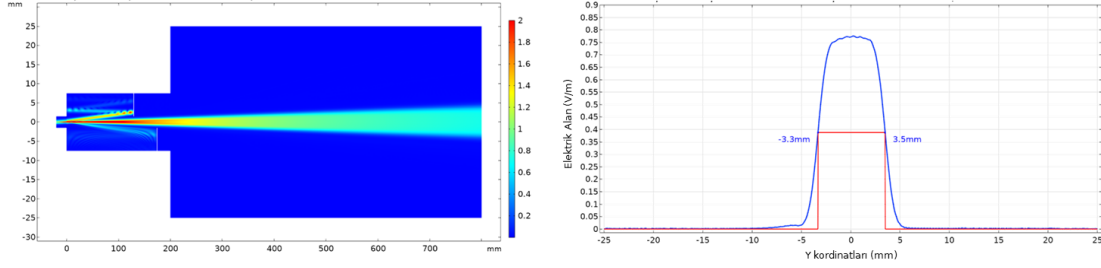
Şekil 4.26’da görüldüğü üzere, Şekil 4.25’te verilen sonuçlara kıyasla hüzme ışımaya profili daha uzun süre şeklini korumaktadır. Ayrıca ortalama güç daha yüksektir. Fakat böyle bir uygulamada çapraz ve ara modülasyonun baskın hale gelerek hüzme ışımaya profilini bozması sebebiyle yüksek kırılma etkinliği ile hüzme ışımaya profilinin şekillendirilmesi pek mümkün olamamaktadır. Dolayısıyla, elde edilen kırılımlar daha az etkinlik yüzdesine sahiptir. Sonuç olarak, sürekli dalga yayılımı yapan lazer uygulamalarında kırınım ağının hareketi dolayısıyla hüzmenin ışımaya profilinin (istenilen profil dışına çıkarak) şekil değiştirmesi hedeflenen etkiye bağlı olarak problem yaratmayabilir. Hüzme ışımaya profilini optik yol boyunca sabit tutmak yani kolimasyon arzu edilen bir durumdur. Zira, daha önce bahsedildiği üzere, hüzmenin doğal iraksama davranışından dolayı hüzme ışımaya profili yayılım mesafesi ile bozulabilir. AO etkileşim ile şekillendirilen hüzmenin içerisinde hüzme faz profilini belirleyen birçok derece mevcuttur. Bu derecelerin her birinin ardışık olarak farklı yönlere ilerlemesi sonucu profilin bozulmasını engellemek için refraktif ve difraktif sistemler kullanılabilir. Şekil 4.27  $x = 2000$  mm’de planokonveks bir lens ile düzeltilen hüzme faz profilinin  $x = 2000$  mm ve  $x = 2500$  mm’de enine kesitte elektrik alan dağılımlarını vermektedir.



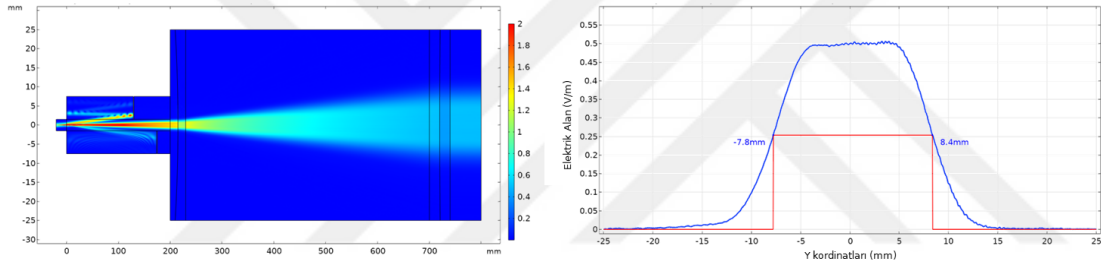
Şekil 4.27 : Çoklu frekans kırılımı sonucu elde edilen hüzme profilinin lens ile kolimasyonu (sol),  $x = 2000$  mm - lens öncesi [siyah] ve  $x = 2500$ mm’de [mavi] elde edilen enine kesit elektrik alan dağılımları (sağ).

