

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PASİF OPTİK CİHAZLARDAN, DALGABOYU ÇOĞULLAYICI, OPTİK MOD
ÇOĞULLAYICI/TEKİLLEYİCİ VE OPTİKSEL GÜÇ BÖLÜCÜ CİHAZLARININ
HEDEF ÖNCELİKLİ ALGORİTMA İLE TERSİNE TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Mesut ALPKILIÇ

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.

Ahmet Mesut Alpkılıç

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PASİF OPTİK CİHAZLARDAN, DALGABOYU ÇOĞULLAYICI/TEKİLLEYİCİ,
OPTİK MOD ÇOĞULLAYICI VE OPTİKSEL GÜÇ BÖLÜCÜ CİHAZLARININ
HEDEF ÖNCELİKLİ ALGORİTMA İLE TERSİNE TASARIMI VE ANALİZİ

Ahmet Mesut Alpkılıç

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

Danışman: Prof. Dr. Hamza Kurt

Tarih: Kasım 2020

Tümleşik fotonik cihazlar, optik ara bağlantılar ve sensörlerden, medikal görüntüleme sistemlerine ve hatta kuantum mekaniği barındıran teknolojilere kadar çok çeşitli uygulamalarda teknolojinin gelişmesi ile gün geçtikçe daha da fazla kilit rol oynamaktadır. Işığın istenilen tayfsal bölgede doğru bir şekilde sezilmesi doğru ve kayıpsız iletimi, yüksek verimlilik ve dayanıklılık günümüz teknolojisinde aranan özellikler olmuştur. Bununla birlikte üretim teknolojileri ve artan malzeme bilgisi ışığında minyatürleşmeye giden teknolojik cihazlarda bu özelliklerin korunması hedeflenmiştir. Ancak, bu optik-fotonik fotonik cihaz tasarım yöntemleri, ne yazık ki dijital elektronik ve havacılık teknolojileri gibi diğer alanların çok gerisinde kalmıştır. Bunun sebeplerinden en önemlisi optimizasyon, bilgisayar gücü ve üretim tekniklerinin son on yılda ancak gelişmesi ve bu cihazlar için kullanılmayı amaçlanması gösterilebilir.

Fotonik cihazlar, analitik teoriler ve manuel parametre taramalarının bir kombinasyonu kullanılarak büyük ölçüde elle tasarlanmış ve sonuç olarak yalnızca spesifik parametreler değiştirilerek kısıtlı kütüphaneler oluşturulmuş ve böylece tasarımlar mevcut gerçeklikler üzerinden yapılmıştır. Bunun sonucu olarak ise birkaç on mikrometreden yüzlerce mikrometreleri bulan cihazlar tasarlanmak zorunda kalmış ve bu da günümüz ihtiyaçlarına cevap veremez hale gelmiştir. Tersine tasarım ise günümüzde ihtiyaç haline gelen yüksek performans, düşük güç tüketimi ve boyut hedefine karşılık verecek bir yaklaşım metodudur.

Bu tezde, pasif optik-fotonik cihazların tasarımını yukarıda bahsedilen sınırlı tasarım parametresinden kurtararak sayısız değişkenleri barındıran ve tasarımcıya daha önce görülmemiş bir tasarım alanı vadeden tersine tasarım yöntemlerinden biri olan hedef öncelikli algoritma ile yapılmış çalışmalarımız anlatılmaktadır. Bu tasarım yaklaşımında, daha önce ulaşılamamış fonksiyonellik, kompaktlık, sağlamlık ve üretim çeşitliliği mottosu ile tamamen dielektrik pasif optik haberleşme cihazlarının tasarımı gösterilip, fabrikasyon için tasarlanan yapının ayrıklaştırılması üzerine bulgular paylaşılmaktadır. Tezin ilk bölümünde genel konseptte tersine ve geleneksel tasarımları anlatıp literatürden örnekler gösterilip genel anlamda bilgiler sağlanmıştır. Tezin ikinci kısmında ise çalışmalarımızda kullanıp geliştirdiğimiz hedef öncelikli algoritmanın işleyişinden bahsedilmiş olur detayları ve yapıya ulaşma basamakları detaylıca anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ise bu algoritma ve simülasyon programları kullanılarak tasarlanan dalgaboyu çoğullayıcı ve tekilleyici sistemleri, mod çoğullayıcı sistemleri ve son olarak optik güç bölücü sistemleri tasarlanmış ve detayları ile açıklanmıştır. Üçüncü bölümün son kısmında ise yapılan diğer çalışmalar ve devam eden çalışmalar hakkında yüzeysel bilgiler verilmiştir. Son bölümde ise yapılan çalışmalar ve yapılabilecekler hakkında öneri ve görüşlerde bulunulmuş ve önümüzdeki on yılda hesaplama gücünün ve optimizasyon tekniklerinin gelişmesi ile nelerle karşılaşacağımız üzerine ön görüşlerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tersine dizayn, Optimizasyon, Fotonik, Optik, Dalgaboyu çoğullayıcı/tekilleyici, Optiksel güç bölücü, Mod çoğullayıcı

ABSTRACT

Master of Science

DESIGN AND ANALYSIS OF T-SHAPE WAVELENGTH (DE)MULTIPLEXERS,
OPTICAL MODE DEMULTIPLEXERS AND OPTICAL POWER SPLITTER FROM
PASSIVE OPTIC DEVICES WITH OBJECTIVE-FIRST ALGORITHM

Ahmet Mesut Alpkılıç

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

Supervisor: Prof. Dr. Hamza Kurt

Date: November 2020

Integrated photonic devices play an essential role with the advancement of technology in a wide range of applications, from optical interconnections and sensors to medical imaging systems and even technologies involving quantum mechanics. Accurate sensing of light in the desired spectral region, accurate and lossless transmission, high efficiency and durability have become the features sought in today's technology. However, in the light of production technologies and increasing material knowledge, it is crucial to protect these features in technological devices that are aimed to be miniaturized. However, these photonic device design methods are unfortunately far behind other fields such as digital electronics and aerospace technologies. The most important reason for this is that optimization, computing power and production techniques have only developed in the last decade and are intended to be used for these devices specifically.

