

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

**KOMPAKT VE AZ GÜÇ TÜKETEN ELEKTRO-OPTİK MODÜLATÖRLER  
İÇİN TERSİNE TASARIM İLE ÜRETİLEN OPTİK YAPI ELEMANLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Abdullah Bera İÇLİ**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT**

**KASIM 2020**



## 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.

Abdullah Bera İçli



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KOMPAKT VE AZ GÜÇ TÜKETEN ELEKTRO-OPTİK MODÜLATÖRLER İÇİN TERSİNE TASARIM İLE ÜRETİLEN OPTİK YAPI ELEMANLARI

Abdullah Bera İçli

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

Danışman: Prof. Dr. Hamza Kurt

Tarih: Kasım 2020

Elektro-optik modülatörlerin kullanımı boyut ve verimlilik açısından kısıtlıdır. Elektro-optik modülatörlerin performans kriterleri arasında yer alan dalga kılavuzu uzunluğu ve bu dalga kılavuzuna uygulanan elektrik alanın yarattığı yapıcı ve yıkıcı girişimler bu cihazların en önemli özelliği olan elektro-optik etkiler yoluyla incelenmelidir. Bilindik elektro-optik modülatörlerden biri olan Mach-Zehnder Modülatör bu kapsamda incelenebilir. Mach-Zehnder Modülatörler Y-eklem parçalarından oluşturulabilmektedir. Bu parçalardan Y-eklem yapılarının performansından ödün vermeden Y-eklemin kol uzunluğunun kısaltılabilmesi önem arz etmektedir. Kol uzunluğu cihazın boyutuna doğru orantıyla etki edecektir. Aynı şekilde, modülasyon etkisinin kullanılması için ihtiyaç olan aktivasyon gerilimi de boyut değiştikçe değişime uğrayacaktır. Yüzey alanının azalmasıyla beraber, güç tüketimi de azalacak ve böylece maliyet açısından da daha karlı yapılar üretilebilecektir. Bu noktada, tasarımların boyut ve güç olarak daha makul seviyelere çekilebilmesi gerekmektedir.

Ortaya çıkan performans sonuçları, sezgisel yöntemle yapılan fotonik tasarımlarla incelenmiştir. Ancak, sezgisel yöntemlerle dene-yanıl yapılar tasarlanan fotonik

sistemler hem performans açısından yetersiz kalabilmekte, hem de belli bir boyuttan daha küçük olamamaktadır. Günümüzde, fotonik tasarımları tersine tasarım yöntemleriyle geliştirerek yapılabilecek tasarımların çeşitliliği artırılmaktadır. Sezgisel yöntemlerle elde edilen performanslara benzer seviyelerde cihazlar daha küçük boyutlarda ve böylece az güç tüketen şekilde tasarlanabilmektedir. Bunun için optik ve geometrik parametrelerin değiştirilmesi ve hazırlanacak konfigürasyonda farklılığa gidilerek tasarım tarzının değiştirilmesi gerekmektedir. Topoloji değişikliği yaparak geometri açısından daha başarılı yapılara ulaşılabilmektedir. Kırıcılık indisi dağılımı serbest bırakılarak elektrik alan dağılımı üzerinde yapılan değişimler gözlenerek iteratif algoritmalarla istenilen seviyelerde başarı oranına, istenilen boyutlarda varılabilmektedir. Normalde, sezgisel yöntemle yapılabilen tasarımların çözüm kümesi parametreler ile limitli iken, tersine tasarım topolojisi kullanarak hazırlanan tasarımların parametre uzayı çok daha fazla olmaktadır. Bu sebeple, tez kapsamında elektro-optik modülatörlerin temel fonksiyonları incelenmiş ve burada ortaya çıkan küçültme ve verimlilik sorunlarına tersine tasarım yöntemiyle çözüm getirilmiştir. Tersine tasarım yöntemleri incelenmiş ve yöntemlerden biri olan hedef öncelikli algoritma ile SPINS arasındaki fark anlatılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan SPINS ile iki farklı yapı tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalarda tasarlanan yapılardan biri 3D yazıcı ile üretilmiş olup deneyler sonucunda ümit verici sonuçlara erişilmiştir. Bu tasarımlar elektro-optik modülatörlerin modellenmesinde farklı konfigürasyonların ve başarılı, kompakt ve az güç tüketen tasarımların önünü açabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektro-optik modülatörler, Tersine tasarım, Kompakt tasarım, Az güç tüketimi, Mach-Zehnder interferometresi, Y-eklem yapılar

## **ABSTRACT**

Master of Science

### **OPTICAL COMPONENTS PRODUCED WITH INVERSE DESIGN FOR COMPACT AND LESS POWER CONSUMING ELECTRO-OPTICAL MODULATORS**

Abdullah Bera İçli

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

Supervisor: Prof. Dr. Hamza Kurt

Date: November 2020

The use of electro-optic modulators is limited in size and efficiency. Waveguide length, which is among the performance criteria of electro-optic modulators, and constructive and destructive interferences created by the electric field applied to this waveguide should be examined with electro-optical effects, the most important feature of these devices. Mach-Zehnder Modulator, one of the known electro-optic modulators, can be examined in this context. Mach-Zehnder Modulators can be formed from Y-junctions. It is important to be able to shorten the arm length of the Y-junction without compromising the performance of the Y-junction structures. Likewise, the required activation voltage will change as the size changes. With the decrease in the surface area, the power consumption will also decrease and thus more profitable structures can be produced in terms of cost. At this point, designs should be able to be taken to more reasonable levels in terms of size and power.

The resulting performance results were analyzed with photonic designs made by intuitive method. However, photonic systems designed by trial and error using heuristic methods can be inadequate in terms of performance and cannot be smaller

than a certain size. Today, the variety of designs that can be made can be increased by developing photonic designs with reverse design methods. Devices with levels similar to the performances obtained by heuristic methods can be designed in smaller dimensions and less power consumption. For this, it is necessary to change the optical and geometric parameters and change the design style by making a difference in the configuration. By making topology changes, more successful structures in terms of geometry can be achieved. By releasing the refractive index distribution, by observing the changes on the electric field distribution, the desired levels of performance can be reached in desired dimensions with iterative algorithms. Normally, the solution set of designs that can be made with the heuristic method is limited by the parameters, on the contrary, the parameter space of the designs prepared using the inverse design topology is much more. Therefore, within the scope of the thesis, the basic functions of electro-optic modulators have been examined, and the reduction and efficiency problems that arise here have been solved by the inverse design method. Inverse design methods are examined and the difference between objective-first algorithm and SPINS, which are two of these methods, is explained. Two different structures were designed with the SPINS used in this thesis study. One of the structures designed in the studies was produced with a 3D printer and conducting an experiment, promising results were achieved. These designs can pave the way for different configurations and successful, compact and low power consuming designs in the modeling of electro-optic modulators.

**Keywords:** Electro-optic modulators, Inverse design, Compact design, Low power consumption, Mach-Zehnder Interferometer, Y-Junction structures



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımnda bilgi birikimi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, tavsiyeleri, teşvik ve anlayışıyla beni yüksek lisans çalışmam boyunca en doğru şekilde yönlendiren saygıdeğer hocam Prof.Dr.Hamza KURT'a en derin saygılarımı ve şükranlarımı sunuyorum. Değerli hocam, iyi ki sizinle tanıştım ve sizinle beraber çalışma fırsatı buldum.

Tez ve makale çalışmalarımna katkıda bulunan ve tez jürimde bulunan Doç.Dr.Mirbek Turduev ve Dr.Öğr.Üyesi Rohat Melik hocalarıma çok teşekkür ediyorum.

Kurt Araştırma Grubu'nun değerli üyeleri olan arkadaşlarıma verdikleri destekleri ve güzel muhabbetleri için teşekkür ediyorum. Birlikte akademik çalışma imkanı bulduğum Ahmet Mesut Alpkılıç, Yusuf Abdülaziz Yılmaz ve Mediha Tutgun'a ayrıca bir kez daha teşekkür etmek istiyorum. İşyerimde beni çalışmalarım sırasında hep destekleyen ve dostluklarımı esirgemeyen en başta ekibim Ali Şener Kaya ve Buğra Melemen olmak üzere, Emre Demir, Metin Furkan Tanrıver, Mehmet Sağlam, Samet Güzel, Eren Can Aydoğan ve Deniz Akdoğan'a teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, birim yöneticimiz Ali Murat Günçan'a bu süreçteki destekleri için çok teşekkür ediyorum.

Bana çalışmalarım sırasında fikren ve motivasyonel olarak kesintisiz destek veren ve yalnız bırakmayan sevgili dostlarım Selim Mürsel Yavuz ve Mustafa Kamil İman'a değerli dostlukları ve destekleri için çok teşekkür ediyorum.

Beni hayatım boyunca maddi-manevi destekleyen, çalışmalarımnda başarıya ulaşmam için benim kadar istekli olan, sevgilerini hiçbir şekilde benden esirgemeyen güzel ve değerli ailem Hasibe İçli, Baki İçli ve Sadık Beren İçli'ye her zaman yanımda olmaya çalıştıkları, olamadıkları zaman da yanımda olduklarını hissettirdikleri için sonsuz şükranlarımı sunuyorum. Sizin gibi harika bir ailem olmasaydı, hayata dair bu kadar idealim, inancım ve umudum olamazdı.

Yaşadığım her türlü zorluğu aşmamda koşulsuz yanımda duran, beni her zaman motive eden, geleceğe umutla bakmamı sağlayan, canım eşim Ezgi Uslu İçli'ye kalbimin en derinlerinden teşekkür ediyorum.

Ayrıca, bana yüksek lisans süresince araştırma bursu sağlayan TOBB ETÜ'ye ve çalışmalarımna finansal destekte bulunan Roketsan A.Ş.'ye desteklerinden dolayı teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SEMBOLO LİSTESİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ELEKTRO-OPTİK MODÜLATÖRLER VE YAPI BİLEŞENLERİ</b> .....	<b>7</b>
2.1 Fiber Optik Haberleşme.....	9
2.2 Dalga kılavuzları ve Çeşitleri .....	11
2.3 Mach-Zehnder İnterferometresinin Performans Kriterlerinin İncelenmesi .....	13
2.3.1 MZI içindeki Y-eklem yapıların açılı değişiminin verimliliğe etkileri.....	16
2.3.2 Dikdörtgen prizması MZI dalga kılavuzlarının kalınlık-genişlik parametrelerinin verimliliğe etkileri.....	19
2.4 Elektro-Optik Modülatör Yapıların Performans Kriterlerinin İncelenmesi .....	22
2.4.1 Elektrik alan uygulanan dalga kılavuzu boyunun verimliliğe etkileri.....	23
2.4.2 Uygulanan elektrik alan şiddetinin verimliliğe etkileri .....	27
<b>3. TERSİNE TASARIM YÖNTEMİ İLE ELEKTRO-OPTİK MODÜLATÖR BİLEŞENLERİNİN PERFORMANS İYİLEŞTİRİLMESİ</b> .....	<b>29</b>
3.1 Tersine Tasarım İle Kompakt ve Düşük Güçlü Optik Eleman Üretimi .....	30
3.1.1 SPINS-b tersine tasarım algoritması.....	32
3.2 SPINS-b ile Fotonik Yapı Tasarımları .....	36
3.2.1 Polarizasyon bağımsız dalgaboyu bölmeli çoğullama.....	37
3.2.2 Güç bölücü.....	46
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>51</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>53</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>57</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

- Şekil 1.1 : Optik tasarımların minyatürleştirilerek entegre fotonik yapılar haline getirilmesi.....2
- Şekil 1.2 : (a) Y-eklem ve Mach-Zehnder interferometresi, taramalı elektron mikroskobu görüntüsü ile birlikte, (b) topografik ve (c) Y-ayırıcının yakın alan optik mikroskobu görüntülerinin taranması. A'daki ek, kanal dalga kılavuzunun tipik bir oluk profilini gösteren bir görüntüdür. Taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (d), topografik görüntüsü (e) ve Mach-Zehnder interferometrenin yakın alan optik mikroskobu ile iletimi gösteren optik (f) görüntülerinin taranması.....3
- Şekil 1.3 : Ayrık konfigürasyonda oluşturulan Mach-Zehnder interferometresi.....4
- Şekil 1.4 : Entegre konfigürasyona sahip Mach-Zehnder modülatörü.....4
- Şekil 2.1 : Pockels etkisi, yani elektrik alan ile doğrusal olarak değişime uğrayan kırıcılık indisi etkisi.....7
- Şekil 2.2 : Katı bir cam tüp, cam - hava arayüzünde toplam iç yansımaya maruz kalan ışık nedeniyle ışığı iki boyutta sınırlayarak optik bir boru hattı görevi görebilir.....11
- Şekil 2.3 : Temel dalga kılavuzu geometrileri türleri: (a) düzlemsel dalga kılavuzu; (b) kanal dalga kılavuzu; (c) fotonik kristal.....12
- Şekil 2.4 : Dikdörtgen kılavuz türleri. Alan çizgileri Ex11 modunun elektrik alanıdır (x dikey yöndedir).....13
- Şekil 2.5 : (a) Bir MZI'nin taranan elektron mikroskobu görüntüsü. (b, c) MZI'nin birleştirme ve ayırma dallarının topografisi ve yakın alan yoğunluğu dağılımı. (d) MZI'da ışığın bölünmesini ve tekrar birleşmesini gösteren yakın alan yoğunluğu dağılımı.....14
- Şekil 2.6 : Mach-Zehnder interferometresi. Yapı “Lumerical FDTD” üzerinde oluşturulmuştur. ....14
- Şekil 2.7 : FDTD simülasyonu için tasarlanan standart MZI yapısı.....16
- Şekil 2.8 : Değiştirilen açının şema görüntüsü.  $\theta_c$  açısı 18-27 derece arasında değiştirilerek farklı boyutlardaki yapılar için iletim sonuçları elde edilmiştir....17
- Şekil 2.9 : (a) Y-eklem giriş dalga kılavuzunda oluşan TM mod görüntüsü. Oluşan mod 1.1 $\mu$ m-1.1 $\mu$ m'luk dalga kılavuzuna düzgün dağılmaktadır. (b) Y-eklem giriş dalga kılavuzunda oluşan TE mod görüntüsü. Oluşan mod 1.1 $\mu$ m-1.1 $\mu$ m'luk dalga kılavuzuna düzgün dağılmaktadır.....18
- Şekil 2.10 : (a) Açık değişiminin Y-eklem yapının iletim verimliliğine etkileri. (b) Düşük performanslı yapıda sonra Y-eklem yapıda oluşan iletim değerlerinin değişimi.....18
- Şekil 2.11 : Sütunlar sırasıyla en düşük ve en yüksek performanslı Y-eklem açılarıyla oluşturulan MZI cihazları. Üst satır elektrik alanı, alt satır manyetik alanı temsil etmektedir. ....19
- Şekil 2.12 : MZI yapısının modellenenmiş haline ait 3 boyutlu bir grafik. Grafik üzerinde parametrik taraması yapılan yükseklik ve genişlik parametreleri

görülmektedir. Yapı grafikteki haliyle yükseklik ve genişlik olarak 1.1um-1.1um uzunluklarına sahiptir. ....	19
Şekil 2.13 : (a) Yükseklik-Genişlik parametreleri (1.1um-0.3um) ile (1.1um-1.1um) iken 18 derece açı ile oluşturulan MZI yapısının sağladığı optik iletim verimliliği grafiği. (b) Yükseklik-Genişlik parametreleri (1.1um-0.3um) ile (1.1um-1.1um) iken 18 derece açı ile oluşturulan MZI yapısının sağladığı ekleme kaybı grafiği.....	20
Şekil 2.14 : Sırasıyla elektrik ve manyetik alan görüntüleri şekildeki gibi verilmiştir. Grafikler üzerinde, kayıpların olduğu ve aynı verimlilikte çıkışa yönlendirme yapılamadığı görülebilmektedir. Burada özellikle dikkat edilmesi gereken nokta, ışık dalgasını yönlendirirken düşük kayıpla kollara getirebilen yapı, simetrik olmasına rağmen çıkışta çok daha fazla kayba uğratmıştır.....	21
Şekil 2.15 : Yükseklik-genişlik taraması ile üst kol ve çıkışta elde edilen iletim ve kayıp grafikleri gösterilmektedir. (a) Üst kola ait iletim değerleri (b) Çıkışa ait iletim değerleri. (c) Üst kola ait ekleme kaybı grafiği. (d) Çıkışta oluşan ekleme kaybı grafiği.....	22
Şekil 2.16 : Lumerical Interconnect üzerinde tanımlanan MZM test ekipmanı. MZM yapısının iç tasarımı Şekil 2.18’de verilmiştir. Kullanılan D.C. kaynağı yalnızca bir kanalı modüle etmekle birlikte, diğer kanal 0V olarak sabitlenmiştir.....	24
Şekil 2.17 : Lumerical Interconnect üzerinde tanımlanan MZM yapısı.....	25
Şekil 2.18 : Gerilim uygulanmasıyla dalga kılavuzu uzunluğunun taratıldığı harita. -1V ile 1V arasında oluşan salınımlar dalga kılavuzu uzunluğu kısaldıkça azalmaktadır. -1V ve 1V aralığı dışında taratılan kısımlar sabit dalga kılavuzu boyunda sabit kalmaktadır. ....	25
Şekil 2.19 : Dalga kılavuzu uzunluğunun iletim değişimine olan etkilerini gösteren grafik. Uygulanan gerilime göre dalga kılavuzunun değişimi iletme daha fazla etkileyebilmektedir. ....	27
Şekil 2.20: Uygulanan gerilim ile MZM iletiminin değişimini gösteren grafikler. 5mm, 10mm, 15mm ve 20mm'lik uzunluklara sahip dalga kılavuzlarına -2V ile 2V arasında gerilim uygulandığında ortaya çıkan iletim grafiklerini göstermektedir. ....	28
Şekil 3.1 : 1000 iterasyon ile optimize edilmiş optik güç bölücü ve birleştirici yapılarına ait (a-c) elektriksel geçirgenlik ve (b-d) FDTD manyetik alan dağılımı sonuçları.....	33
Şekil 3.2 : Vuckovic Grup tarafından hedef öncelikli algoritma ile tasarlanan bir WDM yapısının üretilmiş halinin SEM görüntüsü.....	33
Şekil 3.3 : Vuckovic Grup tarafından SPINS ile tasarlanan bir WDM’in elektriksel geçirgenlik dağılımı ve 1400 ile 1500nm dalgaboylarını ayrıştırdığı elektromanyetik enerji dağılım grafikleri.....	34
Şekil 3.4 : KLayout üzerinde tasarlanan tasarım alanı ve dalga kılavuzları şeması. Ortada bulunan kare alan önplana ait tasarım alanı olarak geçmektedir ve tasarlanmayacak olan alandan bağımsız olarak modellenmektedir. Görüldüğü üzere sarı rengin baskın olduğu alanlar arkaplana ait giriş ve çıkıştaki tasarım yapılmayacak olan dalga kılavuzlarıdır. ....	40
Şekil 3.5 : SPINS’te optimize edilmiş polarizasyon bağımsız dalgaboyu bölmeli çoklama yapısına ait bir grafik.....	41
Şekil 3.6 : Yükseklik-genişliği 3um-0.8um olan giriş dalga kılavuzunda oluşan TE ve TM modlarının görüntüsü. Görüntüler dalga kılavuzu içinde başarıyla oluşmuşlardır. ....	42

Şekil 3.7 : Elektromanyetik enerji yoğunluğuna ait grafikler ve üst-alt kanallara ait dB cinsinden iletim grafikleri. Oluşan grafikler Lumerical FDTD üzerinde yapılan simülasyonlar sonucu elde edilmiştir.....	43
Şekil 3.8 : (a) Elektrik ve manyetik alan yoğunluğu dağılımlarını (tarama alanı) taramak ve çıkış dalga kılavuzlarının (sarı alanlar) sonunda normalleştirilmiş iletimi hesaplamak için hazırlanan deney düzeneğinin şematik görünümü. (b) Yapının fotoğrafik görünümü ve yapısal parametreleriyle birlikte dalga kılavuzları.....	44
Şekil 3.9 : (a) Elektrik alan, (b) manyetik alan yoğunlukları ve (c) 9.68 GHz'de alt portun (WG I) TM ve TE polarizasyonlarının iletimi. (d) Elektrik alan, (e) manyetik alan yoğunlukları ve (c) 11.54 GHz'de üst portun (WG II) TM ve TE polarizasyonlarının iletimi. Beyaz çizgiler, boylamasına normalleştirilmiş enine kesit profillerini göstermektedir.....	45
Şekil 3.10 : KLayout üzerinde tasarlanan ve SPINS'in optimizasyon çıktısıyla birleştirilen güç bölücü grafiği. Giriş ve çıkış dalga kılavuzları sarı ile gösterilmekte olup ortadaki pembe kare alan ise SPINS'in 2um x 2um boyuta sahip olan tasarım alanı çıktısıdır. ....	47
Şekil 3.11 : Silikonun dalga kılavuzu yüksekliğine göre etkili dalgaboyu değişimi grafiği. Bu grafiğe göre, kalınlığı 400nm olarak seçilen optimizasyon sonucunda yapı için $n=3.2$ kırıcılık indisi seçilmiştir.....	48
Şekil 3.12 : Dalgaboyuna göre güç bölümü değişim grafiği. 2um x 2um alana ve 400nm kalınlığa sahip yapıda bir güç bölücü ile 200 iterasyonlu bir optimizasyon sonucunda 1.55um dalgaboyunda, iletim seviyelerinde 0.42-0.46 civarında bölünme görülebilmektedir. ....	48
Şekil 3.13 : SPINS tasarımı 2um x 2um boyutundaki güç bölücü ile elde edilen elektromanyetik enerji yoğunluğu grafikleri. Solda elektrik alan, sağda ise manyetik alan dağılımları görülebilmektedir. Kayıpların düşük ve belirgin bir yönlendirme olması dikkat çekmektedir. ....	49





## KISALTMALAR

<b>FDTD</b>	: Zaman Alanında Sonlu Farklar
<b>MZI</b>	: Mach-Zehnder İnterferometresi
<b>MZM</b>	: Mach-Zehnder Modülatörü
<b>WDM</b>	: Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
<b>DC</b>	: Direkt Akım
<b>AC</b>	: Alternatif Akım
<b>ITO</b>	: İndium Kalay Oksit
<b>SPINS</b>	: Stanford Fotonik Tersine Tasarım Yazılımı





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$E$	Elektrik alan
$D$	Elektrik akı yoğunluğu vektörü
$e$	Dinamik dielektrik sabiti
$n$	Kırıcılık indisi
$\Delta n$	Kırıcılık indisi değişimi
$\epsilon$	Uygulanan elektrik alan
$r$	Elektro-optik etki katsayısı
$\Delta\varphi$	Faz değişimi
$\varphi$	Elektrik alana ait faz
$L$	Dalga kılavuzu uzunluğu
$\theta_c$	Kritik açı
$-x$	x koordinat eksenini
$-y$	y koordinat eksenini
$-z$	z koordinat eksenini
$\lambda$	Dalgaboyu
$\mu$	Geçirgenlik
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\text{cm}$	Santimetre
$J$	Giriş kaynağı
$\omega$	Açısal frekans
$f_{\text{obj}}$	Hedef fonksiyonu
$p$	Parametrizasyon vektörü
$\epsilon$	Geçirgenlik dağılımı
$\epsilon_{\text{cont}}$	Devamlı geçirgenlik dağılımı
$\epsilon_{\text{disc}}$	Ayrık geçirgenlik dağılımı
$S_{\text{fab}}$	Fabrikasyon kümesi
$c$	Hedef modu
$\nabla_x$	Gradyan