Bunun yanı sıra, daha farklı genişletici lens düzenekleri ile daha etkin sonuçlarda elde edilebilir. Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 sırasıyla herhangi bir lens kullanılmadan ve hüzme genişletici bir lens düzeneği kullanılarak elde edilen sonuçları sergilemektedir. Görüldüğü üzere sıradan bir genişletici lens düzeneği ile hüzme ışımaya profilindeki genişleme 6.8 mm’den 16.2 mm’ye çıkartılabilmektedir. Üzerinde durulması gereken bir diğer önemli husus ise hem hüzme şekillendirme benzetimlerinin iki boyutlu olması ve AO etkileşimin hüzme ışımaya profilinin tek eksenini etkilemesi sonucu hüzmenin tek eksende şekillendirilmesidir. Yani, tek bir AO etkileşim ile elde edilen

sonuç hüzme ışına profilini tek bir ekseninde genişletecektir. Hüzme şekillendirme işlemi ile iki ekseninde aynı etkinin elde edilebilmesi için iki adet AO cihaz veya iki adet AO etkileşim gereklidir. Bu AO etkileşimlerden birisi giriş eksenine paralel ekseninde şekillendirme yaparken diğer etkileşim ilk eksene dik olacak şekilde diğer ekseninde şekillendirme yapar. Böylece iki ekseninde de simetrik bir şekillendirme yapılabilir.



Şekil 4.28 : Çoklu frekans kırılımı sonucu elde edilen hüzme profilinin lenssiz hareketi (sol),  $x = 750$  mm'de enine kesit elektrik alan dağılımı (sağ).



Şekil 4.29 : Çoklu frekans kırılımı sonucu elde edilen hüzme profilinin hüzme genişletici lens düzeneği ile sonucu (sol),  $x = 750$  mm'de enine kesit elektrik alan dağılımı (sağ).

## 5. SONUÇ

Bu çalışma genel olarak özetlenecek olursa, ilk bölümde AO etkileşimin tarihinden bahsedilmiş ve teorisi için dalga denkleminde başlanarak dikdörtgenel periyodik bir kırınım ağı ile etkileşime giren bir optik dalganın yayınımlı probleminin çözümü literatürden faydalanılarak türetilmiştir. Devamında AO etkileşim için önemli parametre çıkarımları yapılmış ve bu alanda yaygın kullanılan önemli materyallere dair detaylar aktarılmıştır. Daha sonra kristalin büyütülmesinden RF sürücü devresine kadar AO cihazların üretimi konusunda temel bilgiler verilmeye çalışılarak bir altyapı oluşturulması hedeflenmiştir. Elde edilen teorik bilgi ve üretim metodolojisi anlayışı ile iki boyutlu modelleme çalışmasının hangi yönlerinin daha kritik olacağı hususunda kanaat kazanılmıştır. Bu minvalde son bölümde kızılötesi lazerlerin özellikleri ve sonlu eleman metodunun temel kavramları üzerinde durularak modelleme çalışmalarından bahsedilmiştir. Modelleme için, AO cihazların fonksiyonel hale gelmesini sağlayan iki temel prensip, piezoelektrik ve akusto-optik etkileşim üzerinde durulmuş ve elde edilen sonuçların teori ile uyumu analiz edilmiştir. Son olarak, elde edilen model ile girdi bir Gaussain hüzmesinin şekillendirilmesi üzerine benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve karşılaşılan zorluklar analiz edilmiştir.