Photonic devices were largely hand-designed using a combination of analytical theories and manual parameter scans, resulting in limited libraries created by changing

only specific parameters, thus designs are made on existing devices. As a result, devices ranging from a few tens of micrometers to hundreds of micrometers had to be designed, and this became unable to meet today's needs. On the other hand, inverse design is an approach that will meet the high performance, low power consumption and footprint targets that are needed today.

In this thesis, our work done with the target-priority algorithm, which is one of the reverse design methods that contains numerous variables by saving the design of passive optical-photonic devices from the limited design parameters mentioned above, and promises an unprecedented design area to the designer, is described. In this design approach, the design of dielectric passive optical communication devices is demonstrated with the motto of functionality, compactness, robustness and production diversity that have not been reached before, and the findings are shared on the discretization of the structure designed for fabrication. In the first part of the thesis, contrary to the general concept and traditional designs, examples from the literature are shown and general information is provided. In the second part of the thesis, the operation of the goal-priority algorithm that we have used and developed in our studies is mentioned, and the details and the steps to reach the structure are explained in detail. In the third chapter, wavelength multiplexer and singularizer systems, mode multiplexer systems and finally optical power divider systems designed using this algorithm and simulation programs are designed and explained in detail. In the last part of the third chapter, information is given about other studies and ongoing studies. In the last part, suggestions and opinions were made about the work done and what can be done, and predictions were made on the development of computing power and optimization techniques in the next decade.

Keywords: Inverse design, Nanophotonics, Dielectric metamaterial, Optimization, Wavelength-division multiplexer, Mode demultiplexer, Optical power splitter.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans için beni tam zamanlı bursiyeri olarak kabul eden, değerli vaktini ve ilgisini esirgemeyen, engin akademik tecrübesi ile her zaman yol gösteren ve akademik anlamda gelişmeye en büyük katkıyı sağlayan değerli bilim insanı Prof. Dr. Hamza KURT ile üç sene boyunca çalışma fırsatı buldum. Öncelikle tez danışmanım olan Prof. Dr. Hamza KURT hocama bana kattığı vizyon ve verdiği fırsatlar için sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisi ile çalışmaktan her zaman büyük mutluluk duyduğumu bildirmek istiyorum.

Yaptığım araştırmalar boyunca her zaman fikir alışverişinde bulunduğum birlikte bolca vakit geçirdiğim değerli arkadaşım Yusuf Abdulaziz YILMAZ başta olmak üzere, araştırma grubumuza ilk katıldığımda birlikte çalışma fırsatı bulduğum Mediha TUTGUN, Aydan YELTİK, Döne YILMAZ'a, akademik anlamda ve boş zamanlarımızda yaptığımız güzel sohbetler için Zeki HAYRAN, Ceren BABAYİĞİT, Nazmi YILMAZ, Utku Görkem YASA, Tolga YILDIRIM, Ahmet ÖZER, Melike GÜMÜŞ, Emre BOR, Doç. Dr. Mirbek Turduev'e, son dönemde yeni algoritma çalışmalarımız sebebiyle çokça vakit geçirdiğim Abdullah Bera İÇLİ ve Bumin Kağan YILDIRIM'a, başvurduğum burs ve doktora programlarında bana danışmanım Prof. Dr. Hamza KURT dışında her zaman destek ve referans olan değerli bilim insanları Doç. Dr. Mehmet ÜNLÜ ve Prof. Dr. Sinan GEZİCİ'ye, lisans dönemimden optik-fotonik alanına merakımı ateşleyen değerli hocalarım Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN, Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR ve lisans yıllarımdan arkadaşlarım, Emre BEŞKAZAK, Mustafa ÖZKAN, Ali YAMAN, Mustafa TÜRKMEN ve diğer arkadaşlarıma, lisans sırasında beni laboratuvarına kabul eden ve yaklaşık bir boyunca laboratuvarında araştırmalar yaptığım değerli bilim insanı Prof. Dr. Hilmi Volkan DEMİR ve grubunda beni deneysel yöntemlerle tanıştıran değerli öğrencilerine teşekkür etmek istiyorum.

Yıllardır her an yanımda olan birlikte büyüdüğüm, zorlukları birlikte aştığım, mutlu anlarımı paylaştığım, arkamda, yanımda her zaman beni destekleyerek duran, bilimsel konuları tartışıp bana gerektiğinde yardımı esirgemeyen yol arkadaşım sevgili eşim Gizem GÖKÇE'ye, maddi-manevi destekleri için anne, baba ve kardeşime, kayınpederime ve kayınvalideme, yetişmemde çok büyük emekleri olan dedeme, babaanneme, halama ve diğer akrabalarımın teşekkür ediyorum. Olmasaydınız her şey çok zor olurdu. İyi ki varsınız!

Ve son olarak, yüksek lisans eğitimim boyunca sağladıkları burs imkanları için TÜBİTAK ve TOBB ETÜ'ye teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