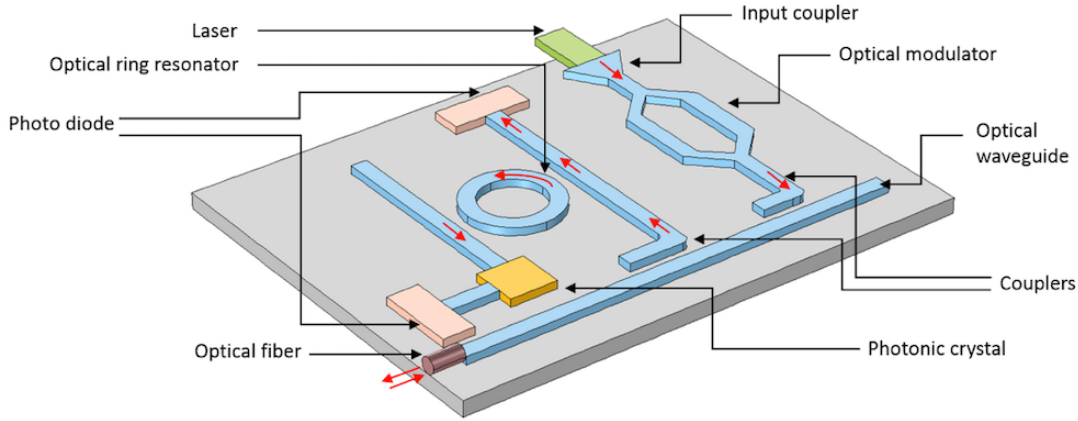


## 1. GİRİŞ

Elektro-optik etkiler, klasik optik kapsamında da açıklanmaya ihtiyacı olan elektrik-optik etkileşiminin fotonik çatısı altında araştırılmaya başlanmasıyla kullanım alanı kazanmıştır. Elektro-optik özelliğe sahip yapıların küçük boyutta ve az kayıplı tasarlanabilmeleri sayesinde düşük maliyetlerle üretilmeleri de mümkün olmuştur. Ancak, geleneksel yaklaşımla tasarlanan yapılar maliyet etkin seviyelere gelmek konusunda yeterli olamamıştır. Son zamanlarda geliştirilen hedefe odaklı tasarım yaklaşımları ile geleneksel optik tasarımlarda elde edilemeyen seviyelerde verimliliklerin elde edilebildiği görülmektedir. Hedef odaklı yaklaşımlarda sadece verim olarak başarı elde edilmemekte, ayrıca hesaplama maliyetleri ve tasarım zamanı olarak da kazanç sağlanmaktadır. Hedef odaklı tasarımlar aynı zamanda tersine tasarım olarak da bilinmekte ve bu tasarım yöntemleri sonuç öncelikli optimizasyon yöntemleri olarak tasarım parametrelerini geleneksel yöntemlere göre daha geniş tarayabilmektedirler. Elektro-optik yapı elemanlarının tersine tasarım algoritmalarıyla tasarlanması, bu yapıların kayıp ve boyut olarak istenilen noktalara gelmesinde faydalı olacaktır. [1]

Entegre fotonik; bölme, bağlantı, izolasyon, polarizasyon kontrolü, anahtarlama, modülasyon, filtreleme ve ışık algılama amaçlı temel bileşenleri kapsamaktadır. Dalga kılavuzları ise entegre fotonik yapıların birbirine bağlanması amacıyla kullanılır. Entegre fotonik aslında optik sistemlerin minyatürleştirilmesidir, örnek bir yapı Şekil 1.1'de görülebilir. Bu yapıların üretimi için özelleşmiş üretim tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Birçok fotonik yapı düzlemsel litografi ile üretilebilir. Dalga kılavuzu geometrilerinde cihazların üretimi için lityum niyobat ( $\text{LiNbO}_3$ ) en umut verici alternatiflerden biri kabul edilmiştir. Bu materyal ile değerli elektro-optik etkilere sahip düşük kayıplı birçok yapı geliştirilebilmiştir. [2-4] Dalga kılavuzları ışığı yönlendirmede ve optik yapıları birleştirmede kullanılan yapılardır. Bu yönlendirme sırasında tam iç yansıma denilen özellik kullanılır. Dalga kılavuzları tasarlanır ya da seçilirken tam iç yansıma ile oluşan kayıpların aza indirgenmesi hedeflenmektedir. Bu hedefle birkaç ana dalga kılavuzu türü oluşturulmuş ve temel fotonik yapılarda yaygın

bir şekilde kullanılmıştır. Bir entegre optik devrenin temel ögesi şerit veya kanal dalga kılavuzudur. Kanal dalga kılavuzlar, mikrolitografik maskeleme teknikleri ile tanımlanan dar bir kanalda bir katkı maddesi ile bir substratın yüzeyinin altındaki kırılma indisinin artırılmasıyla üretilir. Özellikle, bir interferometrede gerekli olan tek modlu yayılma, birkaç mikrometre dalga kılavuzu genişliği ve derinliği ve birkaç binde birlik bir kırıcılık indisi varyasyonu ile elde edilir. [2,3]

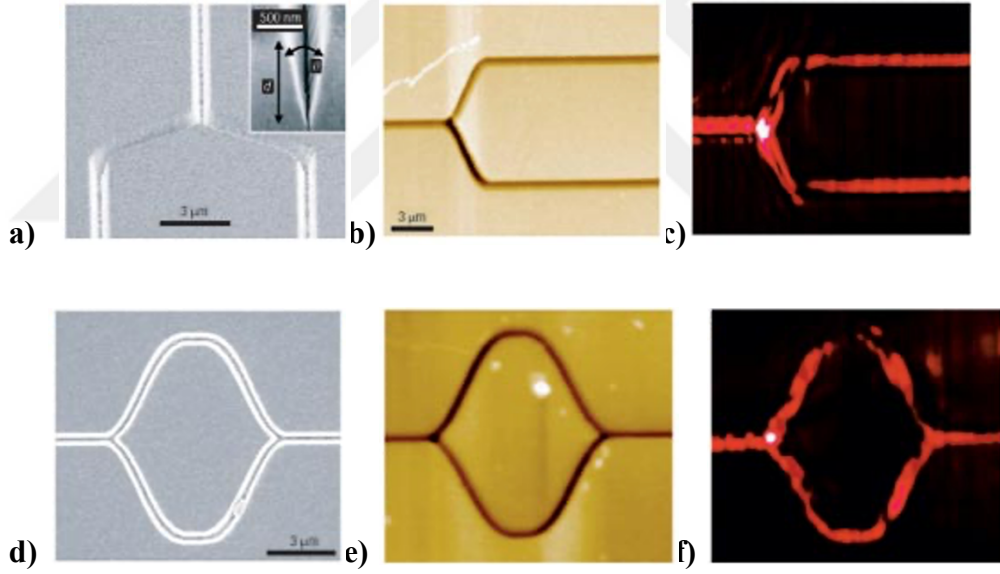


Şekil 1.1 : Optik tasarımların minyatürleştirilerek entegre fotonik yapılar haline getirilmesi. [13]

Y-eklem elemanlar ise yapısal olarak çok basit olmasına rağmen çok kullanışlı cihazlardır. Fiber optik iletişim sistemlerinin dalga boyu bölmeli çoğullaması (WDM) gibi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadırlar. Bu yapıların üretiminde karşılaşılan zorluklardan biri giriş/çıkış açısı üzerindeki kısıtlamadır. Bu kısıtlamalar, çıkış portları harici bir devreye bağlanmak için Y-eklem kolları yeterince ayrılacaksa bölücünün uzun olacağı anlamına gelir. [7]

Y-eklem tipinde bir bölücü ve birleştiricinin ışığı ayırıp tekrar birleştirecek şekilde dalga kılavuzları aracılığıyla birbirlerine tamamlanmasıyla bir Mach-Zehnder interferometresi elde edilebilir (Şekil 1.3). Mach-Zehnder interferometresinin üzerine uygulanacak bir elektrik alanın şiddetinin değiştirilmesi yoluyla kollardaki faz kaymasına sebep olarak giriş ışığının çıkışta modülasyona uğramasına yol açan yapıya da Mach-Zehnder modülatörü denilmektedir. Mach-Zehnder modülatörlerinin verimlilik ve boyut açısından sahip oldukları performans kriterleri bulunmaktadır. [8] Geniş bir kullanım alanına sahip interferometreler, kritik öneme sahip birçok hassas uzaklık ölçümü uygulamalarında kullanılmıştır. Fiber optik dönüölçerlerde kısa fiber

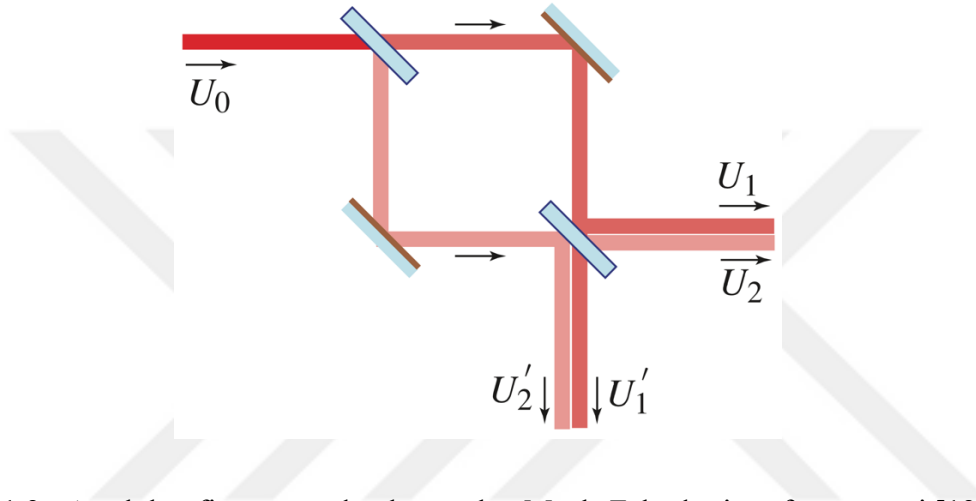
kuplör uzunluklarına rağmen hassas hareket ölçümü sağlayan MIOC (çok işlevli entegre optik devre) gibi yapılar bulunmaktadır. Bunlar, Y-eklem şekline sahip Mach-Zehnder modülatörü mantığıyla çalışan yapılardır. Bu cihazlar endüstri ve akademide geniş kullanım alanına sahip olmalarıyla beraber, askeri amaçlarla da yoğun bir şekilde araştırılmakta ve kullanılmaktadır. Askeri amaçlarla kullanılan bu hassas elektro-optik entegreler, verimlilik açısından başarılı seviyelerde olmalıdır. [3] Bunun sağlanması için gerekli performans kriterleri genel bir bakış açısıyla tez kapsamında incelenecek ve çözüm önerisi sunulacaktır. Elektro-optik modülatörler Şekil 1.3'teki gibi ayrık modelleme olarak değil Şekil 1.4'te görüldüğü üzere entegre olarak incelenecektir. Bu incelemede temel bir elektro-optik modülatör olan Mach-Zehnder modülatörünün performans kriterlerinden olan dalga kılavuzu uzunluğu, interferometre kollarına uygulanan gerilim, interferometre yapısının boyutu ve interferometreyi oluşturan Y-eklemlerin açısı değerleri araştırılacaktır.



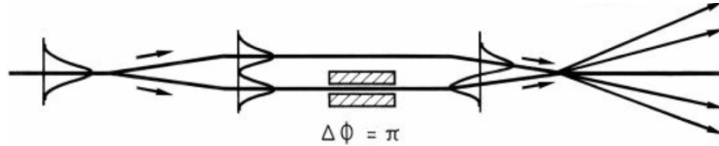
Şekil 1.2 : (a) Y-eklem ve Mach-Zehnder interferometresi, taramalı elektron mikroskobu görüntüsü ile birlikte, (b) topografik ve (c) Y-ayırıcının yakın alan optik mikroskobu görüntülerinin taranması. A'daki ek, kanal dalga kılavuzunun tipik bir oluk profilini gösteren bir görüntüdür. Taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (d), topografik görüntüsü (e) ve Mach-Zehnder interferometrenin yakın alan optik mikroskobu ile iletimi gösteren optik (f) görüntülerinin taranması. [9]

Elektro-optik özelliğe sahip fotonik elemanlardan  $\text{LiNbO}_3$  ile oluşturulan interferometreler ve interferometreleri oluşturan pasif optik elemanlar en temel fotonik yapılardır. Mach-Zehnder interferometresi ile bu yapıyı oluşturan dalga kılavuzları, Y-eklem birleştirici ve bölücü yapıları bu kapsamda üzerlerine yoğun araştırmalar

yapılmakta olan yapılardır. Tüm bu yapıların tasarlanmasında geleneksel tasarım yöntemlerine oranla daha verimli yapıların tasarlanabilmesi için tersine tasarım algoritmaları kullanılmaktadır. Tersine tasarım algoritmaları birden farklı şekilde oluşturulmaktadır. Bunlar içinde en hızlı ve etkili çözüme ulaşan algoritma gradyan temelli tersine tasarım algoritmasıdır. Bu kapsamda, açık kaynak kodlu bir tersine tasarım algoritması yazılımı olan SPINS-b (bundan sonra sadece SPINS olarak bahsedilecektir) ile bazı fotonik yapılar tasarlanmış ve deney ile optimizasyondan elde edilen verimlilik seviyeleri doğrulanmıştır. [5,6]



Şekil 1.3 : Ayrık konfigürasyonda oluşturulan Mach-Zehnder interferometresi [13]



Şekil 1.4 : Entegre konfigürasyona sahip Mach-Zehnder modülatörü [3]

İnterferometreleri çeşitli amaçlarla kullanabilmek için interferometreleri oluşturan temel yapılar verimsel ve boyutsal optimizasyonları yapılarak performans açısından incelenebilir. Optimizasyonda kullanılacak parametreler, düşük kayıp için olduğu kadar çıkış portlarında dengeli bir güç dağılımı için de tasarlanmalıdır. [7] Ancak, birçok optik cihaz hala tasarımcının analitik teoriye dayalı seçtiği temel bir cihaz üzerinden parametreler taranarak tasarlanmaktadır. Bu noktada geleneksel tasarım yöntemleri yetersiz kalmaktadır ve bilgisayar optimizasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tasarım esnekliğindeki bu boşluğu doldurmak için hiçbir insan girdisi olmadan rastgele doğrusal nanofotonik cihazlar tasarlayabilen tersine tasarım algoritmaları geliştirilmiştir. [10] Elektro-optik tasarımlarda kullanılan Y-eklem



dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) yapıları ve güç bölücü cihazları tersine tasarım algoritmalarıyla verimlilik ve boyut optimizasyonu ile geleneksel yöntemlere göre daha başarılı şekilde tasarlanabilmektedir. Elektro-optik tasarımlarda kullanılan bir özellik olan polarizasyon bağımsızlığı yine Y-eklem dalgaboyu bölmeli çoğullama yapıları hedeflenerek tersine tasarım algoritmalarıyla tasarlanabilmektedir.

Günümüzde hesaplama gücü ve optimizasyon yöntemlerindeki gelişmeler makine öğrenmesi ve otomatik tasarım yöntemlerine kadar ilerlemiştir ve bu da tasarımların hızlanmasına ve farklılaşmasına yol açmıştır. Ancak, hala birçok optik cihaz elle hesaplanmakta ve tasarımcının analitik teoriye dayalı seçtiği temel bir cihaz üzerinden parametreler taranarak optimizasyonlar yapılmaktadır. Burada oluşan tasarım çeşitliliğindeki boşluğu doldurmak için hiçbir insan girdisi olmadan rastgele doğrusal nanofotonik cihazlar tasarlayabilen tersine tasarım algoritmaları geliştirilmiştir. Kullanıcının yalnızca tasarım bölgesini ve performans özelliklerini belirlediği tersine tasarım algoritmasında, üretilecek cihazların tüm parametre alanı taranarak geleneksel yöntemlere göre daha yüksek performansa ve daha küçük boyuta sahip cihazlar tasarlanabilmektedir. [10]

Tez kapsamında bölüm (2)'de elektro-optik yapılar hakkında detaylı bilgi verilecek ve elektro-optik yapıların performans kriterleri Lumerical FDTD ve Interconnect üzerinde incelenecektir. Bölüm (3)'te ise oluşturulan bu yapıların, aslında sadece geleneksel tarama yöntemleriyle yeterince kompakt ve düşük kayıplı oluşturulmadığı anlatılacak ve tersine tasarım algoritmaları ile bazı fotonik elementlerin tasarımından bahsedilecektir.

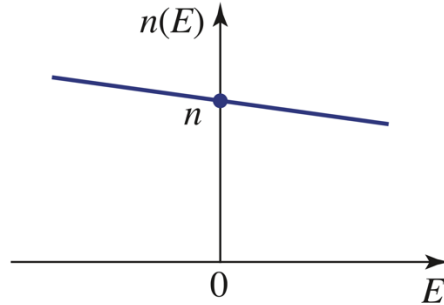


## 2. ELEKTRO-OPTİK MODÜLATÖRLER VE YAPI BİLEŞENLERİ

Optik bilimindeki gelişmelerle beraber elektro-optik, opto-elektronik, kuantum elektroniği, dalga kılavuzu teknolojisi gibi yeni teknolojiler ortaya çıkmıştır. Klasik optiğin açıklamakta yetersiz kaldığı elektrik ve optik etkileşimleri, özellikle lazerler, yarı-iletken dedektörler, ışık modülatörleri gibi birçok cihazın açıklanabilmesi için fotonik adı verilen yeni bir alan doğmuştur. Işığın dalgalardan çok fotonlar yoluyla işlendiği fotonik; fotonların elektronlarla, elektronların da fotonlarla etkileşimini konu almaktadır. [1,2] Elektrik alan değişimlerinin maddeler üzerinde yarattığı fotonik etkiler elektro-optik konularının temelini oluşturmaktadır. Elektro-optik tekniği, optik iletişim, mikrodalga fotonuğu, hesaplama, frekans metrolojisinden kuantum fotonuğıne kadar birçok önemli uygulamanın temelini oluşturur. Elektro-optik cihazların gelişmesiyle yüksek bant genişliğı, düşük kayıp ve elektromanyetik parazitlere karşı bağışıklık sağlayan ürünler de geliştirilebilmekte olup bu avantajları sebebiyle stratejik seviye dönüölçer, elektronik harp, radar, radyo astronomisi ve faz dizili antenler gibi birçok uygulamada mikrodalga fotonik cihazlarının çeşitlenmesi sağlanmıştır. [3,11,12] Elektro-optik malzemeler, elektrikle kontrol edilen faz modülatörleri veya dalga geciktiriciler olarak kullanılabilir. [13] Elektro-optik cihazların kullanımında temel özellik, ihtiyaca göre ayarlanabilen elektro-optik etkilerdir.

Elektro-optik etki, temelde bir malzemenin kırılma indisinin statik (DC) bir elektrik alan uygulanarak değiştirildiğı bir olgudur. Bu, dalgalardan birinin sıfır frekansa sahip olduğı özel bir çoklu dalga etkileşimi durumu olarak düşünülebilir. Elektro-optik etkiler için taşıyıcı plazma dispersiyonu, elektro-absorpsiyon ve Pockels etkisi gibi çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu kapsamda, malzemeye bağılı olarak, kırılma indisi alanla doğrusal olarak (Pockels etkisi) (Şekil 2.1) veya alanla (elektrooptik Kerr etkisi) kuadratik olarak değişebilir. [14] Pockels etkisi bir çok hızlı çalışabilen bir elektro-optik etkidir ve elektrik alanın uygulanmasından dolayı diğere yöntemlere göre fazladan kayıplara sebep olmadan geniş bir spektrum üzerinde malzemenin kırılma indisinin değiştirilebildiğı fotonik olayı ifade etmektedir. Lityum Niyobat ve Galyum Arsenit, bu tür elektro-optik özellikler sergileyen iki önemli yarı iletken malzemedir. Bu malzemeler, entegre optik cihazların tasarımında çok güvenilirdir. [15] Mach-

Zehnder interferometresi yapıları, optik ağlarda sinyalleri birleştirmek ve bölmek için kullanılırlar ve bu yapıların dalga kılavuzları da, titanyumun lityum niyobat substratında difüzyonu ile oluşturulur. [16]



Şekil 2.1 : Pockels etkisi, yani elektrik alan ile doğrusal olarak değişime uğrayan kırıcılık indisi etkisi [13]

Pockels katsayıları, Pockels etkisini nicel olarak tanımlamak için kullanılır. [4] Bir E (elektrik alan) alanı uygulandığında, ortaya çıkan polarizasyon, yalnızca düşük E değerleri için E ile doğrusal orantılıdır. E'nin yüksek değerleri için, ilişki doğrusal değildir. Benzer şekilde, büyük E için, E ve D (elektriksel akı yoğunluğu vektörü) arasındaki ilişki doğrusal değildir. Dinamik dielektrik sabiti:

$$\epsilon = dD/dE \quad (2.1)$$

olarak geçen değer sabit değildir ve aslında E'nin değerine bağlıdır. Kırılma indisi n, uygulanan bir elektrik alanı  $\epsilon$  eklenerek değiştirilebilir. Bu ek alan  $\epsilon$  bir DC veya AC alanı olabilir. Kırılma indisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$n = n_0 + r(E + \epsilon) + q(E + \epsilon)^2 + \dots \quad (2.2)$$

Bu denklemden, E'nin çok küçük olduğu durum göz önünde bulundurulur.  $\epsilon$ , böylelikle n'ye şu şekilde yaklaşılabilir:

$$n = n_0 + r\epsilon + q\epsilon^2 \quad (2.3)$$

$r\epsilon$  terimi Pockels etkisini temsil eder ve  $q\epsilon^2$  terimi Kerr etkisini temsil eder. Pockels ve Kerr etkileri deneysel olarak ayrılabilir çünkü Pockels etkisi uygulanan alanın polaritesine bağlıyken Kerr etkisi yoktur. Kırılma indisinin elektrik alanla değişimi aşağıdaki ilişki ile verilmiştir: [15,17]

$$\Delta n = \frac{n^3}{2} rE \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4'te  $r$ , substrat malzemesinin elektro-optik katsayısıdır ve  $E$ , uygulanan elektrik alanıdır. Elektrotlar elektro-optik cihazın kollarını oluşturan dalga kılavuzlarının üzerinde veya yanında konumlandırılır. Bu fenomenin kaynaklandığı faz değişimi şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) (\Delta n)L \quad (2.5)$$

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{n^3}{2}\right) rEL \quad (2.6)$$

Elektro-optik cihazın çalışma şekli; dalga boyu  $\lambda$ , faz farkı  $\Delta n$ , dalga kılavuzunun uzunluğu  $L$  ve elektrotlara uygulanan elektrik alan şiddeti  $E$  parametresi seçilerek ihtiyaca göre ayarlanabilir. Eşitlik 2.4 ve 2.5'ten, dalga kılavuzunun çıkışındaki sinyalin faz değişimi, substratın elektro-optik katsayısı ve Eşitlik 2.6'dan dalga kılavuzunun uzunluğu boyunca uygulanan elektrik alan şiddeti çıkarımı yapılabilir. [15]

## 2.1 Fiber Optik Haberleşme

İletişim sistemlerinin temel amacı, verileri uzaktaki bir sisteme aktarmaktır. İletişim sistemleri vasıtasıyla uzaklık fark etmeksizin bilgileri bir noktadan diğerine aktarmak için optik tabanlı anahtarlar, konektörler, amplifikatörler ve filtreler'in kullanımı gerektirir. Geçmişte bu işlem, iletişim için bir kanal olarak bakır teller kullanılarak başarıyordu. Bu tür bakır tabanlı cihazlar mikrodalga iletişim bağlantıları için iyi geliştirilmiş olsa da hala yüksek maliyetlidir ve entegre bir şekilde üretilmeleri zordur. [1,2] Ancak günümüzde, fiber hatlar artık bakır telden çok daha sık kurulmaktadır. Bu, fiber optik iletişimin bakır muadiline göre birçok önemli avantajının bir sonucudur. Bazı temel avantajlar arasında daha düşük iletim kaybı ve daha fazla bilgi kapasitesi bulunur. [4]

İki tür optik iletişim uygulaması vardır. İlk tip optik iletişim sistemi veri iletişimidir (Datacom). Datacom, bilgisayarlar, bellek bankaları, veri tabanları ve iş istasyonları gibi bilgi cihazlarını binlerce bağlantı ve yüzlerce kilometreye yayılabilen yerel bir alan ağında birbirine bağlamak için kullanılır. Datacom uygulamaları telekomdan

farklıdır, çünkü maliyet baskısı artık taşıyıcı ortamda (optik fiber) değil, vericiler, konektörler, anahtarlar, filtreler ve alıcılar gibi ilgili donanım üzerindedir. Datacom uygulamaları için uygun maliyetli cihazlara duyulan ihtiyaç, günümüzün optoelektronik araştırmalarının çoğunu yönlendirmektedir. İkinci optik iletişim uygulaması olan uzak mesafede telekomünikasyon (Telecom) ise iki şehir arası bağlantıların az kayıplı bir şekilde yapılmasını şart koşmaktadır. Bunun için standart haline gelen optik fiberler yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Kayıp ve boyut optimizasyonu ile maliyet noktasında optik fiberler sayesinde günümüzde birçok telekomünikasyon sorunu çözüme ulaştırılabilmektedir. [1,2,4]