AO etkileşimin modellenmesi üzerine literatüre bakıldığında benzer amaçlara sahip bazı çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Dunn ve diğerleri üç boyutlu AO etkileşim üzerine numerik ayırık-adım (split-step) metodu ile bazı sonuçlar elde ettiklerini belirtmiştir [94]. Poon ve diğerleri AO etkileşimin modellenmesi için Matlab kullanarak her bir derece için eşitlikleri elde etmiş ve hesaplamalar yapmışlardır [95, 96]. Alawsi ve diğerleri AO modülatörlerin geçirgenlik karakteristiklerini modelleyerek incelemiştir [97]. Modelleme üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında genel olarak temel AO etkileşim prensibi üzerinde daha önce türetilmiş olan formülasyonları kullanan ve çok kapsamlı olmayan sonuçların elde edildiği görülmektedir. AO hüzme şekillendirme üzerine literatüre bakıldığında 1980'li yıllara dayanan teorik çalışmalar ve sonrasında elde edilen deneysel sonuçlara

rastlanmaktadır. Ohtsuka ve diğeri numerik hesaplamalar ve deneysel sonuçlar ile Raman-Nath bölgesinde hüzme şekillendirme çalışmaları yapmıştır [90, 91]. Poon ve diğeri yaptıkları teorik çalışmalarda Gaussian bir hüzme ışına profiline düzgün bir hüzme ışına profiline dönüştürülebileceğini göstermiştir [88]. Antonov ve diğeri yaptıkları çalışmalarda hem teorik hemde deneysel olarak AO hüzme şekillendirme üzerine çalışmalar yapmıştır [84, 85, 98]. Akemann ve diğeri üç boyutlu doğrusal olmayan mikroskopi için AO hüzme şekillendirmenin kullanımına dair deneysel çalışmalar yapmışlardır [18]. Bechtold ve diğeri kısa lazer darbelerinde hüzme şekillendirmesi için bir method sunmuş ve yüksek hızlarda deneysel olarak göstermiştir [86]. Nite ve diğeri benzeri bir çalışmayı orta KÖ bölge için gerçekleştirmiştir [28]. Trypogeorgos ve diğeri AO hüzme şekillendirme ile ultra soğuk atomların hapsedilmesi için bir metodolojiden bahsetmiştir [92]. Grinenko ve diğeri AO hüzme şekillendirme ile Bessel hüzmelerinin oluşturulması üzerine çalışmalar yapmıştır [87]. Keskin ve diğeri AO hüzme şekillendirmenin KÖ karşı tedbir yöntemlerinin benzetimi için kullanılabileceğinden bahsetmiştir [89]. AO hüzme şekillendirme üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında bol miktarda deneysel sonuçlarla desteklenmiş yayının mevcut olduğu görülmektedir. Bu tez kapsamında yapılan modelleme çalışması ile kapsamlı bir AO cihaz modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen model referans verilen bazı çalışmalardan farklı olarak problemi tam olarak çözmekte ve lazer hüzmesinin durumunu etkileşim bölgesinin tamamında ve daha sonrasında gerçekçi şekilde incelemektedir. Böyle bir model AO etkileşimin daha önce detaylı incelenmemiş bazı yönlerini de araştırmaya olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada elde edilen bilgi birikimi ve sonuçlar ile gelecekte de çalışmalara devam edilmesi hedeflenmektedir. Muhtemel çalışma konuları şu şekildedir: Oluşturulan modelin iki boyuttan üç boyuta çıkartılarak etkileşimin daha doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi, hüzme şekillendirme benzetimlerinin üç boyutlu ve birden fazla AO cihaz içerecek şekilde güncellenmesi, deneysel çalışmaların yapılması ve alınan geri dönüt ile model üzerinde iyileştirme çalışmalarının yapılması ve modelleme kısmına akustik empedans eşleme ve üst elektrod ile alakalı iyileştirme çalışmalarının yapılmasıdır. Bu çalışmaların nihai hedefi, modelleme çalışması sonucu her bir adımı analiz edilmiş, parametreleri türetilmiş AO cihazların üretimi için gerekli teorik altyapının oluşturulması ve bu kritik teknolojinin tüm adımlarının kazanılmasıdır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Saleh, B.E.A., Teich, M.C.**, *Acousto-optics*, Fundamentals of photonics. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., (2019).
- [2] **Goutzoulis, A.P., Kludzin, V.V.**, *Principles of acousto-optics*, Design and fabrication of acousto-optic devices. New York, Marcel Dekker, Inc., (1994).
- [3] **Bass, M.**, *Acousto-optic devices*, Handbook of optics volume v atmospheric optics, modulators, fiber optics, x-ray and neutron optic. McGraw Hill, (2009).
- [4] **Markets and Markets Research Private Ltd.**, (2016). *Acousto-optic device market*. Erişim: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/acousto-optic-device-market-171228873.html>, [Erişim Tarihi: 27.10.2022].
- [5] **Mordor Intelligence**, (2021). *Acousto optic devices market - growth, trends, covid-19 impact, and forecasts (2022 - 2027)*. Erişim: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/acousto-optic-devices-market>. [Erişim Tarihi: 27.10.2022].
- [6] **Savage, N.**, (2010). Acousto-optic devices. *Nature Photon*, 4, 728-729.
- [7] **Römer, G., Bechtold, P.**, (2014). Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. *Physics Procedia*, 56, 29-39.
- [8] **Śliwiński, A.**, (1990). Acousto-optics and its perspectives in research and applications. *Ultrasonics*, 28, 195-213.
- [9] **Mesleh, R., AL-Olaimat, A.**, (2018). Acousto-optical modulators for free space optical wireless communication systems. *Journal of Optical Communication Networks*, 10.
- [10] **Zhang, Q., Chang, J., Wang, Q., Wang, Z., Wang, F., Qin, Z.**, (2018). Acousto-optic Q-switched fiber laser-based intra-cavity photoacoustic spectroscopy for trace gas detection. *Sensors*.
- [11] **Staupendahl, G.**, (2015). Q-switched CO<sub>2</sub> laser material processing system with acousto-optic modulators, *Almanya Patent*, No: DE102014013567B3, Tarih: 08.10.2015.
- [12] **Yaras Y.S., Satir, S., Ozsoy, C., Kocaturk, O., Ramasawmy, R., Campbell-Washburn, A.E., Lederman, R.J., Değertekin, F.L.**, (2018). Acousto-optic catheter tracking sensor for interventional MRI procedures. *IEEE Trans Biomed Eng*, 66, 1148-1154.