.....	i
TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Sezgisel Tasarım	6
1.2. Tersine Tasarım.....	7
2. TEORİK MODEL VE YÖNTEM	11
2.1 Hedef Öncelikli Algoritma ve Ayırıklaştırma.....	11
2.1.1 Tek amaçlı hedef öncelikli algoritma.....	11
2.1.2. Hedef öncelikli algoritmanın birden fazla amaç için uygulanması....	14
2.1.3. Hedef öncelikli tersine tasarım yöntemi ile ayırıklaştırma	17
3. DALGABOYU ÇOĞULLAYICI VE TEKİLLEYİCİ TASARIMI	19
3.1. Hedef Öncelikli Algoritmanın Problem İçin Uygun Hale Getirilmesi ..	20
3.2. Yöntem Ve Sonuçlar	20
3.3. Dalgaboyu Çoğullayıcıların 3B Olarak Modellenmesi.....	28
4. MOD ÇOĞULLAYICI TASARIMI	33
4.1. Hedef öncelikli Algoritmanın Problem İçin Uygun Hale Getirilmesi ...	33
4.2. Yöntem Ve Sonuçlar	33
5. OPTİK GÜÇ BÖLÜCÜ TASARIMI	39
5.1. Hedef Öncelikli Algoritmanın Problem İçin Uygun Hale Getirilmesi ..	39
5.2. Yöntem Ve Sonuçlar	39
6. DİĞER ÇALIŞMALAR	49
6.1. Fotonik Nanojet.....	49
6.1.1. Tersine yaklaşım ile fotonik nanojet tasarımı	50
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Entegre fotonik aygıtların günümüzde kullanıldığı alanlar.	2
Şekil 1.2: Nanofotonik alanında yapılan son altmış yıldaki çalışmalara genel bir bakış.	4
Şekil 1.3: Yıllara göre nanofotonik alanında yayınlanan çalışmaların artışı (Web of Science).	4
Şekil 1.4: Tersine tasarım yönteminin şematik olarak gösterimi.	5
Şekil 1.5: Fotonik tasarım yöntemleri şematiği.	6
Şekil 2.1: Hedef öncelikli algoritmanın gradyan temelli olması ile hedefe bir başka deyişle global optimaya yakınsaması şematik gösterimi.	14
Şekil 2.2: Prof. Vučković ve ekibi tarafından önerilen Hedef öncelikli algoritma ile sürekli kırıcılık indisine sahip optik mod dönüştürücü yapısı.	14
Şekil 2.3: Tersine dizayn algoritmasında yapımı sürekli dielektrik dağılıma sahip olan çıktısından çeşitli ayırıklaştırma yöntemleri uygulanarak elde edilen ayırık sonuç yapısının gösterimi.	16
Şekil 3.1: Dizili dalgakılavuzu ızgarayapılarının DBÇ için kullanılmasının şematik olarak gösterimi.	19
Şekil 3.2: Dalgaboyu çoğullayıcı gösterimi. (a) Üç boyutlu cihaz gösterimi ve birim hücre boyutu. (b) 1×2 dalgaboyu çoğullayıcı yapısının genişlik ve boyut bilgilerinin gösterimi.	21
Şekil 3.3: (a) Sürekli dağılıma sahip sürekli dielektrik 1×2 T kavşak DBÇ, (b); (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ϵ_{th} method kullanılarak elde edilmiş ayırıklaştırılmış yapı, (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (e) ayırıklaştırmalıyet fonksiyonu ile elde edilmiş ayırıklaştırılmış DBÇ (f) (e) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.	22
Şekil 3.4: (a) Sürekli dağılıma sahip sürekli dielektrik 1×4 T-kavşak DBÇ, (b); (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ϵ_{th} method kullanılarak elde edilmiş ayırıklaştırılmış yapı, (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (e) ayırıklaştırmalıyet fonksiyonu ile elde edilmiş ayırıklaştırılmış DBÇ (f) (e) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.	24
Şekil 3.5: (a) Sürekli dağılıma sahip sürekli dielektrik 1×4 T-kavşak DBÇ, (b); (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ϵ_{th} method kullanılarak elde edilmiş ayırıklaştırılmış yapı, (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.	25
Şekil 3.6: Sürekli dielektrik dağılıma sahip yapının H-manyetik alan dağılımı, (a) 1×2 , (b) 1×4 ve (c) 1×6 T-kavşak çoğullayıcılar. Oklar optik dalganın girişi olarak verilen portunu göstermektedir.	27

Şekil 3.7: (a) ϵ_{th} eşik method kullanılarak elde edilmiş tamamen dielektrik ayrıklaştırılmış 1×2 T-kavşak DBÇ, (b) (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ayrıklaştırma-maliyet fonksiyonu ile elde edilmiş ayrıklaştırılmış DBÇ (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.....	29
Şekil 3.8: (a) ϵ_{th} methot kullanılarak elde edilmiş tamamen dielektrik, ayrıklaştırılmış 1×4 T-kavşak DBÇ, (b) (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ayrıklaştırma -maliyet fonksiyonu ile elde edilmiş ayrıklaştırılmış DBÇ (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.	30
Şekil 3.9: (a) Epsilon eşik yöntemi ile elde edilmiş ful-dielektrik 3B 1×6 T-kavşak DBÇ ‘nin gösterimi. (b) 3B 1×6 T-kavşak DBÇ ‘nin normalize edilmiş dB cinsinden transmisyon verim değerleri.	31
Şekil 4.1: TE / TM 0,1,2 mod çoğullayıcıların şematik gösterimi (a) yapı boyutu ve birim hücre boyutu ile (a) 1×2 T-eklem, (b) 1×3 T-eklem.	34
Şekil 4.2: TE _{0,1} 1×2 mod çoğullayıcı yapısı (a), $2.8 \mu m \times 2.8 \mu m$ boyuta sahip sürekli dielektrik dağılıma sahip yapı, (b); (a) ‘ ya ait TE ₀ mutlak H z dağılımı, (c), (a) ‘ ya ait TE ₁ mutlak H z dağılımı. (d); (a) ‘ ya epsilon eşik yöntemi uygulanması ile elde edilen ayrıklaştırılmış yapı. (e), (d) ‘ ya ait TE ₀ mutlak H z dağılımı, (f), (d) ‘ ye ait TE ₁ mutlak H z dağılımı.	35
Şekil 4.3: TM _{0,1} 1×2 mod çoğullayıcı yapısı (a), $2.8 \mu m \times 2.8 \mu m$ boyuta sahip sürekli dielektrik dağılıma sahip yapı, (b); (a) ‘ ya ait TM ₀ mutlak E z dağılımı, (c), (a) ‘ ya ait TM ₁ mutlak E z dağılımı. (d); (a) ‘ ya epsilon eşik yöntemi ($\epsilon_{th}=3.1$) uygulanması ile elde edilen ayrıklaştırılmış yapı. (e), (d) ‘ ya ait TM ₀ mutlak E z dağılımı, (f), (d) ‘ ye ait TE ₁ mutlak E z dağılımı. İterasyon sayısı 6000 olarak uygulanmıştır.	36
Şekil 4.4: TE _{0,1,2} 1×3 mod çoğullayıcı yapısı (a), $2.8 \mu m \times 2.8 \mu m$ boyuta sahip sürekli dielektrik dağılıma sahip yapı, (b); (a) ‘ ya ait TE ₀ mutlak H z dağılımı, (c), (a) ‘ ya ait TE ₁ mutlak H z dağılımı, (d), (a) ‘ ya ait TE ₂ mutlak H z dağılımı. (e); (a) ‘ ya epsilon eşik yöntemi ($\epsilon_{th}=5$) uygulanması ile elde edilen ayrıklaştırılmış yapı. (f), (e) ‘ ya ait TE ₀ mutlak H z dağılımı, (g), (e) ‘ ye ait TE ₁ mutlak H z dağılımı, (h), (e) ‘ ye ait TE ₂ mutlak H z dağılımı. İterasyon sayısı 6000 olarak uygulanmıştır.	37
Şekil 4.5: TM _{0,1,2} 1×3 mod çoğullayıcı yapısı (a), $2.8 \mu m \times 2.8 \mu m$ boyuta sahip sürekli dielektrik dağılıma sahip yapı, (b); (a) ‘ ya ait TM ₀ mutlak E z dağılımı, (c), (a) ‘ ya ait TE ₁ mutlak E z dağılımı, (d), (a) ‘ ya ait TM ₂ mutlak E z dağılımı. (e); (a) ‘ ya epsilon eşik yöntemi ($\epsilon_{th}=5$) uygulanması ile elde edilen ayrıklaştırılmış yapı. (f), (e) ‘ ya ait TM ₀ mutlak E z dağılımı, (g), (e) ‘ ye ait TM ₁ mutlak E z dağılımı, (h), (e) ‘ ye ait TM ₂ mutlak E z dağılımı. İterasyon sayısı 6000 olarak uygulanmıştır.	38
Şekil 5.1: $1 \times N$ optik güç ayırıcı cihazın şematik olarak gösterimi.	40
Şekil 5.2: 1×2 TE sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) H -manyetik alanı dağılımları (c); (a) ‘ ya $\epsilon_{th}=2.2$ uygulanarak elde edilen ayrıklaştırılmış yapı ve (d) (c) ‘ de gösterilen yapıya $1.55 \mu m$ dalgaboyunda, TE polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.	41
Şekil 5.3: 1×2 TM sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) E -elektrik alanı dağılımları (c) (a) ‘ daki yapıya $\epsilon_{th}=6.5$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu m$ dalgaboyunda, TM polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.	42