Telefon, televizyon ve bilgisayar sinyallerini iletmek için fiber ve bakır teller kullanılır. Bu tip haberleşme uzak mesafede telekomünikasyon olarak geçmektedir. Haberleşmede kullanılan sinyal seviyesi hem fiber hem de bakır tel iletişimde mesafeyle birlikte azalır. Sinyal seviyesi, dedektörün gürültü seviyesinden daha düşük bir değere zayıflatılmadan önce, veri hattı sonlandırılır. Sinyal daha sonra algılanır ve güçlendirilir veya bir sonraki tekrarlayıcı istasyona yeniden iletilmek üzere sadece yükseltilir. Böylece düşük iletim kaybı ile haberleşme sağlanmış olur. Bakır koaksiyel kablolar için 1 km'lik bir mesafede verilerin aktarılabilmesi hız (bit hızı), yalnızca birkaç yüz megabit/saniye (Mb/s) değerine kadar çıkabilmektedir. Karşılaştırıldığında, optik fiberler aracılığıyla gönderilen ışık darbelerinin bit hızları onlarca gigabit/saniyeye (Gb/s) kadar çıkar. Bu, bakır iletimine göre yaklaşık yüz kat daha fazla bir hızdır. Bu yönüyle de, fiber optik iletişimin bakır üzerinden iletişime göre daha fazla bilgi taşıma kapasitesine sahip olduğu söylenebilir. [2,4]

Fiber optik iletişim sistemlerinin çalışması basitçe üç ana işleve dayanmaktadır:

1. Elektrik sinyallerinin verici tarafından modüle edilmiş ışığa dönüştürülmesi.
2. Modüle edilmiş ışık sinyalinin fiber optik ağlar üzerinden iletimi.
3. Orijinal elektrik sinyalini geri kazanmak için alıcı tarafından iletilen ışığın algılanması. [4]

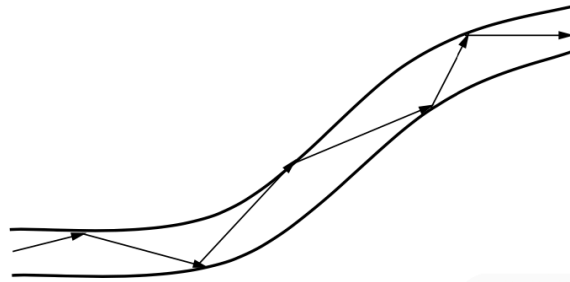
Bir fiber optik iletişim sistemi tasarlanırken, iki ana husus akılda tutulmalıdır. İlk düşünce güçtür. İstenen sinyal-gürültü oranını veya BER (bit error rate) seviyelerini korumak için yeterli ışık gücü olmalıdır. İkinci husus, sinyalin değişimine yanıt

verecek kadar hızlı olması gereken sistemin yanıt süresidir. Yeterli yanıt süresinin elde edilmesi, bilgilerin gerekli doğrulukta taşınmasını sağlar. [1,2,4,7]

## 2.2 Dalga kılavuzları ve Çeşitleri

Entegre fotonik cihazlar, Dalga kılavuzu yapılarında bulunan temel geometriler şu şekilde verilebilir: düzlemsel dalga kılavuzları, kanal dalga kılavuzları, optik fiberler ve fotonik kristaller. Maxwell denklemlerini kullanarak düzlemsel dalga kılavuzları için dalga denklemi elde edilebilmektedir ve TE-TM polarizasyon modları düzlemsel dalga kılavuzları için çözülebilmektedir. [2]

Entegre fotonik teknolojiye temel unsur optik dalga kılavuzudur ve entegre fotonik cihazlar optik dalga kılavuzları kullanılarak hapsedilen ışığın işlenmesiyle çalışır. Bir dalga kılavuzu, ışığın kendi sınırları içinde tam iç yansıma ile hapsedilmesine izin veren bir optik yapı olarak tanımlanabilir. Tam iç yansımanın gerçekleşmesi için, ışık enerjisinin çoğunun yoğunlaştığı yüksek indeksli bir ortamın düşük kırılma indisli bir ortamla çevrelenmesi gereklidir. Işık hapsine çok basit bir örnek olarak havada bulunan bir (düz) cam filmi verilebilir. Bu örnekte cam film havaya göre daha yüksek bir kırılma indisine sahiptir (Şekil 2.2). Camın kırılma indisi  $n$  ise, filmin içindeki kritik açıdan ( $\theta_c = \sin^{-1}(1/n)$ ) daha büyük bir iç açı ile yayılan ışınlar arayüzlerde tam yansımaya maruz kalacak ve film içinde hapsolacaktır. Bu koşullarda havada bulunan filmin bir optik dalga kılavuzu görevi gördüğünü söylenebilir. [2]



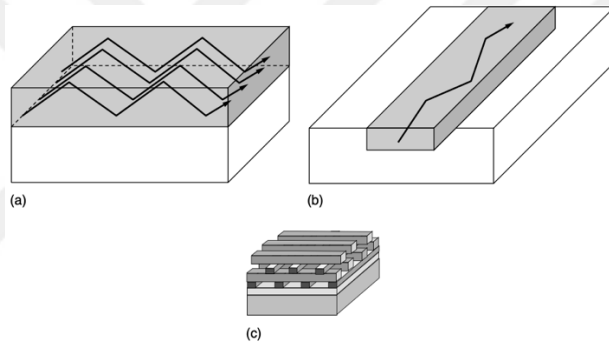
Şekil 2.2 : Katı bir cam tüp, cam - hava arayüzünde toplam iç yansımaya maruz kalan ışık nedeniyle ışığı iki boyutta sınırlayarak optik bir boru hattı görevi görebilir. [2]

Kolayca görselleştirilebilen başka bir optik dalga kılavuzu türü, katı silindirik bir cam tüptür. Camın kırılma indisi dış ortamdan (bu durumda hava) daha büyük olduğundan,

ışık kritik açıdan daha büyük açılarda hareket eder. Işık içeride tam iç yansıma ile hapsedilecektir. Bu durumda ışığın hapsedilmesi iki boyuta yayılır. [2,4]

Önceki iki örneğin gösterdiği gibi, ışığın hapsedildiği boyutların sayısına bakılarak dalga kılavuzu sınıflandırması yapılabilir. Işığın hapsedildiği boyutların sayısına bağlı olarak üç temel dalga kılavuzu tipi vardır. Düzlemsel bir dalga kılavuzu (veya 1D dalga kılavuzu) ışığı bir boyutta sınırlarken, kanal dalga kılavuzları (veya 2D dalga kılavuzları) ışığı iki boyutta sınırlar. [2,4]

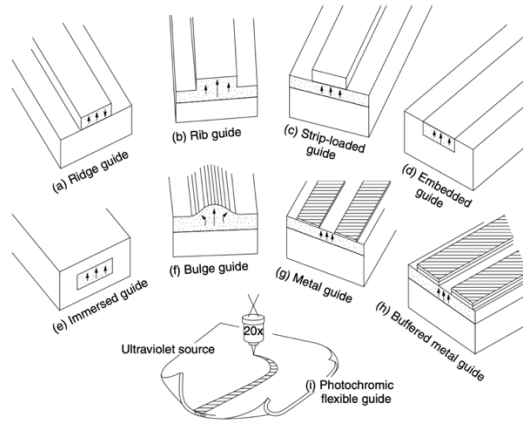
Işığın üç boyuta hapseden yapılar da vardır. Bunlar, optik dalga kılavuzlarının çok özel bir durumunu oluşturur. Işık her yöne hapsediğundan, yayılamaz. Bu nedenle, bu yapılar aslında ışık tuzakları oluşturur ve bunlar genellikle fotonik kristaller olarak adlandırılır (Şekil 2.3). [2]



Şekil 2.3 : Temel dalga kılavuzu geometrileri türleri: (a) düzlemsel dalga kılavuzu; (b) kanal dalga kılavuzu; (c) fotonik kristal [7]

Tez kapsamında dikdörtgen optik dalga kılavuzları kullanılarak fotonik yapılar oluşturulmuştur. Dikdörtgen optik kılavuzlar, kanal dalga kılavuzları olarak tasarlanmış olup literatürde çeşitli şekillerde bulunmaktadır. Bitişik cihazlarla bağlantı, üretim zorlukları, kılavuz içinde oluşan kayıplar, kullanılan alt tabaka malzemesi türleri ve üretim sırasında kullanılabilecek en yüksek sıcaklık gibi parametreler dikdörtgen optik kılavuzların seçiminde önemli yere sahiptir. Literatürde, kullanım alanı geniş olan dikdörtgen kılavuz türleri şu şekildedir: sırt kılavuzu, nervür kılavuzu, şerit yüklü kılavuz, gömülü kılavuz, daldırılmış kılavuz, tümsek kılavuzu, metal kılavuz, tamponlu metal kılavuz ve fotokromik esnek kılavuz (Şekil 2.4). [7]



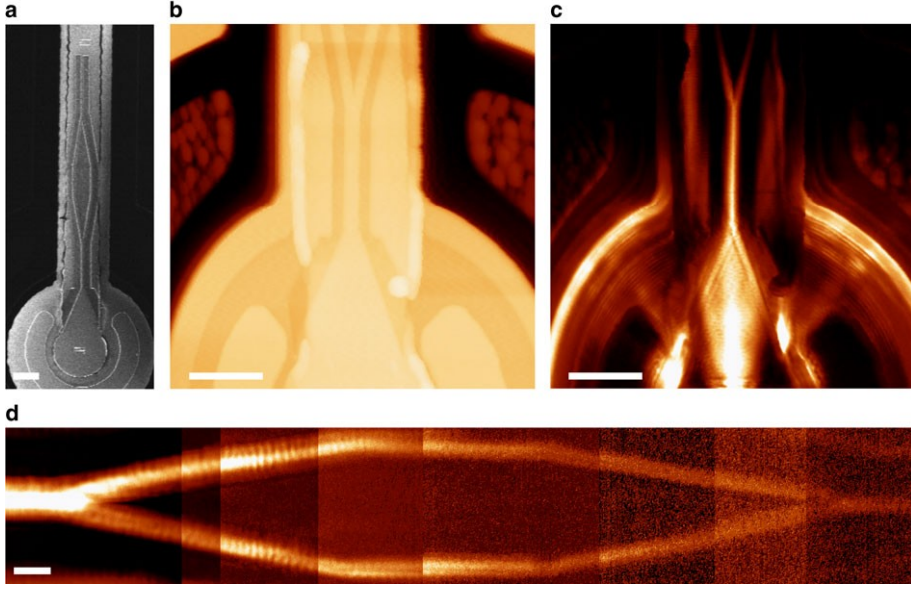


Şekil 2.4 : Dikdörtgen kılavuz türleri. Alan çizgileri  $E_x^{11}$  modunun elektrik alanıdır (x dikey yöndedir). [7]

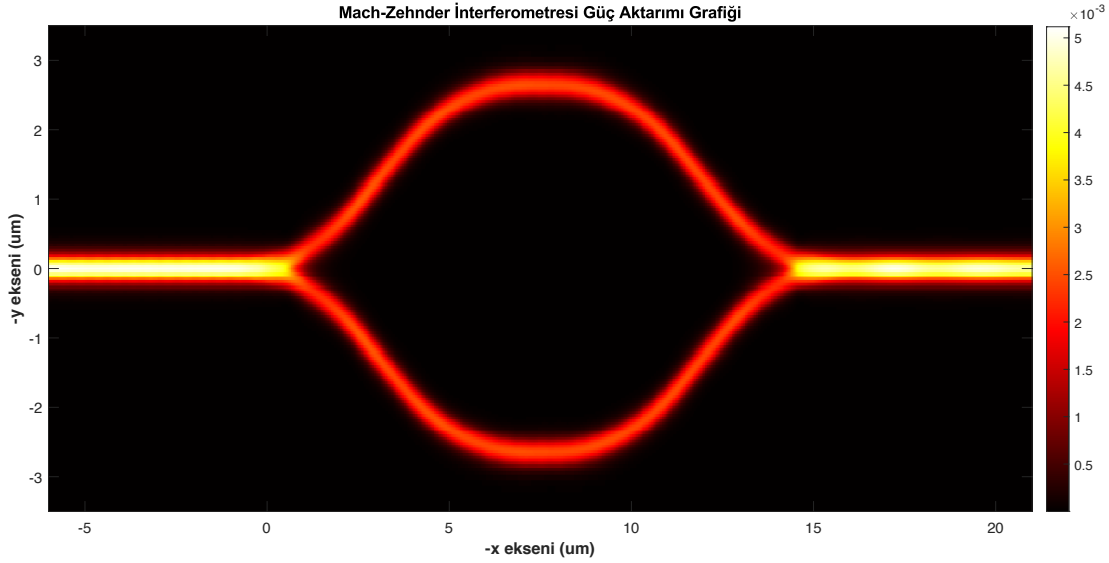
### 2.3 Mach-Zehnder İnterferometresinin Performans Kriterlerinin İncelenmesi

İnterferometri, çeşitli parametreleri ölçmek için çok hassas bir yöntemdir, çünkü maksimum ve minimum güç arasındaki tüm dinamik ölçüm aralığı faz farkı  $\pi$  kadar bir değişim için taranmıştır. Bu faz farkı değişimi, optik yol farkının  $\lambda/2$ 'sindeki bir değişimle meydana gelmektedir. (bu değişim  $1\mu\text{m}$ 'den küçüktür). [3] Mach Zehnder interferometresi (MZI), lazer ışığının iki farklı yola ayrıldığı ve fazlar arasında nispi değişimle ayrıldığı optik bir yapıdır, temel bir MZI yapısı için Şekil 2.5 incelenebilir. MZI kullanılarak bir lazer ışığının dalgaboyunu ölçülebilir ve saydam bir materyal ile havanın kırılma indisi elde edilebilir. Mach-Zehnder interferometreleri spektrofotometre, sensörler, optik tomografi, optik modülatörler, kuantum hesaplama, kuantum elektronığı gibi temel araştırmalarda çok sayıda optik ve fotonik cihazda bulunur. [18] Tez, MZI yapılarının özelliklerini inceleyerek temel yapıtaşlarının tasarımını ve modellenmesini simülasyon sonuçlarıyla birlikte tartışmaktadır.

Mach-Zehnder interferometresi, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi birer giriş ve çıkış portuna sahip iki portlu bir cihazdır. Girişte 3 dB Y-eklem yapı ile MZI kolları eşit güç alır. Elektro-optik etkiye bağlı olarak elektrotlara gerilim farkı uygulandığında, dalga kılavuzunun kırılma indisi değişir. Sonuç olarak dalga kılavuzundan geçen ışık (kontrol geriliminin etkisi altında) faz değişimine uğrar. MZI dalga kılavuzlarının iki kolundaki optik sinyaller arasındaki yapıcı veya yıkıcı girişime bağlı olarak, çıkış portunun üst kolunda bir "1" veya "0" sinyali algılanır. Elektrotlara hızlı değişen gerilim uygulandığında, MZI bir anahtarlama cihazı olarak kullanılabilir. [15]



Şekil 2.5 : (a) Bir MZI'nin taranan elektron mikroskobu görüntüsü. (b, c) MZI'nin birleştirme ve ayırma dallarının topografisi ve yakın alan yoğunluğu dağılımı. (d) MZI'da ışığın bölünmesini ve tekrar birleşmesini gösteren yakın alan yoğunluğu dağılımı [19]



Şekil 2.6 : Mach-Zehnder interferometresi. Yapı “Lumerical FDTD” üzerinde oluşturulmuştur.

Bu etki ile çalışan MZI'ler aynı zamanda Mach-Zehnder modülatör (MZM) olarak da isimlendirilmektedirler. Literatürde en çok tercih edilen materyal  $\text{LiNbO}_3$  olmasına rağmen ITO vb. gibi elektro-optik modülasyonun optimize edildiği materyallerle de MZM'ler oluşturulmuştur. [20]

Optik dalgaların frekansı o kadar yüksektir ki, modüle edilmiş elektromanyetik alanı, özellikle fazını doğrudan ölçmek mümkün değildir. Bununla birlikte, dolaylı bir güç veya optik yoğunluk ölçümü, parazit fenomeni yoluyla mümkündür. Bir interferometrede, giriş ışık dalgası bölünür, ardından iki farklı yol boyunca yayılır ve çıkışta yeniden birleştirilir. Girişim dalgasının toplam alanı, her iki yol boyunca yayılan iki alanın vektörel toplamıdır:

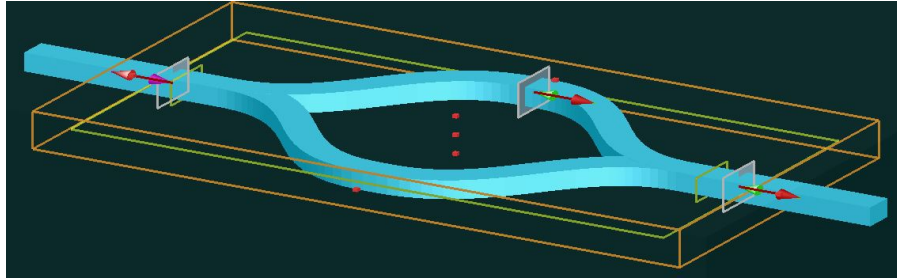
$$E = E_1 + E_2 \quad (2.7)$$

$$E_1 = E_{10}e^{i(\omega t + \phi_1)} \quad (2.8)$$

$$E_2 = E_{20}e^{i(\omega t + \phi_2)} \quad (2.9)$$

Burada  $\phi_1$  ve  $\phi_2$ ,  $E_1$  ve  $E_2$  alanlarının ilgili fazları ve  $\omega$  açısal frekanstır. [3]

Bu yapıların elektro-optik özelliklerini test edebilmek için öncelikle yapının kendisi geleneksel optik deneme yanılma yöntemleri ile bir parametrik uzay taratılarak incelenebilir. Bunun için yapının modellenmesi ve simülasyon içinde çalıştırılması gerekir. Tez kapsamında modellenen yapıların performans çıktılarını incelemek amacıyla “Zaman Alanında Sonlu Farklar” yöntemiyle bazı simülasyonlar yapılmıştır. “Zaman Alanında Sonlu Farklar” yöntemi (FDTD) diferansiyel denklemler üzerinde kurulu bir elektromanyetik çözüm yöntemidir. Bu yöntem elektromanyetik alanında yakın alan hesaplamalarında yıllardır kullanılmaktadır. [21] Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda fotonik yapıların performansını ölçebilmek için Lumerical FDTD kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan dalga kılavuzları, Y-eklem yapılar ve MZI öncelikli olarak geleneksel yöntemlerle (FDTD), sadece belirli bir parametre uzayının taranmasıyla ortaya çıkan performans sonuçları incelemiştir. Çalışmada tasarlanan standart yapı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

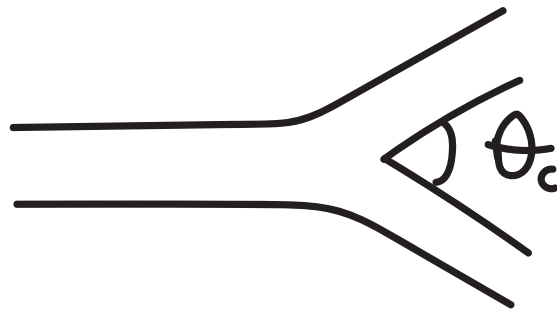


Şekil 2.7 : FDTD simülasyonu için tasarlanan standart MZI yapısı.

Çalışmanın bu kısmında, hazırlanan basit Y-eklem yapısının iletim verimliliği Y-eklem dalları arasındaki açı ve Y-eklem yapısının sahip olduğu dikdörtgen prizmanın kalınlık ve genişliği parametre olarak kullanılarak ölçülmüş ve yorumlanmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar bizlere fotonik yapılarda geniş alanda kullanılan Y-eklem yapıların yalnızca sonlu parametre uzayında geleneksel yöntemlerle optimizasyonunda ne kadar verimlilik elde edilebileceği hakkında bir fikir sunmaktadır. MZI içinde kullanılan Y-eklem yapıların iletim verimliliğinin incelenmesinin ardından MZI yapılarının başarımları kriterleri yine sınırlı parametrik uzay içinde denenecek ve iletim verimlilikleri incelenecektir.

### 2.3.1 MZI içindeki Y-eklem yapıların açı değişiminin verimliliğe etkileri

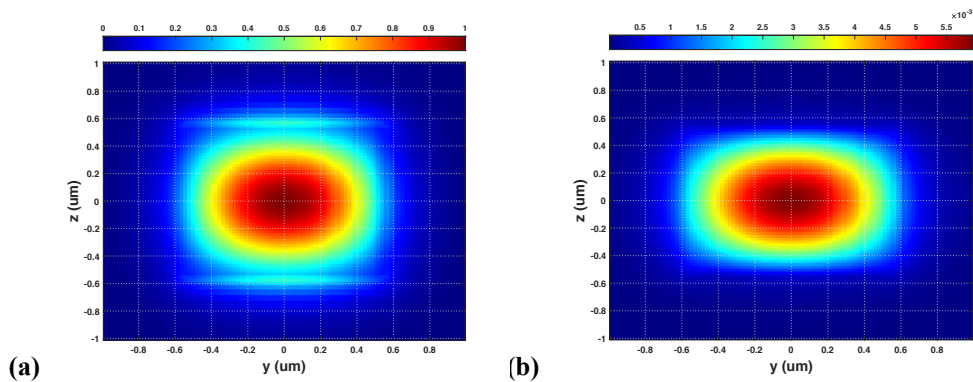
MZI oluşturulurken Y-eklem kolları arasındaki açı değişiminin iletim verimliliğine etkileri birçok akademik çalışmada gösterilmiştir. Burada bu açı değişiminin iletim verimliliğine etkileri görülmektedir. Şekil 2.8'de görülen yapıda  $\theta_c$  ile gösterilen bölge MZI içindeki Y-eklem açısını göstermektedir. Oluşturulan Y-eklem yapı, basit dikdörtgen dalga kılavuzuyla oluşturulmuş olup burada Y-eklem yapıların optik iletim verimliliği incelenmiştir. Taramalar yapılırken önemli bir parametre olan kalınlık-genişlik karşılaştırma amacıyla hem 1.1 $\mu$ m-0.3 $\mu$ m hem de 1.1 $\mu$ m-1.1 $\mu$ m şeklinde tutulmuş ve tezin bir sonraki kısmında bu sayıların yüksek ve düşük seviyelerde iletimi sağlayan dalga kılavuzu ölçü parametreleri olduğu ilgili değerler simülasyon yoluyla taratılarak gösterilmiştir.



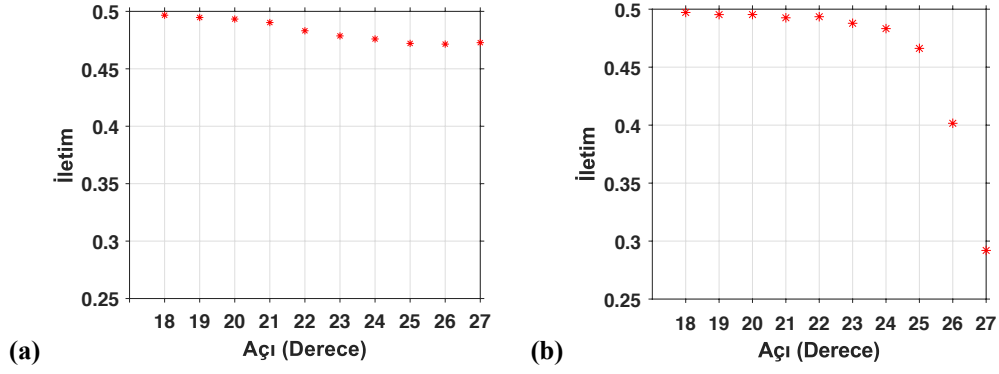
Şekil 2.8 : Değiştirilen açının şema görüntüsü.  $\theta_c$  açısı 18-27 derece arasında değiştirilerek farklı boyutlardaki yapılar için iletim sonuçları elde edilmiştir.