- [13] **Gutty, F., Grisard, A., Joly, A., Larat, C., Papillon-Ruggeri, D., Lallier, E.,** (2015). Multi-kW peak power acousto-optically tunable thulium-doped fiber laser system. *Optics Express*, 23.
- [14] **Hitzenberger, C.K., Trost, P., Lo, P.-W., Zhou, Q.,** (2003). Three-dimensional imaging of the human retina by high-speed optical coherence tomography. *Optics Express*, 11, 2753-2761.
- [15] **Gurevich, B.S., Shapovalov, V.V.** (2011). Acousto-optic devices and components for biomedical applications. *Tenth International Conference on Correlation Optics*.
- [16] **Chen, Y., Li, W., Hyypä, J., Wang, N., Jiang, C., Meng, F., Tang, L., Puttonen, E., Li, C.** (2019). A 10-nm spectral resolution hyperspectral lidar system based on an acousto-optic tunable filter. *Sensors*, 19.
- [17] **Jeong, D., Jang, H., Jung, M.U., Kim, C.-S.** (2022). Angular resolution variable FMCW lidar with acousto-optic deflector. *Technical Digest Series (Optica Publishing Group)*.
- [18] **Akemann, W., Léger, J.F., Ventalon, C., Mathieu, B., Dieudonné, S., Bourdie, L.** (2015). Fast spatial beam shaping by acousto-optic diffraction for 3D non-linear microscopy. *Optics Express*, 23, 28191-28205.
- [19] **Konstantinou, G., Kirkby, P.A., Evans, G.J., Nadella, K.M.N.S., Griffiths, V.A., Mitchell, J., Silver, R.A.,** (2016). Dynamic wavefront shaping with an acousto-optic lens for laser scanning microscopy. *Optics Express*, 24, 6283-6299.
- [20] **Molchanov, V.Y., Anikin, S.P., Chizhikov, S.I., Yushkov, K.B., Makarov, O.Y., Tatarnikov, A.M., Potanin, S.A., Esipov, V.F.,** (2014). Acousto-optical imaging spectropolarimetric devices: new opportunities and developments. *Proc. SPIE 9147, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*.
- [21] **Belyaev, D.A., Yushkov, K.B., Anikin, S.P., Dobrolenskiy, Y.S., Laskin, A., Molchanov, V.Y., Potanin, S.A., Korablev, O.I., Makarov, O. Mantsevich, S.N.** (2018). Acousto-optic infrared imaging spectrometer for close-up sensing of planetary surfaces. *Proc. SPIE 10765, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVI*.
- [22] **Koechlin, M., Poberaj, G., Günter, P.,** (2009). High-resolution laser lithography system based on two-dimensional acousto-optic deflection. *Review of Scientific Instruments*, 80.
- [23] **Smith, T.,** (2001). Acousto-optic weapon location system and method, *ABD Patent*, No: US6215731B1, Tarih: 10.04.2001.
- [24] **Gao, G.-H., Lin, Z.,** (1993). Acousto-optic supermultispectral imaging. *Applied Optics*, 32, 3081-3086.