Şekil 5.4: 1×3 TE sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) H -manyetik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=4.1$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda, TE polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.....	43
Şekil 5.5: 1×3 TM sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) E -elektrik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=6.8$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda, TM polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.....	44
Şekil 5.6: 1×4 TE sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) H -manyetik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=3.5$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda, TE polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.....	45
Şekil 5.7: (a) 1×4 TM sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) E -elektrik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=6.5$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda TM mod için dielektrik dağılımı göstermektedir, (d) E -elektrik alanının ayırık yapıdaki dağılımını göstermektedir.....	46
Şekil 6.1: Fotonik nanojetin karakteristiği maksimum genliğin olduğu yer O noktasında. (Itagi vd., 2005).....	50
Şekil 6.2: (a) Karesel bölgede değişen yapının dielektrik dağılımı. (b) yapı içerisinde ve arkasında meydana gelen H alan sonuçları.....	51
Şekil 6.3: (a) Dairesel bölgede değişen yapının dielektrik dağılımı ve (b) yapı içerisinde ve arkasında meydana gelen H alan sonuçları.....	51
Şekil 6.4: Fotonik nanojet (a) dielektrik dağılımı (b) sürekli dağılıma sahip H_z manyetik alanının kuvvet dağılımı (c) oluşan nanojet etkisinin (b) büyütülmüş hali.....	52

KISALTMALAR

- 1B** : Bir Boyutlu
2B : İki Boyutlu
3B : Üç Boyutlu
DK : Dalga Kılavuzu
FK : Fotonik Kristal
Im : Sanal (Imaginary)
Maks. : Maksimum
Re : Gerçel (Real)
TE : Enine Elektrik (Transverse Electric)
TM : Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
DBC : Dalgaboyu çoğullayıcı
ZASF : Zaman-alanında Sonlu-farklar
PLA: Polylactic acid
Si : Silisyum
SiO₂: Silisyum-di-oksit

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

T	İletim verimliliği
Q	Kalite faktörü
r	Silindir yarıçapı
h	Silindir yüksekliği
d_{\min}	Minimum dielektrik şerit genişliği
τ	Sönümlenme katsayısı
ω	Açısal frekans
ω_0	Rezonans frekansı
B	Ayrıklaştırma parametresi
θ	Normal ile yapılan açı
w_x	x yönünde yapısal uzunluk
w_y	y yönünde yapısal uzunluk
w_{xy}	x ve y yönünde yapısal uzunluk
h_z	z yönünde yapısal uzunluk
$\Delta\varphi$	Faz farkı
χ	Elektriksel hassasiyet
ε_x	x yönünde elektriksel geçirgenlik
ε_y	y yönünde elektriksel geçirgenlik
μ_x	x yönünde manyetik geçirgenlik
μ_y	y yönünde manyetik geçirgenlik
\vec{p}	Yönlü alan
\vec{r}	Yarıçap vektörü
T	İletim verimliliği
d_{\min}	Minimum dielektrik şerit genişliği
ω	Açısal frekans
ω_0	Rezonans frekansı
$\Delta\varphi$	Faz farkı
σ^{xx}	x yönünde elektriksel iletkenlik
σ^{yy}	y yönünde elektriksel iletkenlik
A	Saçılım potansiyeli
An	n . yineleme sonrası saçılım potansiyeli
θ	Görünmezlik alanı
$e_s^{(n)}$	n . dereceden saçılan elektrik alan genliği
b	Derecelendirme yönünde örgü sabiti
φ	Azimutal açı
χ	Elektriksel hassasiyet
ε_x	x yönünde elektriksel geçirgenlik