Yapılan çalışma Lumerical FDTD üzerinde 3 boyutlu olarak yapıyı tamamen kapsayacak şekilde ve simülasyon alanı sınırları PML (Mükemmel Uyumlu Katmanlar) olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan yapı, açı değişimlerinin iletime etkisini göstermek için parametrik olarak hazırlanan kod ile taratılmıştır. Hazırlanan

Y-eklem yapının -x eksenini (ışığın ilerlediği eksen) üzerinde  $1.55\mu\text{m}$  dalga boyunda kullanılan  $\text{LiNbO}_3$  kırıcılık indisine uygun olacak şekilde, Y-eklemlerin kırıcılık indisi  $n=2.2$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca, hazırlanan yapı  $1.2\mu\text{m}$ - $1.7\mu\text{m}$  ışık spektrumu içinde taratılmış ve sadece  $1.55\mu\text{m}$ 'ye ait olan veriler aşağıda paylaşılmıştır. Kullanılan ışık kaynağı temel mod (TE-TM) şeklindedir. Dalga kılavuzu içinde başarıyla oluşturulan temel modun dalga kılavuzu girişindeki görüntüsü Şekil 2.9 (a) ve (b)'de bulunmaktadır. Bununla beraber yapının kolları taratılan iyi performanslı (yükseklik-genişlik/ $1.1\mu\text{m}$ - $0.3\mu\text{m}$ ) dalga kılavuzu yükseklik-genişliği parametresiyle birlikte arasındaki açı  $18$  dereceden  $27$  dereceye geçecek şekilde taratılmış ve elde edilen iletim verimlilikleri Şekil 2.10 (a)'da gösterilmiştir. Aynı şekilde düşük performansa sahip yükseklik-genişlik parametreleriyle tasarlanan yapı ( $1.1\mu\text{m}$ - $1.1\mu\text{m}$ ), aynı açı aralığında taratıldığında ise Şekil 2.10 (b)'deki iletim grafiği elde edilmektedir. Bahse konu grafikler bölücü Y-eklem yapısının üst kol çıkışına aittir. Şekilde elde edilen iletim verimlilikleri MZI yapısı simetrik olduğundan yalnızca üst kola ait çıktılarından elde edilmiştir. Buna göre, en iyi iletim verimliliği en düşük açılara sahip Y-eklemlerin olduğu MZI ile elde edilmiştir. Alınan açı değerleri arasındaki fark sabit kalsa da her açı değeri arasındaki iletim verimliliği farkı eşit değildir ve açı arttıkça bu fark artmaktadır. İletim değeri için en iyi sonuçlara ulaşabilmek için küçük açılar tercih edilmelidir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta oluşan açının sebep olduğu kırılmalardır. Açı arttıkça artan kırılım sayısı ile dalga kılavuzunda ilerlemekte olan ışık kaybı artmaktadır.

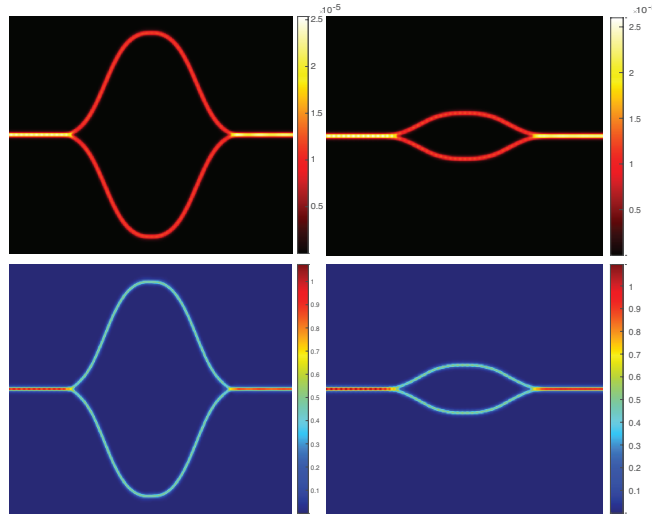


Şekil 2.9 : (a) Y-eklem giriş dalga kılavuzunda oluşan TM mod görüntüsü. Oluşan mod  $1.1\mu\text{m}$ - $1.1\mu\text{m}$ 'luk dalga kılavuzuna düzgün dağılmaktadır. (b) Y-eklem giriş dalga kılavuzunda oluşan TE mod görüntüsü. Oluşan mod  $1.1\mu\text{m}$ - $1.1\mu\text{m}$ 'luk dalga kılavuzuna düzgün dağılmaktadır.



Şekil 2.10 : (a) Açı değişiminin Y-eklem yapının iletim verimliliğine etkileri. (b) Düşük performanslı yapıda sonra Y-eklem yapıda oluşan iletim değerlerinin değişimi.

Oluşan kaybın en az olduğu yer yine açının en düşük tutulduğu yer olarak not edilebilir. Ancak, burada bir dalga kılavuzunun öbür dalga kılavuzu üzerinden kuple olan parazitlenmeler iki kolun da eşit miktarda bölünmeye uğramasından ve bir ayırıştırma mekanizması bulunmamasından dolayı not edilmemiştir. Ortalanarak hizalanmış yapıdan, kalınlığın belirlendiği -z ekseninde  $z=0$ 'dan alınan elektromanyetik enerji yoğunluğu görüntüleri en iyi ve en kötü performansa sahip iki açı için (18-27 derece) Şekil 2.11'de verilmiştir. Görülebileceği üzere, düşük performansa sahip açı konfigürasyonunda dalga kılavuzu dışına kayıp yüksek performanslı açı konfigürasyonuna göre bir farklılığa sebep olmamıştır. Ayrıca, tek mod iletim de bu grafiklerde gözlenebilmektedir.



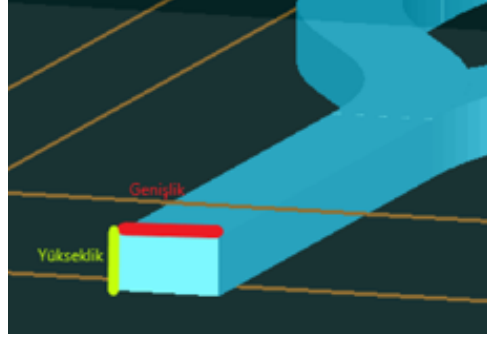
Şekil 2.11 : Sütunlar sırasıyla en düşük ve en yüksek performanslı Y-eklem açılarıyla oluşturulan MZI cihazları. Üst satır elektrik alanı, alt satır manyetik alanı temsil etmektedir.

### 2.3.2 Dikdörtgen prizması MZI dalga kılavuzlarının kalınlık-genişlik parametrelerinin verimliliğe etkileri

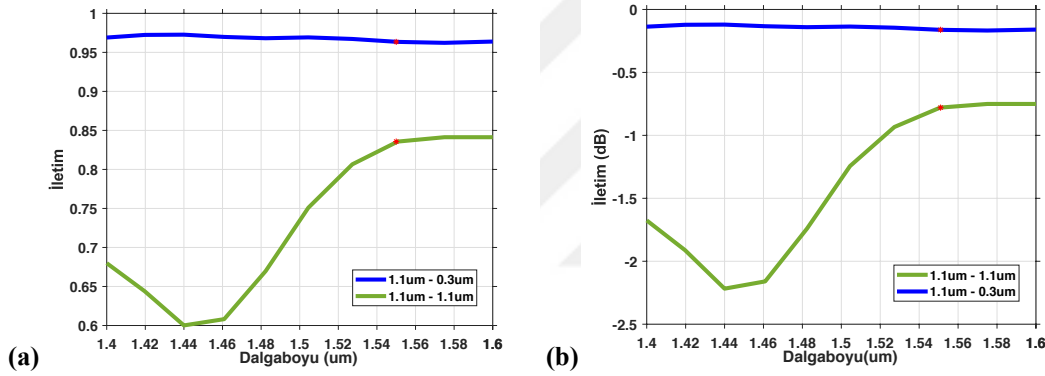
Dikdörtgen prizması dalga kılavuzu ve Y-eklem yapılarla oluşturulan Mach-Zehnder interferometresinde yükseklik ve genişlik parametrelerinde tarama yapılmıştır. Bunun için yapıların yüksekliği 0.3um ile 0.9um arasında 0.2um adımlarla artacak şekilde taratılmıştır. Genişlik parametresi ise 0.3um ile 1.5um arasında aralarda 0.2um aralık olacak şekilde taratılmıştır. Yapı yine Lumerical FDTD üzerinde simülasyona koyulmuş olup açı parametresi taranırken kullanılan simülasyon ortamı ve yapı parametreleri kullanılmıştır. Bu noktada, kullanılan Y-eklem açısı, önceki kısımda taratılan aralık içindeki açılardan en iyi performansa sahip açı olarak seçilmiş ve bu şekilde kalınlık-genişlik taramaları yapılmıştır. Yapının Şekil 2.12'deki görüntüsünde, taranan parametreler yeşil ve kırmızı çizgiler olarak belirtilmiştir. Yapılan parametre taraması sonucunda, yapı -x eksenine etrafında simetrik olduğundan yalnızca üst koldan elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

Şekil 2.13 (a)'da görüldüğü üzere, bir koldan elde edilen iletim değerleri az kayıplı olabilmektedir. Elde edilen iletim verileri 1.55um dalgaboyuna ait, yükseklik ve genişlik parametrelerinde yüksekliğin en geniş olduğu ve genişliğin en düşük olduğu taramaya aittir. Ancak, yükseklik sabit tutulup genişlik artırıldığında iletim verimliliğinin düştüğü gözlemlenmektedir. Taramalarla elde edilmeye çalışılan veri, belli genişliklerde iletim verimliliğinde artışın sağlanmasıdır. Ancak, burada önemli olan bir nokta şudur ki, taratılan parametre uzayı sınırlıdır ve yapılan simülasyonlar, kısıtlı parametre taranmasına rağmen uzun sürmektedir. Tüm taramaları kapsayan simülasyonlar, Intel Core i7 işlemciye ve 16GB RAM'e sahip bilgisayar üzerinde Lumerical FDTD 16 saat boyunca çalıştırılarak sonuçlandırılabilmiştir. Bu sadece FDTD simülasyonunun toplam çalışma süresi olmakla beraber oluşturulan modelin ve parametre taramasının tasarım süresi ayrıca hesaplanmalıdır. Yapının boyutu ve iletim verimlilikleri not edilerek, tezin diğer kısımlarında, daha karmaşık yapıların bu sonuçlara göre daha verimli hale getirilebileceği görülecektir. Şekil 2.13 (b)'deki

ekleme kaybı grafiği de giriş kanalına göre üst çıkış kolunda oluşan kaybı göstermektedir.



Şekil 2.12 : MZI yapısının modellenenmiş haline ait 3 boyutlu bir grafik. Grafik üzerinde parametrik taraması yapılan yükseklik ve genişlik parametreleri görülmektedir. Yapı grafikteki haliyle yükseklik ve genişlik olarak 1.1um-1.1um uzunluklarına sahiptir.

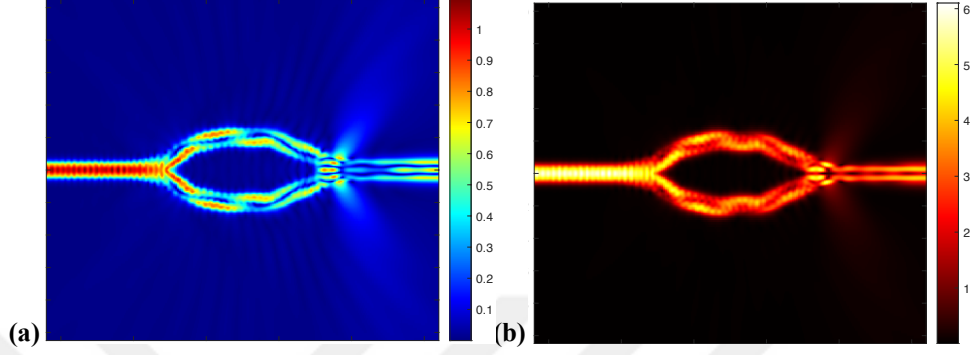


Şekil 2.13 : (a) Yükseklik-Genişlik parametreleri (1.1um-0.3um) ile (1.1um-1.1um) iken 18 derece açı ile oluşturulan MZI yapısının sağladığı optik iletim verimliliği grafiği. (b) Yükseklik-Genişlik parametreleri (1.1um-0.3um) ile (1.1um-1.1um) iken 18 derece açı ile oluşturulan MZI yapısının sağladığı ekleme kaybı grafiği.

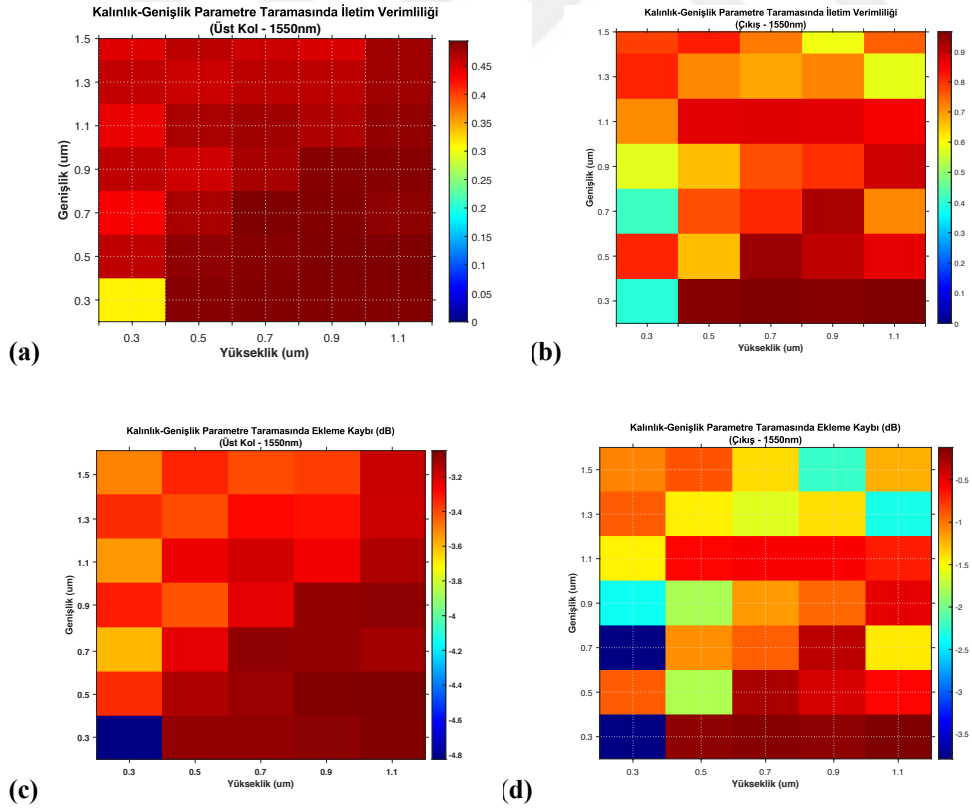
Yapının 1.1um-1.1um boyutlarına sahip olduğu konfigürasyona ait elektromanyetik enerji yoğunluğu grafikleri Şekil 2.14 (a)'da elektrik alan ve Şekil 2.14 (b)'de manyetik alan olacak şekilde gösterilmiştir. Görüldüğü üzere düzlem dışı elektromanyetik kayıplar yüksek genişlik parametreleriyle daha belirgin hale gelmektedir. Kayıplar dalga kılavuzu dışına doğru oluşmaktadır. Kalınlık olarak olmasa da genişlik artışıyla kayıpların artışı net olarak gözlenebilmektedir. Bu beklenen bir durumdur, çünkü kayıpların büyük kısmının sebebi genişlik artışı sebebiyle dalga kılavuzu içinde daha dik gelme açıları yapmaktadır ve ışığın kritik açıyı daha fazla yerde aşmasına sebep olmaktadır. İletim değerlerinin kalınlık ve genişlik bilgileriyle değiştiğini gösteren iletim haritaları Şekil 2.15 (a-d) ile verilmiştir.



Üst ve alt kanallardan elde edilen değerler tüm boyut değerleri için aynıdır. Yükseklik ve genişlik arttıkça artan iletim değerlerinin, belli değerler üzerinde olduğu sürece yüksek oldukları gözlenebilir. Çıkış değerlerinde de yine benzer bir durum gözlenmektedir; yükseklik değerinin düşük olduğu değerlerde genişlik değeri yükseldikçe iletim değerlerinin daha hızlı yükseldiği gözlenebilir.



Şekil 2.14 : Sırasıyla elektrik ve manyetik alan görüntüleri şekildeki gibi verilmiştir. Grafikler üzerinde, kayıpların olduğu ve aynı verimlilikte çıkışa yönlendirme yapılamadığı görülebilmektedir. Burada özellikle dikkat edilmesi gereken nokta, ışık dalgasını yönlendirirken düşük kayıpla kollara getirebilen yapı, simetrik olmasına rağmen çıkışta çok daha fazla kayba uğratmıştır.



Şekil 2.15 : Yükseklik-genişlik taraması ile üst kol ve çıkışta elde edilen iletim ve kayıp grafikleri gösterilmektedir. (a) Üst kola ait iletim değerleri (b) Çıkışa ait iletim değerleri. (c) Üst kola ait ekleme kaybı grafiği. (d) Çıkışta oluşan ekleme kaybı grafiği.

## 2.4 Elektro-Optik Modülatör Yapıların Performans Kriterlerinin İncelenmesi

Cihazın boyutu, elektro-optik modülatörlerde güç verimliliği açısından öneme sahiptir. Boyut kriterleri hassas bir şekilde bu modülatörlerin işleyişine bağlıdır. Bir elektro-optik modülatörün boyut olarak küçültülmesi ile cihazın kapasitansı azaltılacak ve tüm kullanım alanlarında vazgeçilmez bir parametre olan anahtarlama enerjisi azaltılacaktır. Bu amaçla önceden plazmonik yapılar, fotonik mikro-nano resonatörler, oluklu dielektrik dalga kılavuzları gibi çeşitli tasarımlar araştırılmıştır. Günümüzde yapılan tasarımlar arasında hala ilk tasarımlardaki gibi önemini koruyan  $\text{LiNbO}_3$ , tasarımların istenilen boyutlarda ve güç verimliliğinde sonuçlar vermesini sağlayabilmektedir. Monolitik  $\text{LiNbO}_3$  formunda enerji açısından verimli modülatörlerin üretilmesi hala araştırma konusu olan zorluklardan biridir. Bu sebeple, çalışma kapsamında, elektro-optik etkiyle modüle edilebilen interferometreler incelenecektir.

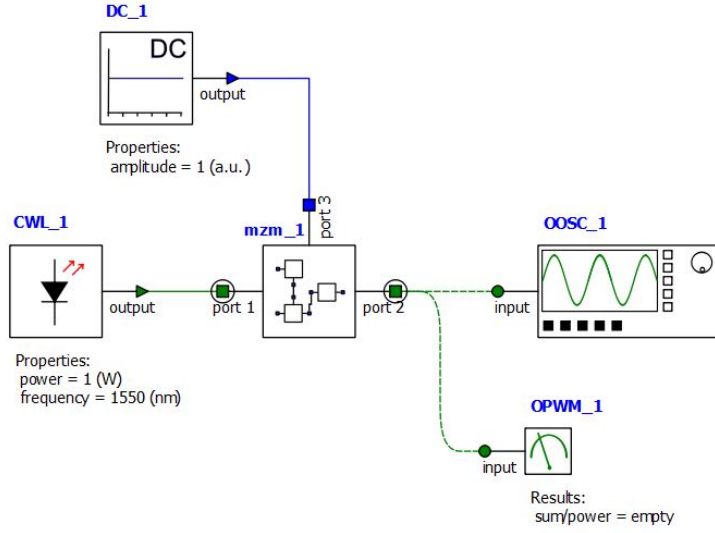
Entegre optik çiplerin en önemli işlevlerinden biri, çok yüksek frekanslarda ışığın yoğunluk modülasyonudur. Bu görevi gerçekleştirmenin en basit yollarından biri, bir elektro-optik substrat üzerinde entegre bir Mach-Zehnder interferometresi (MZI) oluşturmaktır. MZI, tek mod kanal dalga kılavuzu ile başlar ve daha sonra onu bir Y-eklem aracılığıyla iki simetrik dala ayırır. Bir süre sonra iki dal paralel hale gelir. MZI simetrik bir birleştirici Y-eklem ile devam eder ve düz bir dalga kılavuzunda sona erer. MZI tam olarak simetrik ise, giriş ışığı ilk Y-bağlantısında iki paralel dala ayrılır ve ardından yapıcı bir şekilde nihai düz dalga kılavuzuna yeniden birleşir. Ancak, eğer interferometrenin kollarından birinde ışık  $180^\circ$ 'lik bir faz kaymasına maruz kalırsa, ikinci Y-dalının sonunda, iki koldan gelen ışık, faz kaymasından sonra yeniden birleşecek ve yıkıcı girişime yol açacaktır. Bu durumda çıkışta ışık yok olacaktır. Bir koldaki faz kayması, dalga kılavuzuna belli bir gerilim farkı uygulanarak elektro-optik etki yoluyla gerçekleştirilir. Kristal yönünü, polarizasyonu, elektrot geometrisini ve uygulanan gerilimi uygun şekilde seçerek, belirli bir dalga boyu için  $180^\circ$ 'lik bir faz kayması elde edilebilir. [2] Bu yolla bir Mach-Zehnder modülatör (MZM) elde edilmesi mümkündür.

MZM konfigürasyonunda, Mach-Zehnder interferometrenin iki kolunun malzemesinin bağlı kırılma indisi, anahtarlama gerilimi uygulanarak değiştirilir. Böylece, ilk 3dB kuplörden ayrıldıktan sonra giriş kaynağından gelen ışık,

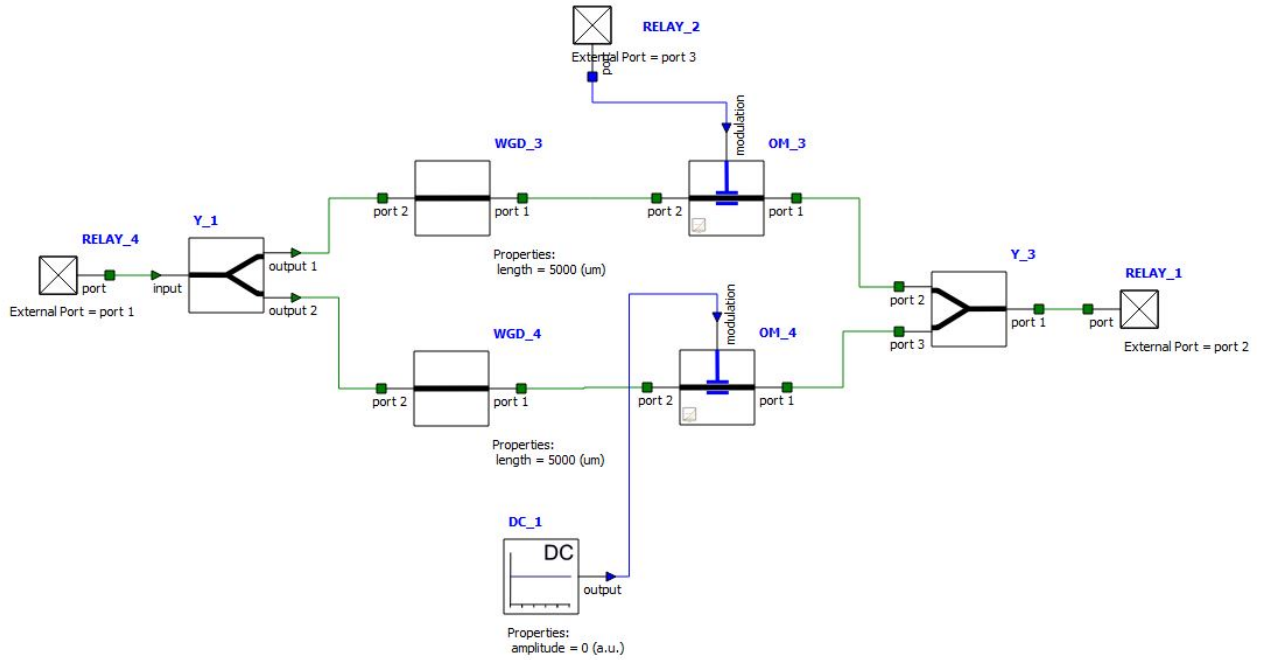
interferometrik kollardan geçer ve elektrotlar arasındaki gerilim değişimlerinden dolayı faz farkı yaşar. [22] Elektrotların uzunluğu cihazın büyüklüğünü değiştirir ve büyük cihaz boyutları, büyük ölçekli yonga üstü entegrasyon için uygulanabilirliği sınırlar. Ayrıca, MZM'lerin en önemli çalışma kriterlerinden modülasyon hızı, WDM (Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama) gibi sistemlerde elektro-optik modülatörlerin performanslarını ölçmek için önemli bir ölçüttür. [23] Modülatörlerin çalışma prensibini basit şekilde göstermek için tek kol üzerinden gerilim uygulanması yeterlidir. Modülatör çalışması sırasında tepeden tepeye gerilim seviyelerinin düşük olması, yüksek frekanslarda daha düşük güç harcanmasını sağlar. [24] Daha düşük güç harcayan yapılar hem enerji açısından hem de maliyet açısından karlıdır. MZM üzerindeki dalga kılavuzu uzunluğu ve uygulanan gerilimin değişimi en önemli MZM performans parametrelerini vermektedir. Yapılan çalışmada, bu parametrelerin geleneksel yöntemlerle nasıl ayarlanabileceğini ve hangi kriterlerin değiştirilebileceğini göstereceğiz.