- [25] **Wen, T., Zhuang, Z.W., Wei, J.B., Ma, D.T.**, (2006). A novel method to improve spatial resolution of acousto-optic deflector. *Optoelectronic Letters*, 2, 34-36,.
- [26] **Ward, J., Valle, S.**, (2018). Acousto-optic devices for operation in the infrared. *Photonics Europe*.
- [27] **Valle, S., Ward, J., Pannell, C., Johnson, N.**, (2015). Acousto-optic tunable filter for imaging application with high performance in the IR region. *Photonics West - Optoelectronic Materials and Devices*.
- [28] **Nite, J., Cyran, J., Krummel, A.**, (2012). Active Bragg angle compensation for shaping ultrafast mid-infrared pulses. *Optics Express*, 20, 23912-23920.
- [29] **Ward, J., Stevens, G., Shardlow, P.C.**, (2016). Acousto-optic devices for operation with 2 $\mu$ m fibre lasers. *Proc. SPIE 9730, Components and Packaging for Laser Systems II*.
- [30] **Jieping, X., Kuanxin, Y.**, (1986). Applications of acousto-optical correlation devices in radar signal processing. *Applied Acoustics*, 5.
- [31] **Abramovitz, I.J.**, (1985). Passive surveillance applications of acousto-optic processors. *Technical Symposium East*.
- [32] **Lee, J.N., Udelson, B.J., Berg, N.J.**, (1977). Acousto-optic signal processing for radar applications. *Proc. SPIE 0128, Effective Utilization of Optics in Radar Systems*.
- [33] **Williams, C.T., Jennings, M.R.**, (1986). Acousto-optic spectrum analyser for laser radar applications. *1986 Quebec Symposium*.
- [34] **Berg, N.J., Pellegrino, J.M.**, Acousto-optic signal processing theory and implementation. Marcel Dekker, Inc., (1996).
- [35] **Rhodes, W.T.**, (1981). Acousto-optic signal processing: convolution and correlation. *Proceedings of the IEEE*, 69.
- [36] **Brillouin, L.**, (1922). Diffusion of light and x-rays by a transparent homogeneous body (diffusion de la lumière et des rayons x par un corps transparent homogène). *Annales de Physique*, 17, 88-122.
- [37] **Korpel, A.**, *Historical background*, Acousto-optics. Marcel Dekker, Inc., 5-29, (1997).
- [38] **Goutzoulis, A.P., Pape, D.R., Kulakov, S.V.**, Design and fabrication of acousto-optic devices. New York: Marcel Dekker, Inc, (1994).
- [39] **Debye, P., Sears, F.**, (1932). On the scattering of light by supersonic waves. *Proceedings of The National Academy of Sciences*, 18, 409-414.
- [40] **Lucas, R. Biquard, P.**, (1932). Optical properties of solid and liquid media subjected to ultra sonic elastic vibrations (Propriétés optiques des milieux solides et liquides soumis aux vibrations élastiques ultrasonores). *Journal de Physique et Le Radium*, 3, 464-477.