ϵ_y

μ_x

μ_y

H

E

y yönünde elektriksel geçirgenlik

x yönünde manyetik geçirgenlik

y yönünde manyetik geçirgenlik

Manyetik alan

Elektrik alan



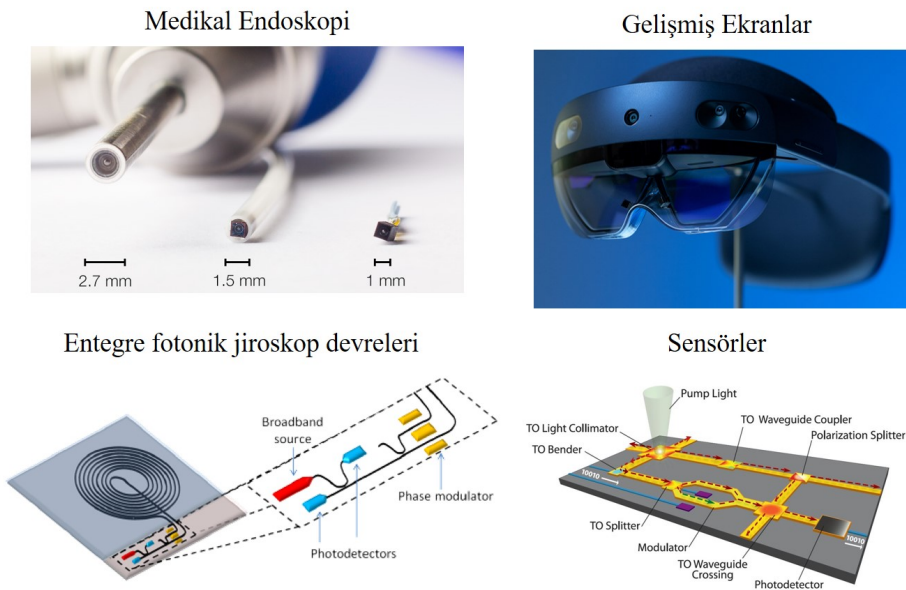
1. GİRİŞ

İnsanlığın ışığı anlama ve manipüle etme çabası muhtemelen antik çağlarda aynalar tasarlamak için obsidyen taşının cilalanmasına kadar uzanmaktadır (Enoch vd., 2006). Başka bir temel optik unsur olan, merceğe veya "yanan taş" yapılan atıflar, MÖ 800'den kalma eski Mısır hiyerogliflerinde bulunabilir (Kriss vd., 1998). Bu eski cihazların keşfi ve kullanımı, günümüzde kırılma ve yansıma kavramları olan ilgili fiziğin somut bir fiziksel anlayışından önce gelmektedir.

Geometrik optiğin erken gelişiminin çoğu, Öklid ve İbn-i Heysem gibi ilk Yunan ve İslam alimlerine atfedilebilir. Öklid, görmeyi geometrik olarak işlemiş ve büyütme özelliklerini tanımlamak için çizgilerin (veya ışınların) ve açılarının kullanımını resmileştirmiştir. İbn-i Heysem, Öklid ışınlarına dayanan bir görüş teorisi üretti ve bu ışınları ışık ve renkle fiziksel olarak ilişkilendirdi (Lindberg vd.,1967). Geometrik optik teorisi daha sonra Isaac Newton tarafından resmileştirildi (Newton Sir I., 1726). Newton'ın girişim ve kırınımı tanımlamadaki başarısızlıkları Francesco Grimaldi, James Gregory ve Thomas Young tarafından deneysel olarak belgelendi. Christiaan Huygens ve daha sonra Francois Arago ve Augustin-Jean Fresnel bu fenomeni teorik olarak bir ışık dalgası teorisi kullanarak tanımladılar. Son olarak, dalga optiği elektromanyetizma teorisi ile birleştiğinde, modern bir ışık veya fiziksel optik anlayışı ortaya çıktı. Ve böylece foton kavramının modern fizikte kullanım alanı olduğu anlaşıldı. Işığın manipüle edilmesi ile ışık paketlerinin istenildiği ölçüde istenen amaç için kullanılabileceği bilim insanları ve mühendisler tarafından keşfedildi.

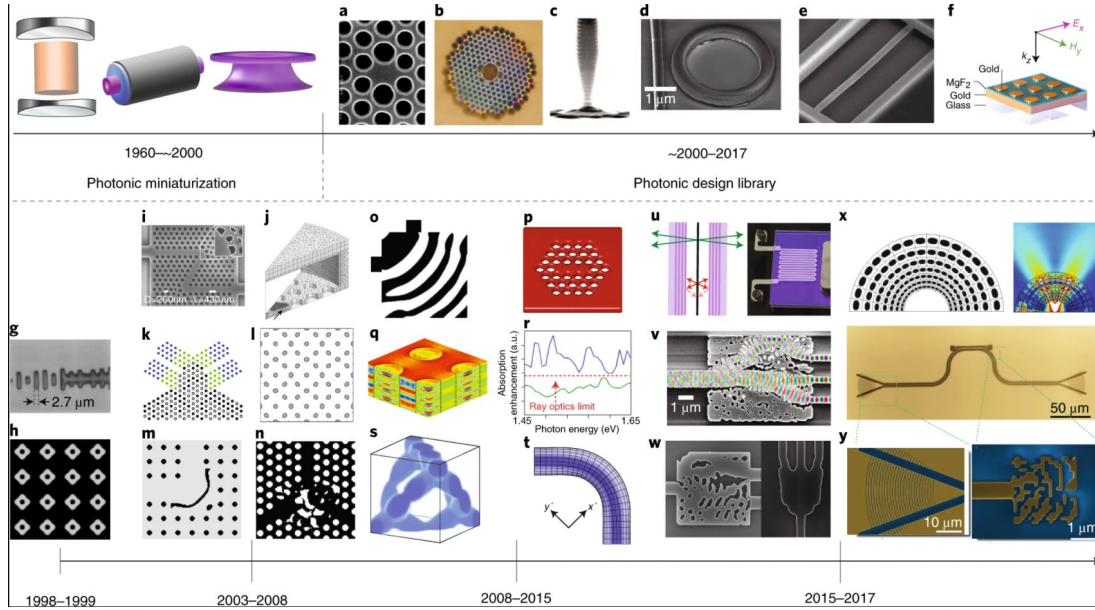
Bilim insanları ve mühendisler, optik ilkelerindeki deneysel ve teorik bilgilerin sonuçlarını kullanarak biyoloji ve astronomi gibi diğer alanlarda daha ileri araştırmalar yapmak için mikroskop, teleskop ve spektrometre gibi etkileyici optik-fotonik sistemler geliştirdiler. Ayrıca bu araştırma, okuma gözlüğü, polarize güneş gözlüğü ve 3B televizyon gibi daha pratik araçlar üreterek günlük yaşamı zenginleştirmiştir. Parlaklıkla ilgili ilk merakımızdan bu yana, optik-fotonik alanındaki araştırmalar şaşırtıcı derecede büyük ve küçük uzunluk ölçeklerini incelememize izin verdi.