#### **2.4.1 Elektrik alan uygulanan dalga kılavuzu boyunun verimliliğe etkileri**

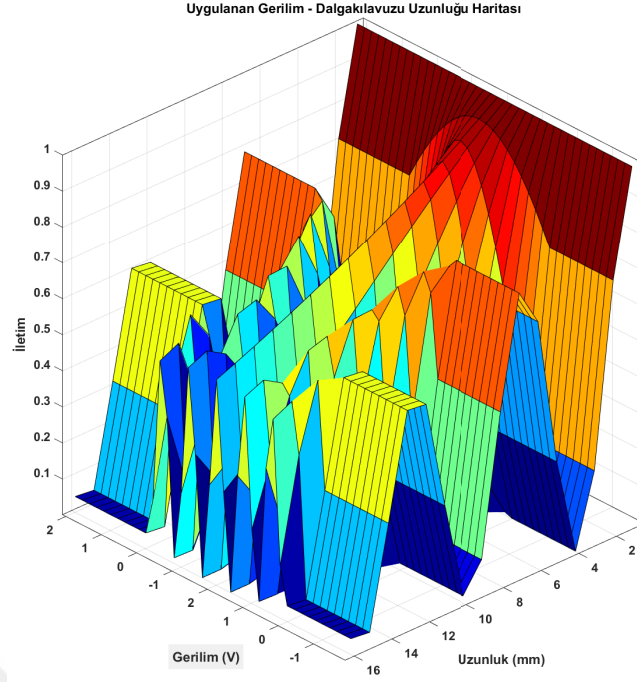
Lumerical Interconnect üzerinde oluşturulan MZM yapısı, modülasyon ile ölçme devresi Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de verilmiştir. MZM kolları arasındaki gerilim farkı arttırıldıkça oluşan iletim farklılıkları da farklı gerilim değerleri için taranmıştır. Şekil 2.18'de, MZM yapısının iletim verimliliği haritalandırma ile gösterilmiştir. Kullanılan kaynak sürekli dalga lazeridir ve 1550nm dalga boyunda iki mod olmak üzere temel TE ve TM modunda kullanılmıştır. Burada değiştirilen iki parametre; MZM kolu dalga kılavuzlarının uzunluğu ile dalga kılavuzlarına uygulanan gerilim farkıdır. Gerilim yalnızca üst kol üzerinde taranmış olup alt kol DC=0V değeriyle sabitlenmiştir. Taranan gerilim değerleri -2V ile 2V arasında ve taranan dalga kılavuzu boyutu ise 0mm ile 15mm arasında değişmektedir.



Şekil 2.16 : Lumerical Interconnect üzerinde tanımlanan MZM test ekipmanı. MZM yapısının iç tasarımı Şekil 2.18’de verilmiştir. Kullanılan D.C. kaynağı yalnızca bir kanalı modüle etmekle birlikte, diğer kanal 0V olarak sabitlenmiştir.



Şekil 2.17 : Lumerical Interconnect üzerinde tanımlanan MZM yapısı.

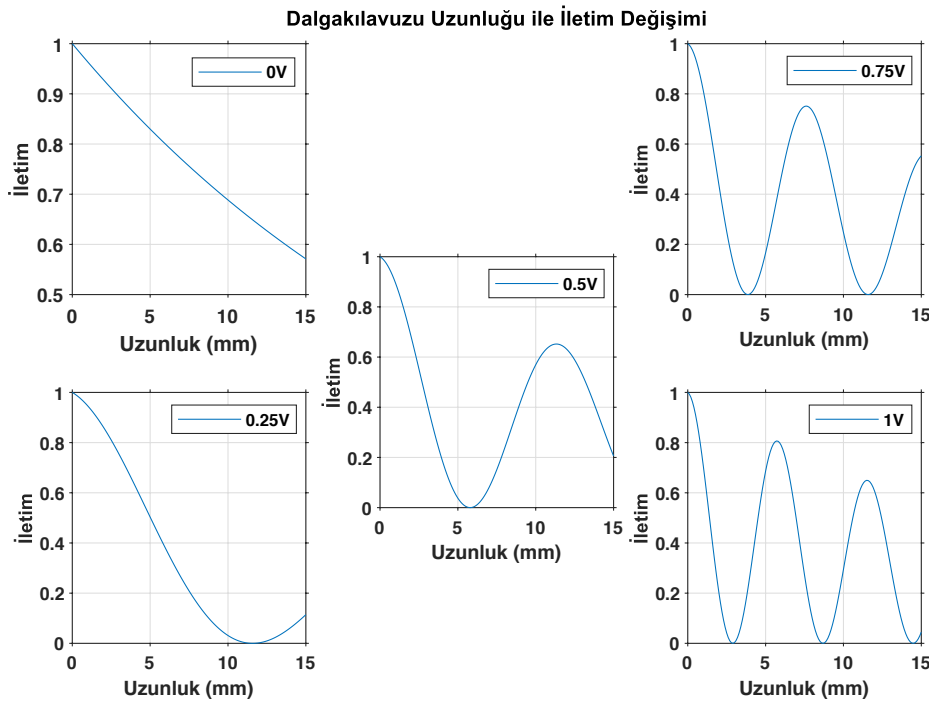


Şekil 2.18 : Gerilim uygulanmasıyla dalga kılavuzu uzunluğunun taratıldığı harita. -1V ile 1V arasında oluşan salınımlar dalga kılavuzu uzunluğu kısaldıkça azalmaktadır. -1V ve 1V aralığı dışında taratılan kısımlar sabit dalga kılavuzu boyunda sabit kalmaktadır.

Şekil 2.18’de görülen iletim haritasında, en yüksek iletim verimliliği en kısa dalga kılavuzu uzunluğunda uygulanan 0V ile olmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken husus, gerilim değerleri değiştikçe iletim verimliliğinin düşüp yükselebilmesidir. Bu, MZM’in elektro-optik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Oluşan yapıcı ve yıkıcı girişimler ile iletim verimliliği artıp azalabilmektedir.

-1V ile 1V arasında uygulanan gerilim değişimlerinde iletim değerlerinin salınım yaptığı görülmektedir. Bu salınımın frekansı elektrik alanın uygulandığı dalga kılavuzunun uzunluğu azaldıkça azalmaktadır. Bunun sebebi, elektrik alanın uygulandığı yüzeyin büyümesiyle birlikte ışığın modülasyona uğradığı alanın da artmasıdır. Böylelikle, sürekli yapıcı ve yıkıcı girişimler yapan ışık, aynı gerilim değişimi aralığında daha çok salınmaktadır. Tabi, bu durumla beraber harcanan güçte de artış olmaktadır. Daha uzun dalga kılavuzlarına sahip yapılar daha çok salınım yaparak daha çok enerji harcamaktadırlar. Aynı zamanda, iletim verimliliklerine bakıldığında, uzun dalga kılavuzlarının gerilim değişimine göre çıkıştaki en yüksek iletimlerinin de kısa dalga kılavuzuna sahip olanlara göre düştüğü görülmektedir. Böylelikle elektro-optik yapıların hem boyut hem de güç kaybı olarak optimizasyonu

sezgisel olarak bir noktaya kadar yapılabilmektedir. Burada incelenmesi gereken bir başka konu da belli uzunluktaki dalga kılavuzlarına elektrik alan uygulandığında, -1V ile 1V aralığının dışında kalan taramalarda iletimin cihazın iletebildiği en yüksek ile en düşük iletim verimliliklerine ulaşacak şekilde doyuma ulaştığı görülebilmektedir. Bu tarz cihazlar için yapılabilecek iyileşmeler, cihazın kompakt hale getirilmesi ve düşük güç harcayacak şekilde düzenlenmesidir. Böylece maliyet etkin, boyut olarak küçük ve az güç tüketen yapılar hazırlanabilecektir. Tezin ileri bölümlerinde bu konular araştırılacak ve çözümler önerilecektir.

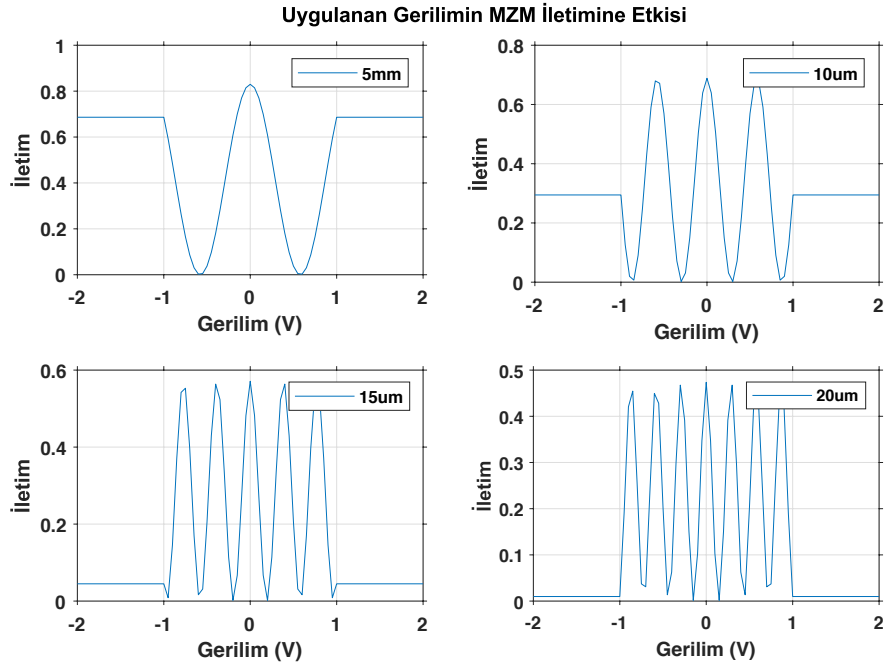


Şekil 2.19 : Dalga kılavuzu uzunluğunun iletim değişimine olan etkilerini gösteren grafik. Uygulanan gerilime göre dalga kılavuzunun değişimi iletime daha fazla etkiyebilmektedir.

Şekil 2.19'da dalga kılavuzunun uzunluğuna göre iletimin yapıcı-yıkıcı özellikleri görülebilmektedir. Ancak, belli dalga kılavuzu uzunluğunda iletim salınımını belirleyen özellik dalga kılavuzuna uygulanan gerilimdir. Gerilimin artışıyla, dalga kılavuzunun üzerinde iletim salınımları sıklığı da artmaktadır. Herhangi bir gerilim farkında, dalga kılavuzu uzunluğu arttıkça iletim seviyeleri düşmektedir. Yüzey alanını azaltabilecek herhangi bir konfigürasyon aslında güç tüketimini de azaltacaktır. Bu noktada, ihtiyaç dahilinde kısa dalga kılavuzuna sahip MZI seçimi yapılabilir.

## 2.4.2 Uygulanan elektrik alan şiddetinin verimliliğe etkileri

Elektro-optik bir özellik olan yapıcı ve yıkıcı girişimlerin oluşabilmesi için elektro-optik özelliğe sahip yapılara elektrik alan uygulanması gerekmektedir. Bu şekilde elektro-optik özelliğe sahip yapı üzerinde kırıcılık indisi değişimi sağlanarak ışığın fazıyla oynanabilir. Bir MZM için bir kolda ışığın fazıyla oynanması, çıkışta oluşacak olan yapıcı girişimin şiddetinin düşmesine hatta yıkıcı girişime dönüşmesine ve iletim değerlerinin en düşük seviyelerini görmesini sağlayabilir. Bu amaçla MZM yapısı, yine Lumerical Interconnect üzerinde gerilim seviyeleri taranarak ve dalga kılavuzu boylarıyla oynanarak incelenmiştir. -2V ile 2V arasında 0.05V adımla taratılan iletim verimliliği grafikleri aşağıda verilmiştir. Dalga kılavuzu uzunluğu arttırıldıkça salınım oranlarının arttığı gözlenmekte, ancak iletim verimliliğinin de düştüğü görülmektedir. Aşağıdaki grafiklerden  $V_\pi$  ve dalga kılavuzu uzunluğunun çarpımı olarak MZI performans kriteri bir parametre ortaya çıkmaktadır.  $V_\pi$ , yarı dalga gerilimi olarak isimlendirilir (en üst nokta ile en yakın en düşük nokta arası gerilim aralığı). Oluşan grafiklerin tamamında, cihazın performans kriteri " $V_\pi \times L$ " = 3 olarak bulunmaktadır.



Şekil 2.20: Uygulanan gerilim ile MZM iletiminin değişimini gösteren grafikler. 5mm, 10mm, 15mm ve 20mm'lik uzunluklara sahip dalga kılavuzlarına -2V ile 2V arasında gerilim uygulandığında ortaya çıkan iletim grafiklerini göstermektedir.

Şekil 2.20’de görüldüğü üzere, dalga kılavuzu üzerine uygulanan gerilimin iletim cevabı olarak değişimi, farklı dalga kılavuzu uzunluklarında farklı tepkiler şeklinde oluşmuştur. Dalga kılavuzu uzunluğunun artması, belli gerilim aralıklarında (burada -1V ve 1V) farklı sıklıklarla salınım yapılmasına sebebiyet vermiştir. Özellikle dalga kılavuzu boyunun artışının, salınımın artmasına sebep olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Dalga kılavuzu uzunluğu artışıyla elektro-optik özelliklerin oluştuğu alan da artmış olur. Bu yolla, uygulanan aynı gerilim, farklı dalga kılavuzu uzunluklarında daha fazla veya az iletimsel salınım (girişimlerin sonucu olarak) oluşmasını sağlar.





### **3. TERSİNE TASARIM YÖNTEMİ İLE ELEKTRO-OPTİK MODÜLATÖR BİLEŞENLERİNİN PERFORMANS İYİLEŞTİRİLMESİ**

Geleneksel yöntemlerle tasarlanan fotonik cihazların performansları çok ümit verici olsa da, piyasada rekabet edebilmeleri için birçok temel sorunun çözülmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikli olarak, sezgisel yönlendirmelerle deneme yanılma yöntemi kullanılabilir. Bu tür doğrudan yaklaşımlar etkili bile olsa, sorunun kapsamıyla sınırlanmaktadırlar. Doğrudan tasarımların en önemli sorunu bu sınırlama olarak kabul edilebilir. Doğrudan tasarım yöntemleriyle bir fiziksel sorunu formüle etmeden bir cihaz üretmek neredeyse imkansızdır. Doğrudan tasarımda oluşan sorunlara beklenmedik çözümler önerebilmek amacıyla, yalnızca kullanıcının bilgi ve sezgilerine dayanan deneme yanılma yöntemleri değil, stokastik bir optimizasyon algoritması önerilmelidir. Bu noktada geçmişte, bu tür yaklaşımların kullanılabilmesi için optimizasyondan sonra da fiziksel sezgi yoluyla parametre uzayını daraltmak amacı güdülmüştür. Cihaz tasarımları, tersine tasarım optimizasyon yöntemleri etkili şekilde kullanılarak başarılı şekilde tasarlanabilir. [25]

Elektro-optik modülatörlerin tasarımında da, ihtiyaca göre bazı kriterlerin sağlanması gerekmektedir. Bu tasarım kriterleri yalnızca cihazların optik iletim verimliliğinin belli bir seviyede olması değil, ayrıca cihazın kompakt bir yapıya sahip olması ve az güç tüketen bir yapı olması olarak da düşünülebilir. Günümüzde yapılan çalışmalar, oluşturulan tasarımların olabildiğince az yer kaplayan ve düşük güç gereksinimleriyle çalışan yapılar olmasını hedeflemektedir. Klasik deneme-yanılma tarzı optik tasarım yöntemlerinde başarı kriteri sağlansa bile boyut ve güç tüketimi gibi birçok önemli kısıtastan da ödün verilmektedir. Sezgiye dayalı yöntemlerin ulaşabildiği parametre havuzu ve bu havuzun taranması sırasında kaybedilen zaman, artık yeni tasarım yöntemleriyle elektro-optik modülatörlerin geliştirilmesinin yolunu açmıştır. Bu kapsamda ortaya çıkan tersine tasarım yöntemleri, ihtiyaca göre şekillendirilebilen birçok nanofotonik uygulamada da kullanılabilir bir yöntem olmuştur. Çeşitli tasarımların, boyut ve güç anlamında optimum seviyelerde olmasına rağmen sezgisel yöntemlerle tasarlanan benzer yapılara göre iletim değerlerinde farklılık olmaması, bu yöntemlerin son zamanlarda daha sık kullanılmasına sebep olmuştur.

### 3.1 Tersine Tasarım ile Kompakt ve Düşük Güçlü Optik Eleman Üretimi

Tersine tasarımın ortaya çıkmasında etkili olan nedenler son birkaç yüz yıldır bulunmaktadır. Bernoulli, Maupertuis ve Ambartsumian gibi matematikçilerin birçok matematiksel denklemin ortaya çıkışında aradıkları mantık, tersine tasarım mantığına giden yolda mihenk taşı olmuştur. Tersine tasarımın özündeki arayışın sebebi yapılabilecek tasarımların sonuçlanmasına giden yolda elde edilen sistemi çözebilmek ve bu sistemlerin iyileştirilip daha iyi tasarımlar yapılmasını sağlayan algoritmalar geliştirmektir. [26]

Nanofotonik bağlamında hazırlanan tersine problem formülasyonları ise çok daha yenidir. Nanofotonik optimizasyon, 90'ların sonunda Spühler ile Cox ve Dobson'ın çalışmasıyla başlamıştır. Spühler genetik (evrimsel) algoritma kullanarak, Cox ve Dobson ise gradyan arama algoritması kullanarak fotonik tersine tasarımın ilk örneklerini uygulamışlardır. Karmaşık dışbükey olmayan objektif fonksiyonlar dışında, gradyan bilgisinin olmadığı durumlarda genetik algoritmalar tercih edilebilir. Ancak, gradyan tabanlı nanofotonik hesaplamayla karşılaştırıldığında, genetik algoritmalar hesaplama açısından daha maliyetlidirler ve yerel yapı uzayında en uygun tasarımları atlama ihtimalleri daha yüksektir. [10,26]

İlk tersine tasarım incelemelerini takiben Lagrange maksimizasyon problemi ve yoğunluk topolojisi optimizasyonu adı verilen iki yöntem, tersine tasarım kapsamında çalışılmaya başlanmıştır. Yoğunluk topolojisi optimizasyonu sistematik bir yöntem olarak diğer tasarım yöntemlerine göre çok daha geniş bir tasarım alanı üzerinden hazırlanır. Bu yöntemde, oluşturulan fiziksel sorunun sonlu ayrıklaştırılmasıyla (finite discretization) her bir hesaplama parçasına ait düğümler (çizgi parçası, piksel veya vokseller) birer serbestlik derecesi olarak düşünülür ve her bir adımda gevşetilirler. [26,27]

Her iki yaklaşımda da oluşan parametre uzayı çok geniş kapsamlıdır ve bu sebepten ötürü, yerel optimuma yaklaşabilmek için gradyan tabanlı ilerlemeye dayalı tasarım parametreleri kullanılmalıdır. Gradyanlar kullanılarak optimizasyon adımlarında iyileşme sağlanabilmektedir. Olabilecek en iyi performansa sahip tasarımın bulunmasında gradyanlar kullanılabilir. Yapılan tasarımların üretilebilir olması büyük öneme sahip olduğundan, litografi yöntemleri de araştırılıp gradyan temelli tasarım çalışmalarında nasıl ilerlenebileceği incelenmiştir. Zamanla hesaplama

gücünde görülen artışla beraber daha büyük tasarımların tersine tasarım algoritmalarına adapte edilmeye çalışılması ise zorlukları beraberinde getirmiştir. Kısıtlamalar olmadan yoğunluk topolojisi optimizasyonu ile oluşturulan hesaplama parçaları, yalnızca tasarım için seçilen dar alanların boyutuyla sınırlı kalmıştır. [26]

Yoğunluk topolojisi optimizasyonu kullanıldığında gradyanları yönlendirebilmek için yapı üzerindeki elektriksel geçirgenlik sürekli olarak değiştirilebilir. Bu işlem sırasında, malzeme özelliği kısıtlamalarına bağlı şekilde ikili veya parçalı sabit yapıların oluşturulabilmektedir. Bu süreçte kullanılan adımlarla, aşamalı indekse sahip ara yapılar oluşmaktadır. Bu sorunun çözümünde hangi parametrelerden ödün verileceği araştırılmaktadır. Bu araştırma, tersine tasarım algoritmasının hedefe ulaşırken hangi kısıtlardan vazgeçmesi gerektiğine dair temel bir mantık oluşturmuştur. [10,26]

Tersine tasarım iki temel probleme evrilebilir: Birincisi, Maxwell denklemlerinden çıkarılan mutlak kısıtlamalar gevşetilebilir ve denklemlerin çözümüne göre hedefe yaklaşılarak tahmini bir elektrik alan belirlenebilir. İkincisi ise, tahmin edilen elektrik alan, tasarımcının istediği elektriksel geçirgenlik göz önünde bulundurularak şekillendirilir ve doğru yapı ile tahmini yapı arasındaki fark azaltılır. Bu yolla fiziksel olarak çalışma prensipleri belirlenen yapılar istenilen elektriksel geçirgenliğe sahip olacak şekilde tasarlanabilir. [27]

Dönüşüm optiği, tersine tasarım yöntemlerini tamamlamaktadır. Dönüşüm optiği kapsamında, koordinat dönüşümleri üzerinden elde edilen sonuçlar bir cihazın verimli bir şekilde geliştirilmesi için yeterli olabilmektedir. Mesela, dalga kılavuzuna enjekte edilen modların kılavuz içindeki kırılımlar yüzünden sızmasını önlemek için  $90^\circ$  dönüş kabiliyeti olan koordinat dönüşümü sayesinde aynı elektriksel geçirgenliğe sahip yapı tasarlanabilecektir. [26] Böylece kaybı en aza indirilmiş yapı da istenilen elektriksel geçirgenliğe sahip olur. Bu şekilde, ucuz, az kayıplı ve küçük optik elemanlar hedeflenebilir ve yüksek adım sayısı ile istenilen nanofotonik yapıya erişilebilir.

Sonuç olarak, sezgisel tasarımlarla oluşturulabilen bazı optik elemanlar, optik ve geometrik parametrelerin modifiye edilmesi ve konfigürasyonlarında değişikliğe gidilmesi yoluyla daha kompakt ve az güç harcayacak şekilde yeniden tasarlanabilir. Bunun için, tersine tasarım probleminin temelini oluşturan Maxwell denklem

değişkenleri, bu denklemler diskritize edilerek numerik yöntemle hem zaman hem de uzayda belirli çözünürlüklerle iteratif çözülerek zamanda elektro-manyetik dalga değişimi gözlenebilir. Bu çalışma kapsamında geleneksel yöntemlerle tasarlanan nanofotonik cihazlar ile benzer performans kriterlerini sağlayan yapılar, kompakt ve az güç tüketimi sağlamaları amacıyla tersine tasarım yöntemini kullanan SPINS altyapısıyla tasarlanmıştır ve örnek bir tasarımın oluşan çıktısı ürettirilerek deney yoluyla çalışırılığı doğrulanacaktır. Bahsekonu olan çalışma uluslararası dergilere gönderilmek üzere tamamlanacaktır.