- [41] **Klein, W., Cook, B.**, (1967). Unified approach to ultrasonic light diffraction. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 14, 123-134.
- [42] **Brillouin L.**, (1933). *Actual. Sci. Ind*, 59.
- [43] **Raman, C. V., Nath, N.N.**, (1935). The diffraction of light by high frequency sound waves: Part I. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 2, 406-412.
- [44] **Raman, C.V., Nath, N.N.**, (1935). The diffraction of light by high frequency sound waves: Part II. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 2, 413-420.
- [45] **Raman, C.V., Nath, N.N.**, (1936). The diffraction of light by high frequency sound waves: Part III. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 3, 459-465.
- [46] **Raman, C.V., Nath, N.N.**, (1936). The diffraction of light by high frequency sound waves: Part IV. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 3, 119-125.
- [47] **Raman, C.V., Nath, N.N.**, (1936). The diffraction of light by high frequency sound waves: Part V. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 3, 459-465.
- [48] **Van Cittert, P.**, (1937). On the theory of light diffraction at ultrasonic waves (Zur theorie der lichtbeugung an ultraschallwellen). *Physica*, 4, 590-594.
- [49] **Kogelnik, H.**, (1969). Coupled wave theory for thick hologram gratings. *The Bell System Technical Journal*, 48, 2909-2947.
- [50] **Phariseau, P.**, (1956). On the diffraction of light by progressive ultrasonic waves. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 44, 165-170.
- [51] **Smith, T.M., Korpel, A.**, (1965). Measurement of light-sound interaction efficiency in solids. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-1, 283-284.
- [52] **Gordon, E.**, (1966). A review of acousto-optical deflection and modulation devices, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-2, 104-105.
- [53] **Young, E. H.**, (1993). X-cut crystal quartz acousto-optic modulator, *ABD Patent*, No: 5,268,911, Tarih: 05.02.1993.
- [54] **M.V. Lomonosov Moscow State University**, (-). *Physics Department, acousto-optic materials*. Erişim: <http://acousto-optics.phys.msu.ru/materials.html>. [Erişim Tarihi: 26.10.2022].
- [55] **Çetin, A.**, (-). *Kristal yapılar da yön ve düzlemler*. Erişim: <https://muhendishane.org/kutuphane/temel-malzeme-bilgisi/kristal-yapilar-da-yon-ve-duzlemler/>. [Erişim Tarihi: 26.10.2022].