Neredeyse atom boyutunda üretim için çeşitli teknik ve cihazların geliştirilmesine olanak sağladı. Elektron mikroskobu, çeşitli küçük yapıları incelememiz ve onları taklit etme, geliştirmemize ve ilham almamıza olanak sağladı. Silikon fotonığının ve diğer entegre fotonik teknolojilerin olgunlaşmasıyla, büyük, karmaşık optik sistemleri tek bir optik çipe sığdırmak mümkün hale geldi. Optik ara bağlantılar (Soldano, L. B. Vd.,1992), kuantum hesaplama (Sprengers, J. P. vd., 2011) ve LIDAR (Yang, K. Y. vd.,2020) gibi biyosensörler (Luan, E. vd., 2018) dahil olmak üzere hem akademik hem de endüstri tarafından çok çeşitli entegre fotonik uygulamalar oldukça yoğun olarak tasarlanmakta ve üretimi yapılmaktadır. Optik-fotonik aygıtların minyatürleştirilerek işlevselliklerinin artırılması ve fotonların taşıdıkları enerjilerin verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülmesi, optik bilgi işleme ve enerji hasadı uygulamalarının yaygınlaşmasına öncülük edeceği aşikardır. Bu nedenle, fotonların mikrometre ve nanometre mertebesindeki yapılarla etkileşiminin incelenmesi ve yeni yapıların üstün özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanması önem arz etmektedir. Dolayısıyla nanofotonik ortamların tasarımlarında yeni yaklaşımlara gereksinim duyulmaktadır. Işığın dalgaboyu veya dalgaboyu altı mertebesinde kırılma indis değişimine sahip yapılarla etkileşiminden ortaya çıkan ve daha önce gözlemlenemeyen pek çok zengin fiziksel konseptlerin varlığı, araştırmacıları fotonik alanında çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Şekil 1.1’de halihazırda hayatımızda yer edinmiş entegre fotonik cihazlarından örnekler gösterilmiştir.



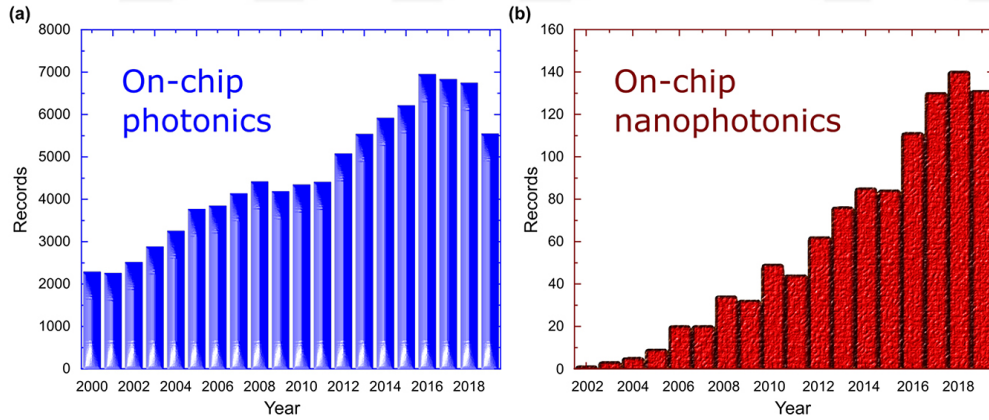
Şekil 1.1: Entegre fotonik aygıtların günümüzde kullanıldığı alanlar.

Yirminci yüzyılın ikinci yarısında, fabrikasyon yeteneklerindeki ilerleme, fotonik mühendisliğin mikro ölçekte ve nano ölçeğe yayılmasına izin verdi. Geçtiğimiz yirmi yılda, bu yetenek, zengin bir standart fotonik tasarım şablonları kütüphanesinin büyümesine yol açtı. Verimlilik ve kompaktlık ihtiyacı araştırmacıları uzay-havacılık endüstrisinde sıkça kullanılan optimizasyon yöntemlerine itmiştir. Bu alanda, literatüre oldukça fazla ve yön gösterici çalışmalar eklenmiştir. Şekil 1.2 de son yıllara göre çalışmalardan örnekler verilmiştir. Şekil 1.2(a), fotonik kristal fiberleri (Knight, J. C. vd., 2003), Şekil 1.2(b) mikropost ile mikro oyukları (Pelton, M. vd., 2002) Şekil 1.2(c) mikro yüzük rezonatörleri (Xu, Q. vd., 2008), Şekil 1.2(d) nanoışın rezonatörleri (Eichenfield, M. vd., 2009), Şekil 1.2(e) plazmonik sensörleri (Liu, N. vd., 2010), Şekil 2(f) SiO₂ fiberden a periyodik dalga kılavuzuna geçiş (Offrein, B. J. vd., 1998), 1.Şekil 2(g) optimize edilmiş 2B FK yapısı (Dobson, D. C. vd., 1999), Şekil 1.2(h) topoloji optimizasyonu ile “Z” şeklinde dalga kılavuzu tasarımı (Borel, P. I. vd., 2004), Şekil 1.2(i) tek bozunumlu FK lazer kavite tasarımı (Frei, W. R. vd., 2008), Şekil 1.2(j) 1.5 µm × 1.55 µm dalgaboyu çoğullayıcı tasarımı (Håkansson, A. vd., 2005), Şekil 1.2(k) seviye ayarlama band aralığı ile optimize edilmiş FK (Kao, C. Y. vd., 2005), Şekil 1.2(l) 90° bükülmül dalga kılavuzu yapısı (Jensen, J. S. vd., 2004), Şekil 1.2(m) nano baskılı iki bağlantılı çoğullayıcı (Borel, P. I. vd., 2007), Şekil 1.2(n) optimize edilmiş 90° dönüşlü dalga kılavuzu yapısı (Tsuji, Y. vd., 2008), Şekil 1.2(o) ters tasarlanmış delikli dalga kılavuzu lifinin enine kesiti (Lu, J. vd., 2011), Şekil 1.2(p) solar soğurma için radyal bağlantılı silikon tel dizisinin birim hücresinin gösterimi (Alaeian, H. vd., 2012) ,Şekil 1.2(r) 3B optimize edilmiş FK yapısı (Men, H. vd., 2014), Şekil 1.2(s) Şekil 2(t) Şekil 1.2(u) dönüşüm optiği ile desteklenmiş yönlendirilmiş dalga kılavuzu yapısı (Frellsen, L. F. vd., 2016), Şekil 1.2(v) tersine dizayn edilmiş entegre silisyum çip üzerine iki kanallı dalgaboyu çoğullayıcı yapısı (Piggott, A. Y. vd., 2015), Şekil 1.2(w) topoloji optimizasyonu ile lens tasarımı ve manyetik alan profili (Otomori, M. vd., 2017), Şekil 1.2(x) kompakt çip üzerinde Fabry-Perot rezonatör yapısı (Yu, Z. vd., 2017), 2B fotonik band aralıklı kusurlu mod lazer çalışması (Painter, O. vd., 1999) gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Nanofotonik alanında yapılan son altmış yıldaki çalışmalara genel bir bakış (Molesky vd., 2018).