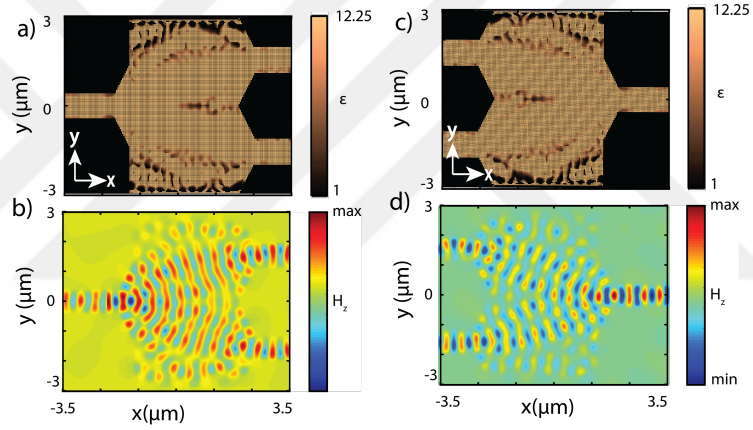
### 3.1.1 SPINS-b tersine tasarım algoritması

Fotonik, geniş uygulama alanına sahiptir ve bu alanda basit geometrilerle yapı tasarlayabilmek için çeşitli yapı blokları kullanmak gerekmektedir. Tersine tasarım olarak da bilinen gradyan temelli optimizasyon temelli nanofotonik tasarım algoritmaları, geleneksel yöntemlere göre çok daha geniş bir tasarım parametresi tarama imkanına sahiptir. Tipik bir tasarımda uygulanabilecek yapı blokları o kadar fazladır ki, oluşturulabilecek yapıların az bir miktarını simüle etmek bile imkansızdır. Gradyan temelli optimizasyon sadece fazladan bir elektromanyetik simülasyon ile hesaplanabildiğinden, etkili ve küçük yapıda cihazlar üretmekte kullanılabilir. [10]

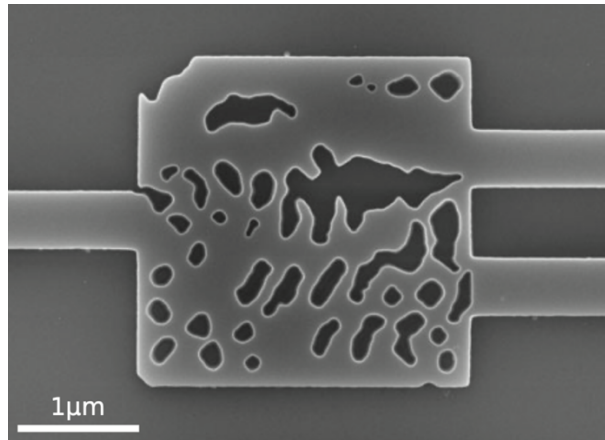
Fotonik yapıların tasarımındaki en önemli zorluklardan biri oluşturulan yapının rastgele değil sabit bir ya da birkaç geçirgenlik dağılımına sahip olabilmesidir. Az miktarda geçirgenlik dağılımı farklılığı olan yapıların üretilebilirliği daha kolay olmaktadır. Geçirgenlik dağılımı farklılığının az olması, litografi ile üretilecek olan yapının dikey ekseninde aynı geçirgenlik dağılımına sahip olması ve boyut kısıtlamaları sebebiyle tasarım algoritmasının belirli kısıtlara sahip olması gerekir. SPINS, Stanford Üniversitesi'nde çalışmalar yapmakta olan Vuckovic Grup tarafından gradyan temelli optimizasyon özelliğine sahip bir nanofotonik tersine tasarım yapısı olarak tasarlanmıştır. SPINS ikili geçirgenlik dağılıma sahip yapıları oluşturmaya odaklı bir tasarım yapısıdır. [10,27]

SPINS altyapısı tasarlanmadan önce kullanımda olan bir başka tersine tasarım algoritması olan hedef öncelikli algoritma, yine Vuckovic grup tarafından tasarlanmıştır. Ayrıca, hedef öncelikli algoritmaya ek olarak tasarımı başarılı kılabilmek için “en dik iniş” yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle performans

kısıtlamalarının karşılanmaya zorlandığı ve Maxwell denklemlerinin çalışma sırasında önemsenmediği hedef öncelikli algoritma kullanılmakta ve başlangıç için bir tahmin oluşturulmaktadır. Burada, Maxwell denklemleri hemen hesaba katılmadan performans odaklı çalışma yapıldığı için bu yöntemle hedef öncelikli algoritma ismi verilmiştir, Şekil 3.1’de ulusal bir kurultayda bildiri olarak sunduğumuz “Y-eklem bölücü ve birleştirici” hedef öncelikli algoritma tasarımı görülebilir. Ayrıca, Şekil 3.2’de bu yöntemle tasarlanıp üretilmiş bir yapının SEM görüntüsü bulunmaktadır. Tahminin ardından, iterasyonlar ilerledikçe Maxwell denklemleri olabildiğince sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu iki aşamada, tasarım bölgesindeki geçirgenliğin silikon ve hava arasında serbestçe değişmesine izin verilmiştir. Son aşamada, sınır parametrizasyonu kullanarak tasarım ayrık bir yapıya dönüştürülmektedir ve yine “en dik iniş” yöntemini kullanarak yapı optimize edilmiştir. [10,27-29]

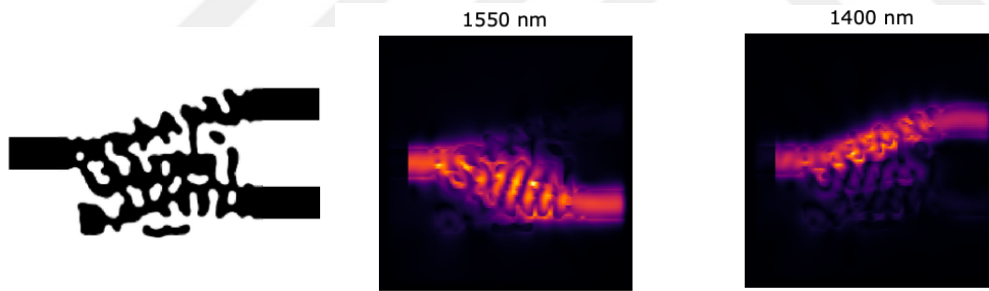


Şekil 3.1 : 1000 iterasyon ile optimize edilmiş optik güç bölücü ve birleştirici yapılarına ait (a-c) elektriksel geçirgenlik ve (b-d) FDTD manyetik alan dağılımı sonuçları [29]



Şekil 3.2 : Vuckovic Grup tarafından hedef öncelikli algoritma ile tasarlanan bir WDM yapısının üretilmiş halinin SEM görüntüsü [10]

SPINS ve benzeri gradyan tabanlı metodolojiler, minimumlarını bulmak için parametre taramalarına veya rastgele bozulmalara bağlı kalmadıklarından, genetik veya parçacık sürüsü optimizasyonundan daha az simülasyon gerektirme eğilimindedir. Dahası, elektromanyetik tasarım problemlerindeki gradyan temelli yöntemler, duyarlılığın birleşik yöntem aracılığıyla verimli bir şekilde hesaplanmasından yararlanabilir. Bu, bu yöntemlerin gradyan içermeyen optimizasyon şemalarından çok daha fazla sayıda serbestlik derecesinde optimize etmesine olanak tanır. Bu yaklaşımın sağladığı geniş parametre alanı, herhangi bir spesifik başlangıç koşulu veya analitik teoriye ihtiyaç duymadan, dalgaboyu çözme veya mod sıralama gibi birleşik işlemlere sahip ızgaraların tasarlanmasına olanak tanır. SPINS'in tasarım optimizasyonu nihai bir diskritize etmeyi içermekte ve bu şekilde sonuç yapı ikili bir dielektrik sabiti dağılımı şeklinde olmaktadır. Bu sebeplerle, SPINS'in kullanım alanı gradyan temelli olmayan yöntemlere ve SPINS öncesi kullanılan hedef öncelikli algoritmaya göre çok daha geniştir. [28] SPINS'e ait bir tasarım ve tasarımın sonucu olan elektromanyetik enerji yoğunluğu grafiği Şekil 3.3'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.3 : Vuckovic Grup tarafından SPINS ile tasarlanan bir WDM'in elektriksel geçirgenlik dağılımı ve 1400 ile 1500nm dalgaboylarını ayırttığı elektromanyetik enerji dağılım grafikleri [34]

SPINS hem 2D hem de 3D tasarımlar yapabilmektedir. 2D tasarımların hızlı tahminler alabilmek için öncelikli seçim olmalıdır. Ancak, 3D tasarımlar hesaplama olarak yüksek maliyetli olmasına rağmen, 2D tasarımlar 3D tasarımlara göre daha başarısız bir kayıp simülasyonu oluşturmakta ve düzgün bir optimizasyon topolojisi sağlayamamaktadır. Bu sebeple, daha ayrıntılı sonuçlar elde edebilmek için 3D optimizasyon kullanılabilir. [28] Ancak unutulmamalıdır ki, yapılacak 3D optimizasyonlar güçlü hesaplama ürünleri ve uzun zaman gerektiren işlemlerdir. Bu

sebeple ihtiyaca yönelik olarak 3D veya 2D optimizasyonlar arasında bir seçim yapılabilirdir.

Optimizasyon esnasında düğüm adı verilen yazılım bloklarını kullanılarak bir sorun grafiği çıkarılmaktadır ve bu şekilde tasarım istenilen şekilde tasvir edilebilmektedir. Oluşturulan sorun grafiği her iterasyonda kaydedilmekte ve gerekirse ileride optimizasyon kaldığı yerden devam ettirilebilmektedir. Tersine tasarımda, kullanıcı kontrol parametrelerini çalışmalı ve gerekli gördüğü yerlerde kullanmalıdır. Tasarımda önemli olan hedef fonksiyonu ve başlangıç durumunun seçimidir. [34]

Yapı oluşturulması sırasında elektrik alan dağılımını hesaplamak için elektromanyetik simülasyonlar yapılmaktadır ve bu simülasyon geçirgenlik dağılımını esas alarak hesaplanır. Elektrik alan dağılımı, frekans alanında Maxwell denklemleri ters çevrilerek aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$E = \left( \left( \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \right) - \omega^2 \epsilon(p) \right)^{-1} (-i\omega J) \quad (3.1)$$

burada J giriş kaynağı ve  $\omega$  frekanstır. [27]

Çoğu fotonik tasarımı aşağıdaki formülle açıklanabilir:

$$\min_p f_{obj}(E(\epsilon[p])) \quad (3.2)$$

$$p \in S_{fab} \quad (3.3)$$

$f_{obj}$  optimizasyonun hedefini belirten nesnel işlev, E elektrik alan,  $\epsilon$  parametrizasyon vektörü p ile tanımlanan geçirgenlik dağılımı ve  $S_{fab}$  fabrikasyon kümesidir.

Tersine tasarım için hazırlanan hedef denklemleri ise şudur:

$$f_{obj}(p) = - |c^\dagger E(p)|^2 \quad (3.3)$$

burada  $c^\dagger E$ , elektrik alanı E'nin cihaz çıkışındaki hedef mod c ile modal örtüşmesini (mode overlap) hesaplar.

$$\min_p \|\epsilon_{disc}(p) - \epsilon_{cont}\| \quad (3.4)$$

burada  $\epsilon_{\text{cont}}$  sürekli geçirgenliktir ve  $\epsilon_{\text{disk}}$ , ayrık geçirgenliktir. Bu optimizasyon problemi alana bağlı olmadığından, optimizasyonu hızlıdır, ancak problemi çözme yöntemi parametrizasyon ( $p$ ) seçimine bağlıdır.

Genel olarak, optimizasyon adımlarının her biri, bir parametrizasyonu diğerine dönüştüren bir dönüşüm olarak düşünülebilir. Bazı dönüşümler (ayrık optimizasyon) parametrizasyon tipini korurken değerleri değiştirmektedir, ancak diğer dönüşümler (ayrıklaştırma) parametrizasyon tipini de değiştirir. Tasarım problemini çözme işlemi, rastgele bir yapı ile başlayan ve tamamen optimize edilmiş bir yapı üreten bir dizi dönüşüm seçmeyi içerir. [27,34]

### 3.2 SPINS ile Fotonik Yapı Tasarımları

SPINS, iki bölümden oluşan bir optimizasyon planı kavramı etrafında inşa edilmiştir. İlk olarak, düğüm adı verilen temel yapı taşları bir problem grafiği oluşturmak için bir araya getirilir. Problem grafiği, simülasyonun detaylarından başlayarak hedef fonksiyonunun kesin ve son formuna kadar tasarım probleminin tam bir açıklamasını sağlar. İkinci olarak, optimizasyon stratejisini tanımlayan bir dizi dönüşüm vardır. Dönüşümler ya parametrizasyon değerlerini değiştirir ya da bir parametrizasyon biçimini diğerine dönüştürür. Bu dönüşümler, sürekli ve ayrık optimizasyon aşamalarının yanı sıra, optimizasyon sonundaki nihai ayrıklaştırma sürecini içerir. Dönüşümler, hedef fonksiyon değeri gibi gerekli denklemleri hesaplamak için problem grafiğini kullanır. Problem grafiği yalnızca sorunun bir açıklamasıdır ve gerçek uygulamayı içermez. Sonuç olarak, grafiği kurarken hiçbir hesaplama yapılmaz. SPINS üzerindeki esnek tasarım parametreleri kullanıcıya rahat bir tasarım ortamı sunduğundan istenilen herhangi bir yapıyı tasarlamak için kullanılabilir. [26-28,34]

Elektro-optik modülatör ve benzer özelliğe sahip hassas optik iletim seviyesine sahip cihazların ihtiyaca göre nanofotonik seviyelerde tasarlanması gerekmektedir. SPINS kullanılarak sadece basit optik yönlendiriciler değil daha kompleks tasarımlar oluşturulabilmektedir. Oluşturulan bu tasarımlar, iletim seviyeleri olarak güçlü olmasıyla beraber kompaktlık ve güç tasarrufuyla sezgisel yöntemlere göre çok daha başarılı noktalara getirilebilmektedir. Bu tarz yeniliklerin gösterilmesi için, SPINS kullanılarak hazırlanan kod ile bir tasarım alanı hazırlanmış ve SPINS'e özel ayarlar



ile problem grafiği oluşturulmuştur. Tez çalışması kapsamında kompakt bir polarizasyon bağımsız dalgaboyu bölmeli çoğullama yapısı SPINS üzerinde tasarlanmıştır. Ardından simülasyon ve deney sonuçlarıyla yapının kabul edilebilir iletim seviyelerine sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, bir güç bölücü yapısı tasarlanmış olup simülasyon ortamında çok iyi iletim oranlarını yakaladığı gösterilmiştir. Bunun sonucu olarak da kompakt yapıların tersine tasarım yöntemleri kullanılarak geleneksel tasarım yöntemlerine göre, az hesaplama maliyetiyle ve düşük kayıplarla başarılı bir şekilde oluşturulabileceği gösterilmiştir.

### **3.2.1 Polarizasyon bağımsız dalgaboyu bölmeli çoğullama**

Optik çoklama, aynı iletişim bağlantısı üzerinden birden fazla sinyalin iletilmesini ve alınmasını sağlar. Bu işlem alıcı tarafında önceden hazırlanmış bir etiket ya da kod tanımlama ile anlamlandırılır. Modülasyona uğramış ışık ışınları bir optik çoklayıcı kullanılarak fibere aktarılır. Fiber çıkışında ise farklı dalga boylarını ayıran ve bunları farklı alıcılara yönlendiren optik çoğullama çözümü kullanılır. Bu tarz işlemler için sıklıkla kullanılan Wavelength Division Multiplexer'lar (WDM) farklı dalgaboylarına sahip ışık kaynaklarını ayırıştırmada kullanılırlar. Her bir dalga boyuyla ilişkili elektronik sinyal, genellikle elektronik olarak çoğaltılmış bir dizi başka sinyaldir ve bu durumda, alıcı ucunda elektronik çoğullama çözme gereklidir. [2,13]

Geleneksel optik ağlar, gerçek optik katman işlevselliği içermemekle birlikte, ses uygulamaları için verimli bant genişliği kullanımı için tasarlanmıştır. Günümüzde hizmet sağlayıcıları, kapasiteyi artırırken operasyonel maliyetleri düşürmekte ve gelirleri artırırken yeni nesil optik bileşenlere dayalı yeni, akıllı optik ağlar kurmaya çalışmaktadır. Bu bileşenler, yeni optik işlevsellik ve çok işlevli entegrasyon ile karakterize edilir. Böyle bir bileşen tamamen optik anahtardır. Optik anahtarlar, fiber optik iletişim sistemleri için vazgeçilmez bileşenlerdir. Bunlar, dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM), optik yol çapraz bağlantı sistemleri, optik ekleme-bırakma çoğullama sistemleri ve fotonik intermodül konektörleri, koruma anahtarlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda, birçok WDM sistemi literatürde tanıtılmıştır ve bu sistemler çeşitli türlerde dalga boyu bölmeli çoklayıcı kullanmışlardır. [16,30] Dalgaboyu bölmeli çoğullama tekniği (WDM) telekomda önemli bir yere sahip olan temel bir özelliktir. Bu özelliğe sahip yapılar üretebilmek için geniş bir kullanım alanına sahip SOI platformlarının uygun hız ve bant genişliğine

sahip olmaları için büyük çapta araştırmalar yapılmaktadır. Buradaki asıl hedef oluşturulacak WDM yapılarının aynı zamanda maliyet etkili ve telekom dalgaboylarında optik transparanlığa sahip yapılar şeklinde tasarlanmasıdır. [31] Bununla beraber, düzlemsel ışık dalgası devrelerinde polarizasyon bağımlılığını ortadan kaldırmak için de çeşitli yaklaşımlar bildirilmiştir: çift kırılmalı olmayan dalga kılavuzlarının veya silika alttaşlarının kullanılması. Ancak bu yöntemler genellikle ek kayıp veya karışmadan muzdariptir, standart toplu işleme uyumlu değildir veya tasarım kısıtlamaları getirir. Zamanla oluşan ihtiyaçtan dolayı, daha öncelerde polarizasyon bağımlılığını ortadan kaldırmak için girişimler (sıralı dalga kılavuzu ızgaraları, vb.) olmuştur, ancak bunlar bir merkez dalga boyu etrafındaki bir spektrum için iyi oluşturulmamıştır. Bunun dışında, dalga kılavuzu çekirdeğinin altında ince bir Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> film ile dalga kılavuzu çift kırılma kontrolü, iki farklı çift kırılmalı dalga kılavuzu ile polarizasyon bağımlılığı telafisi ve dalga kılavuzunun yüzeyinde biriken amorf silikon (a-Si) gerilim uygulama filmi lazerle kırparak dalga kılavuzu çift kırılma kontrolü gibi yöntemler de denenerek polarizasyona duyarız WDM'ler tasarlanmaya çalışılmış, ancak bu tasarımlar seri üretime uygun olmadıkları için başarılı olamamışlardır. Ayrıca üretilen cihazlar, geleneksel yöntemlerle tasarlandıklarından tersine tasarım teknikleriyle tasarlanana göre pek kompakt ve dolayısıyla maliyet etkin değildir. [29,32]

Modern optik iletişim mimarilerinin (fiber veya silikon fotonik kullanan) büyük bir avantajı, tek bir dalga kılavuzunun iletişim kapasitesini dalga boyu kanallarının sayısıyla çarpan dalga boyu çoğullamadır. Fotonik WDM'ler tipik olarak, fabrikasyon hatalarına duyarlı olan ve büyük bir ayak izi gerektiren dizili dalga kılavuzu ızgaraları veya halka rezonatör dizileri gibi yapılar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu noktada tersine tasarım, deneylerle doğrulanmış geniş bir işlem bant genişliği ile kompakt WDM cihazları sağlayabilir. [33]

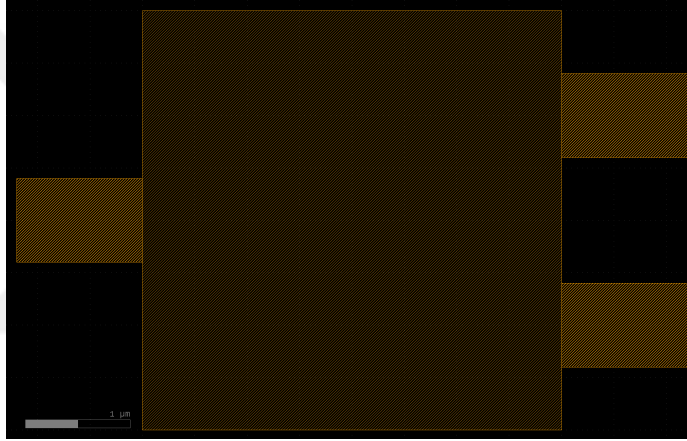
Fotonik tersine tasarım ile beraber, entegre fotonik tasarımında önemli gelişmeler ortaya çıkmıştır. Basit parametre taramalarından uzaklaşarak, rastgele topolojileri optimize etmek, artan cihaz verimliliklerine ve yeni işlevlere izin vermiştir. Başlangıçta tersine tasarım, fotonik kristalleri tasarlamak, yeni bant boşlukları kafesleri oluşturmak ve bant kenarlarını şekillendirmek için güçlü bir araç olarak kabul

edilmiştir. Son zamanlarda ise tersine tasarım, yeni teknolojileri tasarlamak için de kullanılan bir araç haline gelmiştir. [33]

Çalışmamızda, SPINS-b üzerinde çalıştırılan algoritma ile tersine tasarım optimizasyonu yoluyla polarizasyon bağımsız dalgaboyu bölmeli çoğullama yapısı elde edilmek istenmiştir. Hedeflenen dalgaboyları üst kanal için 1300nm ve alt kanal için 1550nm şeklindedir. SPINS-b optimizasyonu devamlı optimizasyonları sonunda ikilileştirilmiş çıktıyı sunmaktadır. Laboratuvar ortamında 3D yazıcı kullanılarak yapının üretilmesi ve deney yapılabilmesi için PLA materyali kullanılması hedeflenmiştir. Yapının tasarımı 2D olarak seçilmiştir. Yapı ile dış ortamın (hava) kırıcılık indisi, PLA materyalinin kırıcılık indisine uygun olması amacıyla, sırasıyla  $n=1.55$  ve  $n=1$  olarak sınırlanmıştır. Yapının tasarımı için yapı tasarım alanı ve dalga kılavuzlarının belirlenmesi için önplan ve arkaplan olmak üzere iki yapısal alan KLayout programı üzerinde belirlenmiştir ve Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Belirlenen bölgeler aşağıdaki gibidir. Yapıya ait dalga kılavuzu genişlikleri  $20a$  olarak seçilmiş olup giriş dalga kılavuzu  $4\mu m \times 4\mu m$  olan tasarım alanının tam ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Çıkış dalga kılavuzlarının merkezleri ise tasarım alanının tam ortasından  $1\mu m$  yukarıda ve aşağıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Hedeflenen iterasyon sayısı, yapılan optimizasyonun hedefe çok yaklaşmasıyla beraber zaman kaybı olmaması açısından düşük tutulmuştur. SPINS'in tasarımcısı Su, bu yaklaşımın doğruluğunu şu şekilde açıklamıştır: 100 iterasyonluk bir optimizasyon için optimizasyon çoğunlukla hedefe 30 iterasyon sayısı ile yakınsamış ve kalan 70 iterasyon sadece %5 oranında iyileşme sağlamıştır. Cihaz performansını tahmin edebilmek için genellikle 20-30 iterasyon yeterli olacaktır. 20-30 iterasyondan sonra istenen performans hedefleri karşılanmaktan çok uzaksa, muhtemelen daha geniş bir tasarım alanı düşünülmelidir. [34]

Bu sebeple optimizasyon iterasyon sayısı 100 olarak seçilmiş ve denemeler sonrasında hedeflenen verimliliklere ulaşıldığı görülmüştür. Sonradan yapılan optimizasyonlarda 1000 iterasyonlu çalışmalarda 100 iterasyondan sonra hedefe yaklaşımda çok düşük fark görüldüğünden 100 iterasyonlu çalışmalar tercih edilmiştir. Bu konfigürasyonla CPU üzerinde 2B optimizasyon ile 20dk gibi kısa sürede tamamlanması mümkün olmuştur. Optimizasyonlarda Intel Core i5 CPU ve 8GB RAM kullanılmıştır.