- [56] **Nefedov, V.G., Pape, D.R.**, *Acousto-optic device manufacturing*, Design and fabrication of acousto-optic devices. New York, Marcel Dekker, Inc., 339-403, (1994).
- [57] **COMSOL**, (2014). *Piezoelectric effect*. Erişim: <https://www.comsol.com/multiphysics/piezoelectric-effect>. [Erişim Tarihi: 27.10.2022].
- [58] **Kinsler, L.E., Frey, A.R.**, *Fundamentals of acoustics*. Wiley, (1962).
- [59] **Boston Piezo Optics Inc.**, (-). Lithium niobate, Tarih Belirtilmemiş. Erişim: <https://www.bostonpiezooptics.com/lithium-niobate>. [Erişim Tarihi: 27.10.2022].
- [60] **Goutzoulis, A.P., Beaudet, W.R.**, *Transducer design*, Design and fabrication of acousto-optic devices. New York, Marcel Dekker, Inc., 285-339, (1994).
- [61] **Perkins, G.D., Colbert, J. R.** (1971). Piezoelectric transducer, *ABD Patent*, No: 3,735,161, Tarih: 23.11.1971.
- [62] **Coqui, G.A., Meitzler, A.H., Warner, A.W.**, (1969). Lithium niobate transducers, *ABD Patent*, No: 3,591,813, Tarih: 28.2.1969.
- [63] **Dutta, P.**, (2011). Bulk growth of crystals of iii-v compound semiconductors. *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, 3, 36-80.
- [64] **Kokh, A., Shevchenko, V., Vlezko, V., Kokh, K.**, (2013). Growth of TeO<sub>2</sub> single crystals by the low temperature gradient Czochralski method with nonuniform heating. *Journal of Crystal Growth*, 384, 1-4.
- [65] **Kappler, R., Lydon, D., Turnquist, T.**, (2011). *Use of x-ray diffraction analysis to determine the orientation of single-crystal materials, american laboratory*. Erişim: <https://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/1593-Use-of-X-ray-Diffraction-Analysis-to-Determine-the-Orientation-of-Single-Crystal-Materials/>. [Erişim Tarihi: 28.10.2022].
- [66] **Newport**, (-). *Technical Note: Optical Surfaces*. Erişim: <https://www.newport.com/n/optical-surfaces>. [Erişim Tarihi: 28.10.2022].
- [67] **Edmund Optics**, (-). *Anti-Reflection (AR) Coatings*. Erişim: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/anti-reflection-coatings/>. [Erişim Tarihi: 28.10.2022].
- [68] **Kent, L.W.J.**, (2017). Transducer, *Avustralya Patent*, No: AU2017371617A1, Tarih: 14.06.2018.
- [69] **Pape, D.R., Wasilousky, P.A., Krainark, M.**, (1987). A high performance apodized phased array bragg cell. *Proc. SPIE 0789, Optical Technology for Microwave Applications III*.

- [70] **Wu , J., Xu, Z., Ji, K., Lv, G., Wang, C., Li, X.,** (2020). Transducer design of acousto-optic modulators. *Proc. SPIE 11562, AOPC 2020: Advanced Laser Technology and Application*.
- [71] **Voloshinov, V., Knyazev, G.A.,** (2003). Acoustooptic cells with nonuniform length of light-sound interaction. *Technical Physics*, 48, 1475-1479.
- [72] **Antonov, S.,** (2019). The underlying technology of a broadband highly efficient acousto-optic cell (deflector) on the basis of a paratellurite crystal. *Instruments and Experimental Techniques*, 62, 823-829.
- [73] **AA Opto-Electronic, (-).** *Theory & general application notes*. Erişim: <http://www.aoptoelectronic.com/documents/>. [Erişim Tarihi: 28.10.2022].
- [74] **Gooch and Housego, (-),** *Acousto-optic devices, gooch and housego*. Erişim: <https://gandh.com/products/acousto-optics>. [Erişim Tarihi: 28.10.2022].
- [75] **Castech, (-).** *RF Drivers*, Erişim: <https://www.castech.com/product/RF-Drivers-23.html>. [Erişim Tarihi: 27.10.2022].
- [76] **Saleh, B.E.A., Teich, M.C.,** *Beam optics, Fundamentals of photonics*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 80-109, (2019).
- [77] **Polycarpou, A.C.,** *Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics*. Springer Nature Switzerland, (2006).
- [78] **Mizuyama, Y.,** (2018). *How to use the beam envelopes method for wave optics simulations*. Erişim: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-use-the-beam-envelopes-method-for-wave-optics-simulations/>. [Erişim Tarihi: 31.10.2022].
- [79] **Sakai, S.,** (2003). *Radiation force measurements at a water-air interface* (yüksek lisans tezi), University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [80] **Isomet, (-).** *Application Notes: AO modulation*, Tarih Belirtilmemiş. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://isomet.com/appnotes.html>. [Erişim Tarihi: 02.11.2022].
- [81] **Dickey, F.M., Holswade, S.C.,** *Laser beam shaping theory and Techniques*. New York: Marcel Dekker Inc., (2000).
- [82] **Dickey, F.M., Lizotte, T.E.,** *Laser beam shaping applications* (2nd Ed.). New York: CRC Press, (2017).
- [83] **Edmund Optics, (2022).** *Laser beam shaping*. Erişim: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/webinars/laser-beam-shaping>. [Erişim Tarihi: 01.11.2022].
- [84] **Antonov, S.N., Filatov, A.L.,** (2018). Acousto-optic control of the energy profile of laser radiation. *Technical Physics*, 63, 90-94.