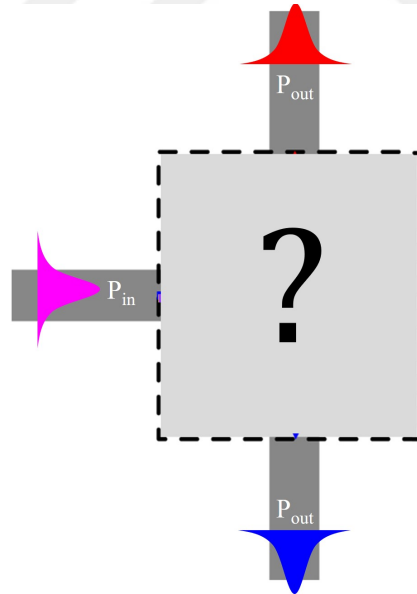
Şekil 1.3'te yıllara göre optik ve fotonik üzerine yapılan araştırmaların ne denli arttığı net bir şekilde gözükmemektedir. Bunun en büyük sebepleri üretim tekniklerinin gelişmesi, hesaplama kabiliyetinin gelişmesi, malzeme bilgisinin artması olarak gösterilebilir.



Şekil 1.3: Yıllara göre nanofotonik alanında yayınlanan çalışmaların artışı (Web of Science) (Karabchevsky, A. vd., 2020).

Bunların en dikkat çekenlerinden biri Stanford Üniversitesi'nden Prof. Vučković ve ekibi ilk olarak 2010 yılında Optics Express dergisinde yayımlanan "Hedef-öncelikli algoritma" olarak literatüre sundukları gradyan temelli tersine algoritma çalışmasıdır (Vučković J. vd., 2010). Ana düşünce yapısı Şekil 1.4'te şematik olarak gösterilen bu yöntem ile yapı hedefleri önceliklendirilir, yapının sahip olması gereken fiziksel bağımlılıklar (Maxwell denklemlerini sağlaması gibi), belli bir değere kadar göz ardı

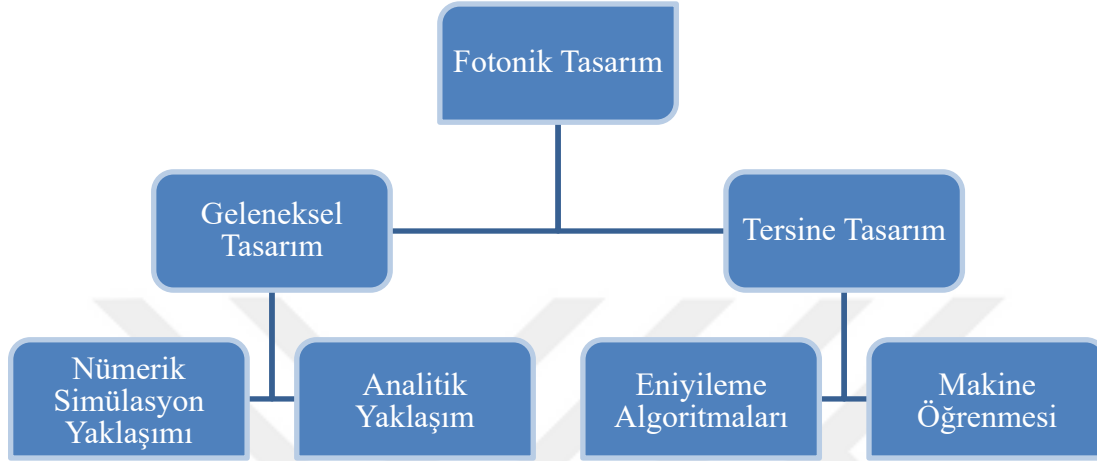
edilir. Böylece yapı performansı istenen seviyeye iteratif türev temelli yöntemler ile sağlanmaya, istenen global minimaya ulaşılmaya çalışılır. Bu çalışmadaki problem yapıların sürekli kırıcılık indisine sahip olmalarından ötürü, üretilebilirlikten uzak olmalarıydı. Bu çalışmanın yayınlanmasından iki sene sonra, Los Angeles Kaliforniya Üniversitesinden Eli Yablonovitch ve grubunun adjoint topoloji optimizasyonunu nanofotonik yapılara uygulaması ile istenen fonksiyonellikte yapıların zaman tasarrufu sağlanarak tasarlanmasının önü açılmıştır. Bunun sebebi, fotonik tasarım problemlerinde tersine tasarımın en çok zaman harcayan kısmı ileri problemin çözümüdür, diğer bir deyişle önerilen yapının elektromanyetik cevabının bulunmasıdır. Dolayısı ile herhangi bir tersine tasarım yaklaşımında gerekli simülasyon sayısı algoritmanın başarımı adına iyi bir ölçüdür. Simülasyon sayısı bir kısıt olduğu için stokastik algoritmalar genelde esnek olmayan yöntemlerdir. Problemin karmaşıklığı ileri problemin çözümünün daha zor elde edildiği 3B optimizasyonlarda ciddi bir hesaplama ve zaman maliyetine sebep olmaktadır. Yablanovitch ve ekibinin literatüre sunduğu yaklaşım ile hedef fonksiyonun gradyanı her bir iterasyonda sadece iki simülasyonla bulunabilmektedir (Lalau-Keraly ve Christopher M. vd., 2013).