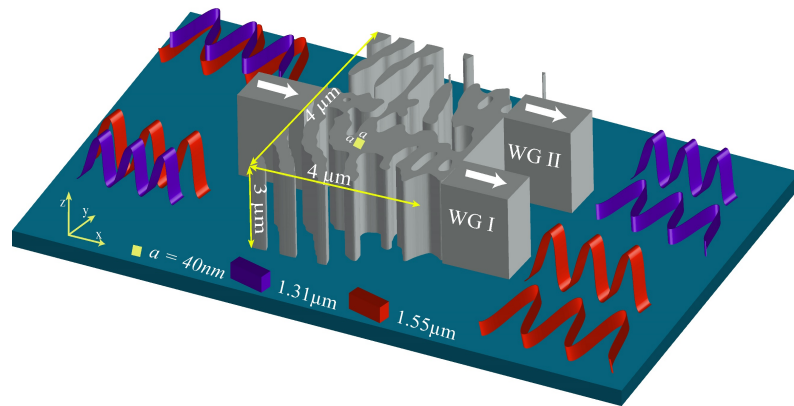
100 iterasyon için toplam 3 seviyeli sürekli optimizasyon yapılmıştır, her bir sürekli optimizasyon seviyesinin sonunda yapıyı dielektrik alan ayrıklığı (discreteness) yükseltmiştir. Algoritma, yapı tasarımı sonlandığında yapı içi alanı ve dış alanı ayırmak amacıyla ikilileştirmektedir. Bu işlem, şu ana kadar yapılan devamlı ve ayrık optimizasyonların sonunda elektriksel geçirgenlik olarak hedeflenen yapıyı elde edebilmek için yapının ayrık dönüşüme uğratılmasıdır (discrete transformation). Ayrık dönüşümle beraber, hedef fonksiyonu özelliklerine sahip yapı artık litografik yöntemlerle kolayca üretililecek homojen elektriksel geçirgenliğe sahip bir yapıdır. SPINS-b kütüphaneleri kullanılarak elde edilen optimizasyon çıktısı verimlere göre TE 1300-1550nm için sırasıyla yüzde 74-79 ve TM 1300-1550nm sırasıyla yüzde 85-78 şeklinde iletim verimliliği elde edilmiştir.



Şekil 3.4 : KLayout üzerinde tasarlanan tasarım alanı ve dalga kılavuzları şeması. Ortada bulunan kare alan önplana ait tasarım alanı olarak geçmektedir ve tasarlanmayacak olan alandan bağımsız olarak modellenmektedir. Görüldüğü üzere sarı rengin baskın olduğu alanlar arkaplana ait giriş ve çıkıştaki tasarım yapılmayacak olan dalga kılavuzlarıdır.

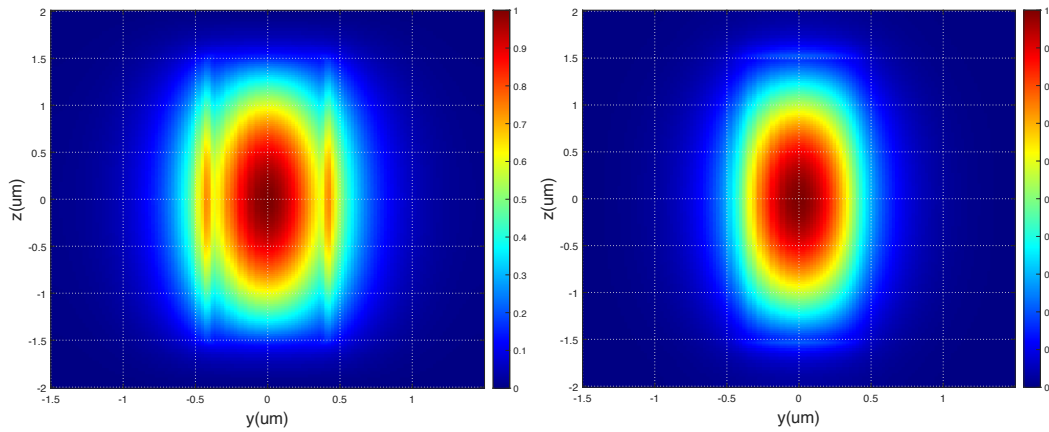
Nanofotonik cihazlar genellikle üstten aşağıya doğru litografi yöntemiyle üretilir, bu yüzden dielektrik sabiti dikey yönde aynı olmalıdır. [34] Bu şekilde, tasarlanan bir yapı 2 boyuttan 3 boyuta kalınlaştırılarak çıkarılabilir. Yapının en kompakt halde bulunması için iletim değerlerinin 3 boyutlu simülasyonda en yükseğe çıktığı en kısa ve üretilebilir boyutta olması şarttır. Fonksiyonel çalışmayı doğrulamak için, transverse electric (TE) ve transverse magnetic (TM) polarize ışık ile 2D ve 3D FDTD simülasyonları çalışılmıştır. Böylelikle, sayısal hesaplamalar sırasıyla yalnızca manyetik alan (Hz) ve elektrik alan (Ez) için yapılacak şekilde ayarlanmıştır. Tersine algoritma tarafından tasarlanan nihai yapıyı içeren GDS dosyası, Lumerical FDTD'ye

aktarılarak simülasyon ile iletim verimliliklerinin doğrulanması hedeflenmiştir. 2D model doğrulandıktan sonra 3D FDTD simülasyonları, planlanan deneyde bize daha iyi bir görüş sağlamıştır. Simülasyon çevresi, simülasyon alanındaki sınır koşullarını simülasyon alanının dışıyla tam olarak eşleştirmek için PML olarak ayarlanmıştır. Bu, deneyi böyle bir ortamda yürütmeyi beklediğimizden, simülasyonlarımız için deney ortamı sınırlarında geri saçılmanın olmadığı koşullar seçilmiştir.  $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$  kare olarak tasarlanan yapı alanı için 2D simülasyon ortamı oluşturulmuş ve merkezi  $(-x, -y)$ 'de  $(0,0)$  konumunda düzlem  $z = 0\mu\text{m}$ 'da alınmış bir dilim olarak yerleştirilmiştir. Giriş dalga kılavuzunun merkezine  $1.2\mu\text{m}$ - $1.6\mu\text{m}$  spektrum aralığıyla yerleştirilen mod kaynağı, tasarım alanının  $100\text{nm}$  önüne yerleştirilmiştir. İletim inceleme dedektörleri de iki çıkış dalga kılavuzunun merkezinde, tasarım alanından sadece  $100\text{nm}$  uzaklıkta olacak şekilde ayarlanmıştır. Monitörler, sırasıyla TE ve TM için  $1.2$ - $1.6\mu\text{m}$  spektral aralıktaki iletim yüzdelerini toplamak için kullanılmıştır. 3D FDTD için simülasyon kurulumu da, yapının  $3\mu\text{m}$ 'ye kalınlaştırılması ve simülasyon bölgesinin  $6\mu\text{m}$ 'a kalınlaştırılması dışında aynıdır. 2D yapı FDTD üzerinde  $3\mu\text{m}$  kalınlık verilerek simüle edilmiştir. Bu boyuttaki kalınlık, tasarımın iletim yüzdelerinde en yüksek verimliliği veren en kısa boyuttaki yapı şeklinde bulunmuştur. Yapıya ait tasarım, kalınlaştırılmış haliyle Şekil 3.5'te verilmiştir.  $40\text{nm}$  boyuta sahip özellik parçalarının (feature size) oluşturduğu optimizasyon yapısı, aynı zamanda ikilileştirilmiş bir elektriksel geçirgenliğe sahiptir. Optimizasyonda hedeflendiği gibi, kırıcılık indisleri FDTD üzerinde de yapı yine PLA materyaline uygun olması amacıyla  $n=1.55$ , dış ortam  $n=1$  olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.5 : SPINS'te optimize edilmiş polarizasyon bağımsız dalgaboyu bölmeli çoklama yapısına ait bir grafik. [35]

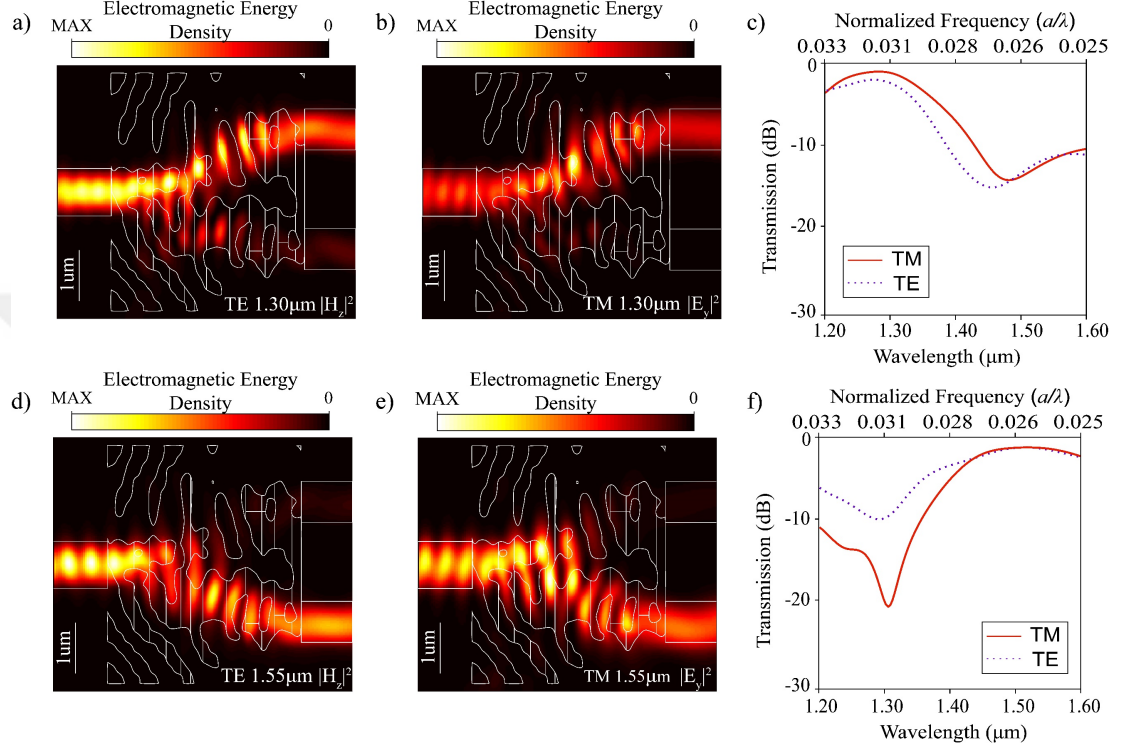
Şekil 3.6’da görüldüğü üzere yapı temel TE mod giriş kaynağı ile 1300nm dalgaboyu ile test edildiğinde beklendiği üzere üst kanal çıkışta mod görüntüsü oluşmaktadır. Yapı yine temel TE mod giriş kaynağı ile 1550nm dalgaboyu ile test edildiğinde beklendiği üzere alt kanal çıkışında mod görüntüsü oluşmuştur. Burada oluşan dalgaboyu bölmeli çoğullama elektrik ve manyetik alan grafiklerinden de net bir şekilde görülmektedir. Aynı durum TM mod giriş kaynağı ile yapılan spektrum taramasında da geçerlidir.



Şekil 3.6 : Yükseklik-genişliği 3um-0.8um olan giriş dalga kılavuzunda oluşan TE ve TM modlarının görüntüsü. Görüntüler dalga kılavuzu içinde başarıyla oluşmuşlardır.

Burada önemli olan nokta, oluşan dalgaboyu bölünmesinin hem TE hem de TM için düşük kayıpla net bir şekilde oluşturulabilmesidir. TE ve TM mod giriş kaynağı ile yapılan denemelerde FDTD üzerinde yapılan simülasyon ile Şekil 3.7’deki elektromanyetik enerji yoğunluğu grafikleri ve 1.2-1.6um arası iletim verimliliği grafikleri elde edilmiştir. Temel TE mod giriş kaynağı ile üst kanal istenildiği şekilde 1300nm dalgaboyunu ayırmış ve -1.8dB verim elde edilmiştir. Aynı şekilde, yine temel TE mod girişi ile 1550nm dalgaboyu beklenen şekilde alt kanala ayrılmış ve -1.65dB verim elde edilmiştir. Temel TM mod giriş kaynağı ile üst kanal başarıyla 1300nm dalgaboyunu ayırmış ve -0.99dB verim elde edilmiştir. Yine temel TM mod için alt kanalda ise ayrılan 1550nm için -1.48dB’lik bir verim elde edilmiştir. Üst kanala ait crosstalk değerleri TE mod için -7.90dB, TM mod için ise -8.83dB olarak ölçülmüştür. Alt kanala ait crosstalk değerleri ise TE mod için -9.35dB, TM mod için ise -19.54dB şeklindedir. Şekil 3.7’de, yapının zıt kollarındaki parazit alanları görülebilmektedir. Ayrıca, kılavuzlu iletim hatlarının çevresindeki alan için de kayıplar gözlenebilmektedir. 3D’deki FDTD simülasyonları daha az verimli sonuçlar

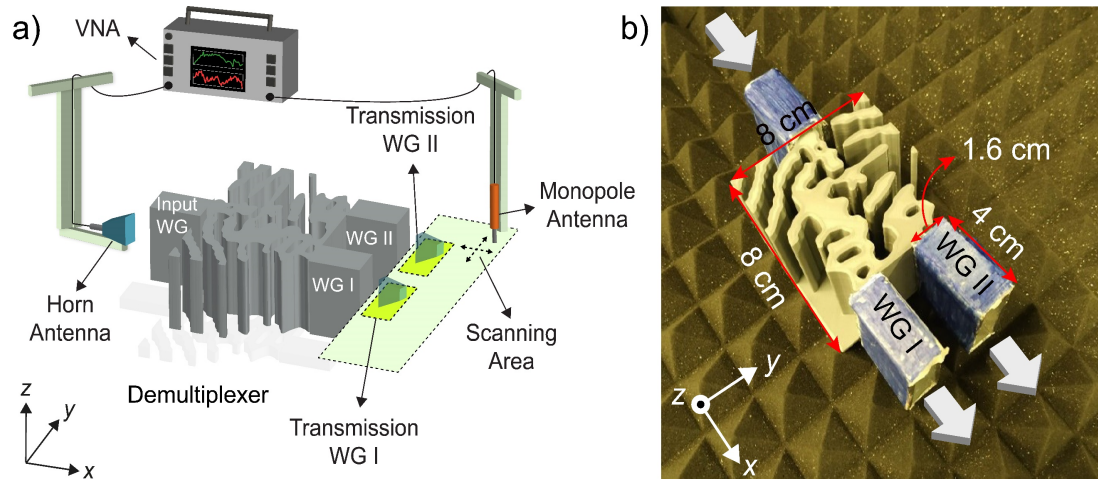
önermesine rağmen, 2D ve 3D simülasyonları, %0.02'lik iletim farkı ile çok yakın sonuçlar vermektedir. İletim eğrileri, 3D eğrilerde 2D eğrilere kıyasla biraz kaymıştır, ancak bu 2D analizin sonsuz uzunlukta yapı modellediğinden dolayıdır. Buradaki eğri kaymasının temel nedeni, 2D ve 3D yapıların kalınlığındaki farkın etkili indekslerde de hafif bir farkla sonuçlanmasıdır.



Şekil 3.7 : Elektromanyetik enerji yoğunluğuna ait grafikler ve üst-alt kanallara ait dB cinsinden iletim grafikleri. Oluşan grafikler Lumerical FDTD üzerinde yapılan simülasyonlar sonucu elde edilmiştir. [35]

Tasarımın 9-12 GHz frekans aralıkları arasındaki çalışma prensibini göstermek için mikrodalga deneyleri yapılmıştır. Kafes sabiti, 1.31 μm ve 1.55 μm işlem dalga boylarının sırasıyla 11.5 GHz ve 10 GHz olarak ölçeklendiği durumda  $a = 0.8$  mm'ye ayarlanmıştır. Tasarlanan WDM yapısı, filament olarak "ESUN PLA + Silver" ve PLA malzemesini kullanan "Creality Ender 3 Pro" 3D yazıcı ile üretilmiştir. PLA, düşük maliyetli, biyolojik olarak parçalanabilen ve amaçlanan mikrodalga rejiminde düşük kırılma indisine ( $n_{PLA} = 1.55$ ) sahip tamamen dielektrik bir malzemedir. Ayrıca yapının iç kısımlarında da hava boşluğu oluşmaması için PLA ile doldurulmuştur, böylece yapının kırılma indisi dağılımı veya homojenliği iyi korunmuştur.

Şekil 3.8(a)'da, yapının dalga boyu bölme performansı ve iletim verimliliklerini ölçmek için hazırlanan deney düzeneğinin şematik gösterimi bulunmaktadır. Agilent E5071C ENA Vektör Ağ Analizcisi (VNA) kullanılarak Gauss profilli elektromanyetik dalgaları iletmek ve almak için hem boynuz hem de tek kutuplu antenler kullanılmıştır. Deneylede xy-düzlemi (tarama alanı), hem TM hem de TE polarizasyonları için kullanılan boynuz ve tek kutuplu antenlerin yönleri değiştirilerek elektrik (TM) ve manyetik (TE) alan yoğunluğu dağılımlarını elde etmek için tarama yapılır. Ek olarak, her polarizasyon için çıkış dalga kılavuzlarının sonundaki iletim değerlerini ölçmek amacıyla verici antenle özdeş olan başka bir huni anten kullanılır. 3D yazıcı ile hazırlanmış WDM'in ve elle hazırlanan dalga kılavuzlarının fiziksel boyutları ile fotoğraf olarak gösterimi Şekil 3.8(b)'de sunulmuştur. 3D yazıcının üretebileceği seviyelere ölçeklendirilmesinden sonra üretilen yapının genişliği ve uzunluğu 8cm, kalınlığı ise 6 cm olmuştur. Ayrıca, mikrodalga rejimindeki ışığı birleştirmek için içi boş dikdörtgen kartonlar kullanılarak giriş ve çıkış dalga kılavuzları oluşturulmuştur. Bu kartonları kullanırken iç tarafın alüminyum folyo kaplanması yoluyla karton içi istenmeyen yansımaların giderilmesi sağlanmış ve absorpsiyon kayıpları büyük miktarda ortadan kaldırılmıştır. Tüm dalga kılavuzları neredeyse aynıdır ve x-, y- ve z- yönleri için sırasıyla 4 cm, 1,6 cm ve 6 cm'lik eşit uzamsal boyutlara sahiptir.

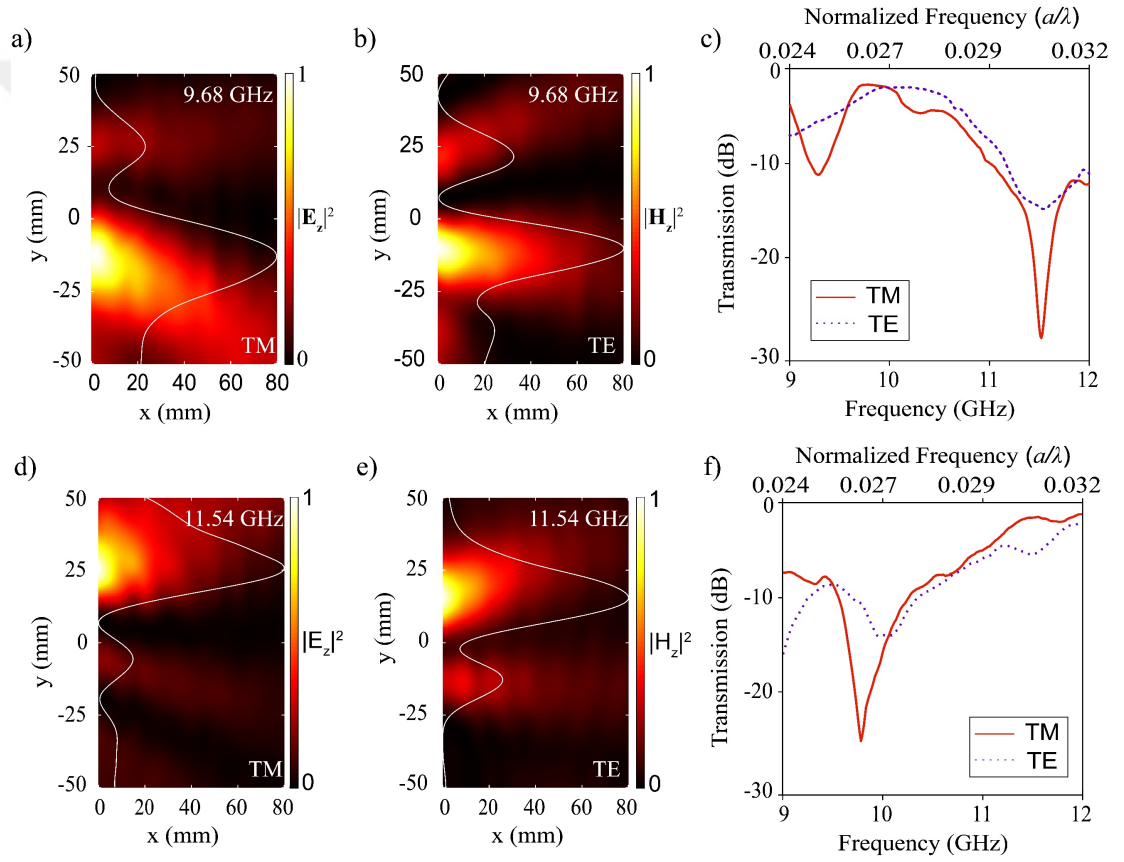


Şekil 3.8 : (a) Elektrik ve manyetik alan yoğunluğu dağılımlarını (tarama alanı) taramak ve çıkış dalga kılavuzlarının (sarı alanlar) sonunda normalleştirilmiş iletimi hesaplamak için hazırlanan deney düzeneğinin şematik görünümü. (b) Yapının fotoğraflık görünümü ve yapısal parametreleriyle birlikte dalga kılavuzları [35]

Alan yoğunluğu ölçümleri için, tek kutuplu anten, hem x hem de y eksenleri boyunca 2 mm'lik adımlarla hareket ettirilmiş ve ardından kesin ve pürüzsüz sonuçlar elde etmek için enterpolasyon yapılmıştır. Simülasyonlardaki sayısal ölçümler gibi, z



ekseni seviyesi yapının tam ortasına ayarlanmıştır. Şekil 3.9(a) ve (b), sırasıyla TM ve TE polarizasyonları için 9.68 GHz'deki alan yoğunluğu dağılımlarını göstermektedir. Boylamasına normalleştirilmiş enine kesit profilleri, çıktı dalga kılavuzlarının sonundaki yoğunluk farklılıklarını açıkça göstermek için üst üste yerleştirilmiştir. Benzer şekilde, 11.54 GHz'de TM ve TE polarizasyonları için normalize kesit profilleri ile birlikte elektrik ve manyetik alan yoğunluğu dağılımları Şekil 3.9(d) ve (e)'de verilmiştir. Tüm alan dağılımları, çıkış dalga kılavuzlarının sonunda hem 9,68 GHz hem de 11,54 GHz frekanslarının ayrımını açıkça göstermektedir. Çıkış dalgaları, dalga kılavuzlarının kusurlu yerleşimi ve alüminyum folyo kaplama kusurları nedeniyle hizasızdır.



Şekil 3.9 : (a) Elektrik alan, (b) manyetik alan yoğunlukları ve (c) 9.68 GHz'de alt portun (WG I) TM ve TE polarizasyonlarının iletimi. (d) Elektrik alan yoğunlukları ve (e) manyetik alan yoğunlukları ve (f) 11.54 GHz'de üst portun (WG II) TM ve TE polarizasyonlarının iletimi. Beyaz çizgiler, boylamasına normalleştirilmiş enine kesit profillerini göstermektedir. [35]

Yapının iletim spektrumlarını 9 ile 12 GHz arasında elde etmek için iki özdeş huni anten kullanılır. Huni antenlerden biri, önceki deneylerde mikrodalgayı enjekte etmek için kullanılırken diğeri, tüm frekanslar için WG I çıkışı ve WG II çıkışının sonundaki iletim değerlerini ölçmek için kullanılır. Hem çıkış dalga kılavuzları hem de

polarizasyonlar için boş alan iletim değerleri de verileri normalleştirmek için ölçülür. Şekil 3.9(c) ve (f), sırasıyla hem TM hem de TE polarizasyonlarına ait çıkış WG I ve çıkış WG II için normalleştirilmiş iletimi gösterir. WG I için, TM ve TE polarizasyonları için iletimler 9.68 GHz'de sırasıyla -2.23 ve -2.18 dB'dir. TM polarizasyon için crosstalk -12.77 dB olarak ölçülürken, 11.54 GHz'de TE polarizasyon için -12.80 dB olarak ortaya çıkmıştır. WG I'in aksine, WG II'nin sonunda ölçülen iletim değerleri, kesin frekanslardan yaklaşık 0,36 GHz biraz kaymaktadır. Her iki polarizasyonun iletimlerinde 10.1 GHz'in üzerinde bir artış olmasına ve 12 GHz'de zirveye ulaşmasına rağmen, iletim değerleri TM ve TE polarizasyonları için sırasıyla 11.9 GHz'de -2.19 ve -2.42 dB'dir. Ayrıca crosstalk değerleri, TM polarizasyonu için -16.16 dB ve TE polarizasyonu için -11.45 dB olarak hesaplanmıştır. Genel olarak, iletim grafiklerinin eğilimleri yapının işlevselliğini göstermektedir.