- [85] **Antonov S.N., Rezvov, Y.G.**, (2021). Acousto-optic control of the energy profile of laser beam. *Technical Physics*, 66, 1078-1084.
- [86] **Bechtold, P., Hohenstein, R.**, (2013). Beam shaping and high-speed, cylinder-lens-free beam guiding using acousto-optical deflectors without additional compensation optics. *Optics Express*, 21, 14627-14635.
- [87] **Grinenko, A., MacDonald, M.P., Courtney, C.R.P., Wilcox, P.D.**, (2015). Tunable beam shaping with a phased array acousto-optic modulator. *Optics Express*, 23.
- [88] **McNeill, M.D., Poon, T.-C.**, (1994). Gaussian-beam profile shaping by acousto-optic Bragg diffraction. *Applied Optics*, 33.
- [89] **Keskin, M.Z., Figen, Z.G., Özdür, İ.T.**, (2022). Modelling an Acousto-Optic Beam Shaping Device for a DIRCM Laser Laboratory Setup. *2022 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*.
- [90] **Ohtsuka, Y., Tanone, A.**, (1981). Acousto-optic intensity modification of a gaussian laser beam. *Optics Communications*, 39, 1981.
- [91] **Ohtsuka, Y., Arima, Y., Imai, Y.**, (1985). Acoustooptic 2-D profile shaping of a Gaussian laser beam. *Applied Optics*, 24.
- [92] **Trypogeorgos, D., Harte, T., Bonnin, A., Foot, C.**, (2013). Precise shaping of laser light by an acousto-optic deflector. *Optics Express*, 21, 24837-24846.
- [93] **Hecht, D.**, (1974). Acousto-optic nonlinearities in multifrequency acousto-optic diffraction. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 10, 759-760.
- [94] **Dunn, D., McNeill, M., Xia, J., Poon, T.-C.**, (1997). Three-dimensional analytical and numerical solutions for acousto-optic interaction. *IEEE*.
- [95] **Cont, A., Poon, T.-C.**, (2003). Simulations of bistable acousto-optic devices using MATLAB. *IEEE*.
- [96] **Poon, T.-C., Kim, T.**, (2005). Acousto-optics with MATLAB. *Acousto-optics and Photoacoustics*.
- [97] **Alawsi, S.M., Al-Janabi, L.A.K., Mahdi, S.A.** (2018). Transmission characteristic simulation of high frequency acousto-optic modulators. *Optics and Photonics Journal*, 8, 98-110.
- [98] **Antonov, S.N.**, (2005). Angular splitting of the bragg diffraction order in an acoustooptical modulator due to a frequency-modulated acoustic wave. *Technical Physics*, 50, 513-516.