### 3.2.2 Güç bölücü

Basit Y-eklem bölücünün önemli bir bileşen olduğu tezin önceki kısımlarında da açıklanmıştır. Elektro-optik modülatörlerin temelini oluşturan Y-eklem yapılarının hassasiyet ve boyut kısıtlamaları birçok uygulamada önemli yer edinmektedir. Yapının fiziksel boyutu ile doğru orantılı olarak değişen güç kaybı, tasarımlarda üzerine çalışılması gereken ilk parametrelerdendir. [37]

Y-eklem bölücü ile tasarlanabilen güç bölücülerinin tasarımında önemli hususlar şunlardır:

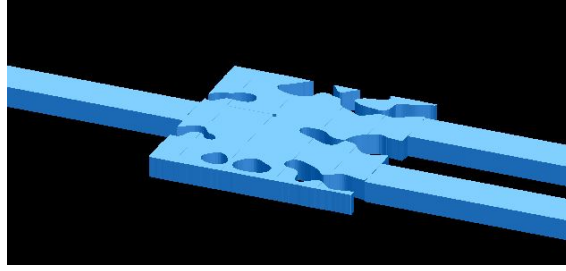
1. Giriş gücünün belirtilen oranlara doğru şekilde bölünmesi,
2. Bölücüde minimum ışık gücü kaybı,
3. Minimum kuplör kaybıyla harici bir fiber optik devreye kolay bağlantı. [7]

1x2 güç ayırıcılar, fotonik sistemlerde sıklıkla kullanılan ve düz bir dalga kılavuzundan giren ışığı gücü iki çıkış dalga kılavuzu arasında eşit olarak bölmeye yarayan simetrik bir optik elemandır. Bir güç ayırıcının en basit versiyonu, yukarıda da bahsedildiği gibi tasarımı kolay olan ve imalat toleranslarına nispeten duyarsız olan

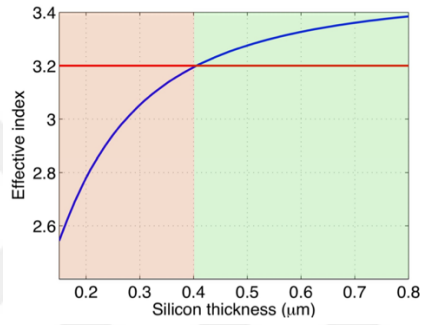
Y-eklem yapıdır. Yine de, güç kayıplarını önlemek için iki kolun eğrilik yarıçapları ve bağlantı noktaları dikkatlice tasarlanmalıdır. Ayrıca, iki dal eğimli düz dalga kılavuzlarıyla ayrılırsa, eğim açısı küçük, tipik olarak birkaç derece olmalıdır. Güç ayırıcının farklı bir versiyonu, çok modlu girişim ögesidir (MMI). Bu isim, güç dağılımının gerçekleştiği geniş dalga kılavuzu bölgesinin çok modlu karakterinden gelir. Bu tasarımın avantajı, MMI'nin Y-eklem yapıya kıyasla daha kısa olmasıdır. MMI'nin boyutları kritik olmamasına ve geniş toleranslara izin vermesine rağmen, bu eleman belirli bir dalga boyu için tasarlanmalıdır. Açıklanan iki güç ayırıcı simetriktir ve bu nedenle giriş gücünün %50'si her bir çıkış dalga kılavuzu tarafından taşınır. Bununla birlikte, asimetrik ayırıcılar özel amaçlar için de tasarlanabilir. Ek olarak, ayırıcıları N çıkış dalga kılavuzu ile imal etmek mümkündür ve bu durumda eleman  $1 \times N$  ayırıcı olarak adlandırılır. [2] Tersine tasarım algoritmasının, sezgisel yöntemlere göre sağladığı kolaylıkla beraber tasarım alanı üzerinde ayrıntılı çalışma yapmadan başarılı sonuçlar alınabilir. Bunun için yapılması gereken sadece kompleks olmayan bir tasarım alanı belirlenmesi ve hedeflerin doğru belirlenmesidir.

SPINS ile tasarlanan kompakt bir güç bölücü tasarımı Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Yapı  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$  tasarım alanına sahiptir. Optimizasyon için 200 iterasyon kullanılmıştır ve bu iterasyon sayısının düşük seviyelerde kullanılma sebebi bir önceki kısımda anlatılmıştır. Tasarım 1550nm temel mod ışık ile hazırlanmıştır. Giriş ışık kaynağının yarı yarıya olacak şekilde iki dalga kılavuzuna dağılması hedeflenmiştir. Ayrıca, 400nm kalınlığa sahip olacak şekilde silikon temelli tasarlanmış olup, bu tasarımda kullanılan kırıcılık indisi  $n=3.2$  olarak seçilmiştir. Bunun sebebi, silikon temelli dalga kılavuzlarında kırıcılık indisinin silikon kalınlığına bağlı olarak değişmesidir ve Şekil 3.11'de bu dalgaboyuna göre değişim görülebilmektedir. Tasarlanan yapının simülasyon ortamı Lumerical FDTD'de oluşturulmuştur. Hazırlanan yapıya giriş kaynağı olarak temel mod verilmiş ve çıkışa ait iki dalga kılavuzuna dedektörler yerleştirilmiştir. Yapıya simülasyon ortamında 400nm kalınlık verilerek 3D bir yapıya dönmesi sağlanmıştır. Bu da yine olabilecek ne kısa boyutta elde edilen en yüksek iletim verimiyle olmuştur. Elde edilen iletim verimliliği 1.2-1.6 $\mu\text{m}$  frekans aralığında Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere iletim verimliliği dağılımı üst kanalda %42 ve alt kanalda %46 olarak gözlenmektedir. Bu

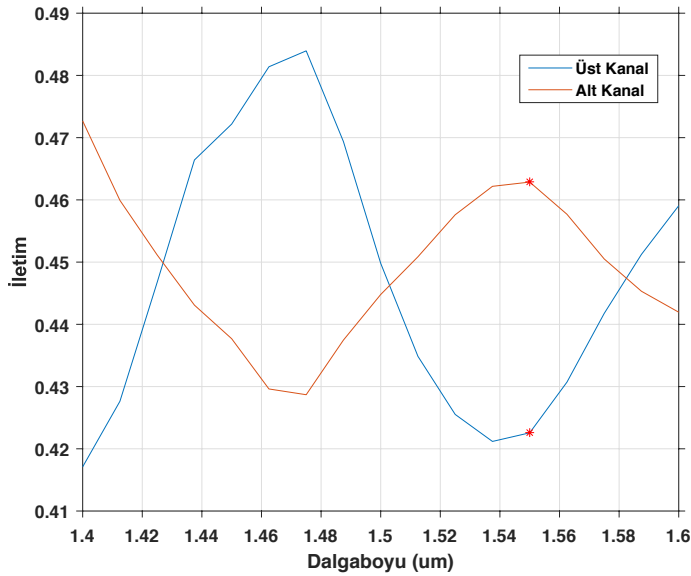
seviyelerde elde edilen sonuçlar, yapılan tasarımın başarılı olduğunu da göstermektedir.



Şekil 3.10 : SPINS'in optimizasyon çıktısının Lumerical FDTD'de kalınlaştırılmış hali gösterilmektedir.

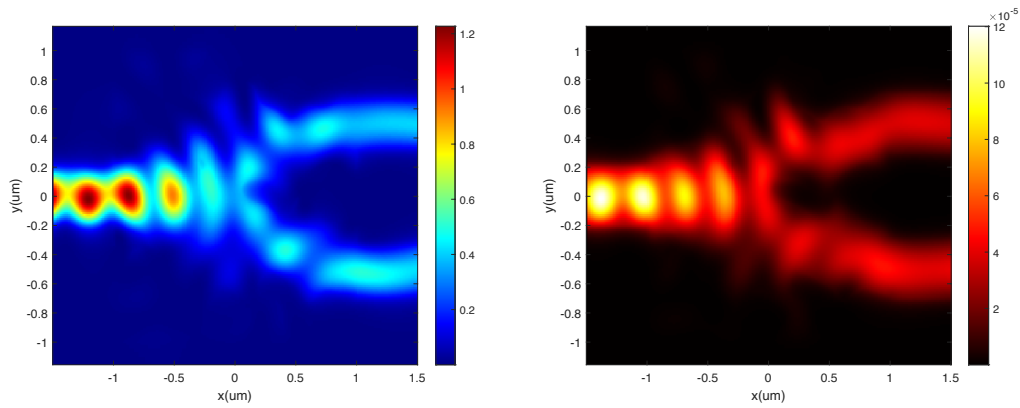


Şekil 3.11 : Silikonun dalga kılavuzu yüksekliğine göre etkili dalgaboyu değişimi grafiği. Bu grafiğe göre, kalınlığı 400nm olarak seçilen optimizasyon sonucunda yapı için  $n=3.2$  kırıcılık indisi seçilmiştir. [36]



Şekil 3.12 : Dalgaboyuna göre güç bölümü değişim grafiği.  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$  alana ve 400nm kalınlığa sahip yapıda bir güç bölücü ile 200 iterasyonlu bir optimizasyon sonucunda 1.55µm dalgaboyunda, iletim seviyelerinde 0.42-0.46 civarında bölünme görülebilmektedir.

Şekil 3.13'de ise güç dağıtıcı yapıya ait elektromanyetik enerji yoğunluğu grafiği bulunmaktadır. Görüldüğü üzere, oluşan kayıpların düşük sayılabilecek seviyede olmasıyla alan görüntüsünde kayıplar az görülmektedir. Bununla beraber cihaz mikron seviyelerinde, kompakt olarak tasarlanabilmiştir. Bu şekilde yapı hem düşük maliyetli olacak, hem az alan kaplayacak, hem de az güç tüketecektir. İletim verimliliğinin istenilen dalgaboyunda yüksek olmasıyla piyasada kullanılabilir bir yapı olmaktadır. Optik devrelerde yetersiz alan sorunu yaşanması gibi durumlarda maliyeti düşük ve muadilleriyle verimlilik konusunda benzer özelliklere sahip olan bu yapı kullanılabilir.



Şekil 3.13 : SPINS tasarımı 2 $\mu\text{m}$  x 2 $\mu\text{m}$  boyutundaki güç bölücü ile elde edilen elektromanyetik enerji yoğunluğu grafikleri. Solda elektrik alan, sağda ise manyetik alan dağılımları görülebilmektedir. Kayıpların düşük ve belirgin bir yönlendirme olması dikkat çekmektedir.



#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmanın ikinci kısmında, sezgisel yöntemle hazırlanan yapıların başarımları kriterleri anlatılmıştır. Elektro-optik modülatörlerin çalışma prensipleri ve performans kriterleri Lumerical FDTD ve Interconnect üzerinde gösterilmiştir. Popüler bir elektro-optik uygulaması olan Mach-Zehnder Modülatörler bu amaçla parça bazlı olarak incelenmiştir. Bu tasarımların, herhangi bir elektro-optik modülatörün bir devreyle entegrasyonunda Lumerical Interconnect'in kullanılabileceği gösterilmiştir. Lumerical FDTD ile optik başarımları kriterlerine uygun yapı Lumerical Interconnect'e aktarılabilir ve burada optik devre simülasyonları çalıştırılabilir. Burada önemli olan nokta, hazırlanan tasarımların parametre havuzunun sonlu olması ve kısıtlı parametreyle çalışılan simülasyonların bile uzun zaman almasıdır. Aynı veya benzer kazanca sahip yapıların sezgisel yollarla ulaşılamayacak seviyede çok daha kompakt tasarlanması mümkün mümkündür. Özellikle, elektro-optik modülatörlerin önemli kriterlerinden aktivasyon gerilimi, modülatör üzerindeki yüzey alanının azalmasıyla azalabilecektir. Bu şekilde güç tüketimi de azaltılmış olacak ve yapı, maliyet olarak da daha uygun seviyelere gelebilecektir.

Geleneksel yöntemlerin ulaşamadığı boyut ve güç optimizasyonu ancak topoloji değiştirilerek olabilmektedir. Bu noktada elektriksel geçirgenlik dağılımı serbest bırakılmadığı müddetçe çok daha geniş bir parametre uzayı taranamamaktadır. Böyle bir tasarım yapıldığı durumda, sınırlama olmamakta ve yapılar deneme-yanılma yöntemlerine göre çok daha başarılı çözülebilmektedir. Bunun için kullanılan tersine tasarım algoritmaları vardır ve çalışmanın üçüncü kısmında SPINS adı verilen tersine tasarım altyapısının yapıları istenilen performans kriterlerine uygun tasarlayabildiği gösterilmiştir. SPINS sadece basit Y-eklem yapıları değil, özellikleri çeşitlendirilmiş yapıları da kompakt ve başarılı performans kriterlerine sahip olacak şekilde tasarlayabilmektedir. SPINS'in sahip olduğu tasarım çeşitliliği genişliği ile günümüzde tasarlanmak istenen birçok nanofotonik yapı sadece başarımları kriterleri girilerek geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha küçük boyutlarda ve düşük güç harcayacak şekilde tasarlanabilir.

İleride yapılacak çalışmalarda SPINS altyapısı kullanılarak Mach-Zehnder Modölatöleri gibi elektro-optik işleme sahip cihazların nanofotonik seviyelerde literatürde bulunan benzerlerine göre daha küçük ve başarılı seviyelerde tasarım yapılması mümkün olacaktır. Tez çalışmasında kullanılan yöntemlerin dışında, SPINS direkt 3 boyutlu tasarım altyapısı kullanılarak daha kısa kalınlıklarda yeni tasarımlar oluşturulabilir. Bu tasarımlar birden çok materyalle oluşturulabilir ve ucuz, kompakt ve düşük güç tüketimine sahip olacak şekilde MMI, MZI, yönlü kuplör ve ızgara kuplör gibi yapılar tasarlanabilir.





## KAYNAKLAR

- [1] Pollock, C. R., Lipson, M. (2003). *Integrated Photonics*. Kluwer Academic.
- [2] Lifante, G. (2003). *Integrated Photonics: Fundamentals*. John Wiley & Sons.
- [3] Lefèvre, H. C. (2014). *The Fiber-Optic Gyroscope*. Artech House.
- [4] Iizuka, K. (2002). *Elements of Photonics, in Free Space and Special Media* (Vol. 1). Wiley Interscience Imprint.
- [5] Sapra, N. V., Vercruyssen, D., Su, L., Yang, K. Y., Skarda, J., Piggott, A. Y., & Vučković, J. (2019). Inverse Design and Demonstration of Broadband Grating Couplers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(3), 1–7. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2019.2891402>
- [6] Sapra, N. V., Yang, K. Y., Vercruyssen, D. J. F., Su, L., & Vučković, J. (2019). Waveguide-integrated dielectric laser particle accelerators through the inverse design of photonics. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. [https://doi.org/10.1364/cleo\\_si.2019.sm3j.2](https://doi.org/10.1364/cleo_si.2019.sm3j.2)
- [7] Iizuka, K. (2002). *Elements of Photonics, For Fiber and Integrated Optics* (Vol. 2). Wiley-Interscience.
- [8] Pathak, S. (2019). Photonics Integrated Circuits. *Nanoelectronics*, 219–270. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813353-8.00008-7>
- [9] Lal, S., Link, S., & Halas, N. J. (2007). Nano-optics from sensing to waveguiding. *Nature Photonics*, 1(11), 641–648. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.223>
- [10] Piggott, A. Y., Lu, J., Lagoudakis, K. G., Petykiewicz, J., Babinec, T. M., & Vučković, J. (2016). Inverse Design of a Wavelength Demultiplexer. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. [https://doi.org/10.1364/cleo\\_si.2016.sm1f.4](https://doi.org/10.1364/cleo_si.2016.sm1f.4)
- [11] Seeds, A. J., & Williams, K. J. (2006, December 1). *Microwave Photonics*. Journal of Lightwave Technology. <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-24-12-4628>.
- [12] Capmany, J., & Novak, D. (2007). Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photonics*, 1(6), 319–330. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.89>
- [13] Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2009). *Fundamentals of Photonics*. Wiley-Interscience.
- [14] Quimby, R. S. (2006). *Photonics and Lasers: An Introduction*. Wiley-Interscience.

- [15] **Datta, S., Es, S.** (2020). Design of an Optical Full Adder based on Electro-Optic effect in Mach-Zehnder Interferometers. *2020 National Conference on Emerging Trends on Sustainable Technology and Engineering Applications (NCETSTEA)*. <https://doi.org/10.1109/ncetstea48365.2020.9119941>
- [16] **Jain, K., Mehra, R., & Dixit, H.** (2012). Optimization of 2x2 Mach-Zehnder Interferometer Electro-Optic Switch. *2012 Third International Conference on Computer and Communication Technology*. <https://doi.org/10.1109/icct.2012.41>
- [17] **Kumar, A., & Raghuwanshi, S. K.** (2014). Implementation of optical gray code converter and even parity checker using the electro-optic effect in the Mach-Zehnder interferometer. *Optical and Quantum Electronics*, 47(7), 2117–2140. <https://doi.org/10.1007/s11082-014-0087-9>
- [18] **Mandke, Y., Sivasubramanian, A., & Henry, R.** (2019). Design, Fabrication and characterisation of TE Mode MZI Device for Silicon Photonics Integrated Circuit. *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. <https://doi.org/10.1109/i2ct45611.2019.9033937>
- [19] **Mcpolin, C. P. T., Bouillard, J.-S., Vilain, S., Krasavin, A. V., Dickson, W., O'Connor, D., ... Zayats, A. V.** (2016). Integrated plasmonic circuitry on a vertical-cavity surface-emitting semiconductor laser platform. *Nature Communications*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms12409>
- [20] **Amin, R., Maiti, R., Carfano, C., Ma, Z., Tahersima, M. H., Lilach, Y., ... Sorger, V. J.** (2018). 0.52 V mm ITO-based Mach-Zehnder modulator in silicon photonics. *APL Photonics*, 3(12), 126104. <https://doi.org/10.1063/1.5052635>
- [21] **Ahadi, M., Ghorbani, A., & Moradi, G.** (2008). Near zone to far zone transformation with mixed finite-difference time-domain and frequency-domain. *2008 IEEE International RF and Microwave Conference*. <https://doi.org/10.1109/rfm.2008.4897417>
- [22] **Ramaswami, R., Sivarajan, K. N., & Sasaki, G. H.** (2010). *Optical Networks: A Practical Perspective*. Elsevier.
- [23] **Pan, T., Qiu, C., Wu, J., Jiang, X., Yang, Y., Zhou, H., ... Su, Y.** (2015). Compact high-speed electro-optic modulator based on a silicon photonic-crystal nanobeam cavity with gated graphene. *2015 IEEE 12th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*. <https://doi.org/10.1109/group4.2015.7305951>
- [24] **Penninckx, D., & Delansay, P.** (1997). Comparison of the propagation performance over standard dispersive fiber between InP-based  $\pi$ -phase-shifted and symmetrical Mach-Zehnder modulators. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9(9), 1250–1252. <https://doi.org/10.1109/68.618494>

- [25] **Hakansson, A., Sanchez-Deh, J., & Sanchis, L.** (2005). Inverse design of photonic crystal devices. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(7), 1365–1371. <https://doi.org/10.1109/jsac.2005.851190>
- [26] **Molesky, S., Lin, Z., Piggott, A. Y., Jin, W., Vucković, J., & Rodriguez, A. W.** (2018). Inverse design in nanophotonics. *Nature Photonics*, 12(11), 659–670. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0246-9>
- [27] **Piggott, A. Y., Lu, J., Lagoudakis, K. G., Petykiewicz, J., Babinec, T. M., & Vuckovic, J.** (2015). Inverse design and implementation of nanophotonic devices. *2015 IEEE Photonics Conference (IPC)*. <https://doi.org/10.1109/ipcon.2015.7323736>
- [28] **Vercruyse, D., Sapra, N. V., Su, L., & Vuckovic, J.** (2020). Dispersion Engineering With Photonic Inverse Design. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 26(2), 1–6. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2019.2950803>
- [29] **Icli, A.B., Tutgun, M., Kurt, H.** (2020). Hedef Öncelikli Tersine Algoritma ile Optik Güç Bölücü ve İnterferometre Tasarımları. Sözlü Olarak Sunuldu. 28. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (SİU2020).
- [30] **Inoue, Y., Takahashi, H., Ando, S., Sawada, T., Himeno, A., & Kawachi, M.** (1997). Elimination of polarization sensitivity in silica-based wavelength division multiplexer using a polyimide half waveplate. *Journal of Lightwave Technology*, 15(10), 1947–1957. <https://doi.org/10.1109/50.633599>
- [31] **Tan, D. T. H., Ikeda, K., Zamek, S., Mizrahi, A., Nezhad, M., & Fainman, Y.** (2010). Wavelength selective coupler on silicon for applications in wavelength division multiplexing. *IEEE Photonics Society Summer Topicals 2010*. <https://doi.org/10.1109/phosst.2010.5553685>
- [32] **Nadler, C., Lanker, M., Wildermuth, E., Hunziker, W., & Melchior, H.** (2002). Polarisation insensitive wavelength multiplexers using stress release grooves. *24th European Conference on Optical Communication. ECOC '98 (IEEE Cat. No.98TH8398)*. <https://doi.org/10.1109/ecoc.1998.732468>
- [33] **Skarda, J., Su, L., Yang, K. Y., Vercruyse, D., Sapra, N. V., & Vuckovic, J.** (2019). From Inverse Design to Implementation of Practical Photonics. *2019 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*. <https://doi.org/10.1109/iccad45719.2019.8942167>
- [34] **Su, L., Vercruyse, D., Skarda, J., Sapra, N. V., Petykiewicz, J. A., & Vučković, J.** (2020). Nanophotonic inverse design with SPINS: Software architecture and practical considerations. *Applied Physics Reviews*, 7(1), 011407. <https://doi.org/10.1063/1.5131263>

- [35] **Icli, A.B., Alpkilic, A.M., Yilmaz, Y.A., Yildirim, B.K., Turduev, M., Kurt, H.** (2020). Numerical and Experimental Demonstration of Inverse Designed Low-Index Polarization-Insensitive Wavelength Demultiplexer. (Manuscript in Preparation)
- [36] **Dong, P., Hu, T.-C., Liow, T.-Y., Chen, Y.-K., Xie, C., Luo, X., ... Tate, A.** (2014). Novel integration technique for silicon/III-V hybrid laser. *Optics Express*, 22(22), 26854. <https://doi.org/10.1364/oe.22.026854>
- [37] **Li, M., Ling, J., He, Y. et al.** (2020) Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator. *Nat Commun* 11, 4123. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17950-7>



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Abdullah Bera İçli  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 11.06.1993  
**E-posta** : iclibera@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2020, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2017-2020	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniv.	Burslu YLisans Öğr.
2017	Roketsan Roket ve Sanayii Ticaret A.Ş.	Elektronik Müh.
2016	Mikrosens Elektronik San. ve Tic. A.Ş.	Elektronik Müh.

### YABANCI DİL: İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Icli, A.B.**, Tutgun, M., Kurt, H. (2020). Hedef Öncelikli Tersine Algoritma ile Optik Güç Bölücü ve İnterferometre Tasarımları. Sözlü Olarak Sunuldu. 28. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (SİU2020).
- **Icli, A.B.**, Alpkilic, A.M., Yilmaz, Y.A., Yildirim, B.K., Turduev, M., Kurt, H. (2020). Numerical and Experimental Demonstration of Inverse Designed Low-Index Polarization-Insensitive Wavelength Demultiplexer. (Manuscript in Preparation)