Şekil 1.4: Tersine tasarım yönteminin şematik olarak gösterimi.

Şekil 1.5'te gözüktüğü gibi optik ve fotonik cihazların tasarımında iki ana yöntem mevcuttur. Bunlardan birincisi geleneksel yöntem, bir diğer adıyla sezgisel yöntemdir. Bu yaklaşımda tasarımcı sezgileri ve matematiksel simülasyonlar kullanarak yapıyı tasarlar. Nümerik simülasyon yaklaşım metodu örneğin Lumerical, Meep gibi analiz

metotları kullanılarak yapıda değişimler meydana getirilir veya analitik yaklaşım ile örneğin, transfer matris metodu, bilinen tasarım gerçekleri baz alınarak sonuca ulaşılması hedeflenir. İkinci yaklaşım olan tersine tasarım yaklaşımında, tasarımcı giriş ve çıkış değerlerini matematiksel temellere göre formulize edip yapıyı çeşitli gradyan temelli veya gradyan temelli olmayan optimizasyon yöntemleri ile tasarlar.



Şekil 1.5: Fotonik tasarım yöntemleri şematığı.

1.1.Sezgisel Tasarım

Son zamanlarda entegre fotonığe olan ilginin artmasına rağmen, fotonik cihazlar hala tasarımcının sezgisel yaklaşımları ile tasarlanmaktadır. Bir fotonik cihazı tasarlamak için, tasarımcı önce analitik teori ve sezgiye dayalı genel bir yapı seçer. Yaygın olarak yalnızca küçük bir yarı analitik tasarımlı cihaz kütüphanesi kullanılmaktadır (Xu, Q. vd., 2005). Bunlar arasında dalga kılavuzu yönlü kuplörler (Han, S. vd.,2015), çok modlu girişim kuplörleri (Chen, J. vd., 2016), Bragg reflektörler (Bullock, D. L. vd., 1993), mikro halkalı rezonatörler (Bogaerts, W. vd., 2012), ve ızgara bağlantıları (Taillaert, D., 2006) yer almaktadır. Tasarımcı daha sonra tarama simülasyonlarını kullanarak yapının ince ayarını yapar. Bu sürecin yönlendirilmemiş doğası nedeniyle, tasarımcıya yalnızca birkaç serbestlik derecesi sunulmaktadır. Örneğin, çalışan bir dalgaboyu filtresi tasarlamak için, tasarımcı tipik olarak mevcut tüm parametreleri tarayan geniş bir dizi optik simülasyon çalıştıracak ve ardından en iyi simüle performansı sergileyen parametre kombinasyonunu seçer (yapının giriş çıkış portlarının kalınlığı, giriş açısı, yapının en küçük birim büyüklüğü vs.).

Aksine, elektronik devrelerdeki tasarım oldukça otomatikleşmiştir. Verilog ve VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) gibi elektronik donanım tanımlama dilleri, dijital sistemlerin istenen işlevselliğini belirlemek için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Pedroni, V. A. vd., 2020). Tasarım ve optimizasyon algoritmaları daha sonra bu spesifikasyonları uygulayan devre düzenlerini otomatik olarak oluşturur. Büyük ölçekli devre tasarımının otomasyonu, milyarlarca transistor içerebilen modern entegre devrelerin geliştirilmesini sağlamıştır. Optik cihazların tasarımı devre tasarımı ile aynı ölçüde otomatikleştirilebilirse, entegre fotonik alanında devrim yaratılacaktır.

1.2. Tersine Tasarım

Tersine tasarım, en temel anlamıyla çıkış ve girişi bilinen, istenen yapı çıktısını elde etmek için literatürde bulunan çeşitli optimizasyon ve nümerik yöntemler ile yapı uzay parametrelerini veya başka bir deyişle serbestlik derecelerinin, klasik dizayn metotlarında mümkün olmayan bir şekilde, maksimum seviyede tarayarak gradyan tabanlı veya gradyan tabansız olarak yapıyı fiziksel gerçeklik temelinde tasarlanması anlamına gelmektedir (Molesky, S. vd., 2018). Optimizasyon karar vermede ve fiziksel sistemleri analiz etmede önemli bir araçtır. Matematiksel olarak, bir optimizasyon problemi, tüm uygulanabilir çözümler kümesinden en iyi çözümü bulma sorunudur. Optimizasyon sürecinin ilk adımı uygun bir model oluşturmaktır. Modelleme, problemin amacını, değişkenlerini ve kısıtlamalarını matematiksel olarak tanımlama ve ifade etme sürecidir. Amaç ise, en aza indirmek veya en üst düzeye çıkarmak istediğimiz sistemin performansının nicel bir ölçüsüdür. Optimizasyon işlemlerinde önemli bir adım optimizasyon modelini sınıflandırmaktır, çünkü optimizasyon problemlerini çözmek için algoritmalar belirli bir problem türüne göre uyarlanmıştır.

Bazı modellerin yalnızca değişkenlerin ayrık bir kümeden, genellikle tamsayıların bir alt kümesinden değerler alması mantıklyken, diğer modeller herhangi bir gerçek değeri alabilen değişkenler içeriyorsa anlamlıdır. Kesikli değişkenli modeller kesikli optimizasyon problemleridir, sürekli değişkenli modeller sürekli optimizasyon problemleridir. Sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü, ayrık optimizasyon problemlerinden daha kolay olma eğilimindedir. Fonksiyonların düzgünlüğü, A noktasındaki objektif fonksiyon ve kısıtlama fonksiyon değerlerinin A civarındaki

noktalar hakkında bilgi elde etmek için kullanılabilmesi anlamına gelir. Bununla birlikte, bilgi işlem teknolojisindeki ilerlemelerle algoritmalarındaki gelişmeler, verimli bir şekilde çözülebilen ayrık optimizasyon sorunlarının boyutunu ve karmaşıklığını önemli ölçüde artırmıştır. Sürekli optimizasyon algoritmaları ayrık optimizasyonda önemlidir, çünkü birçok ayrık optimizasyon algoritması bir dizi sürekli alt problem üretmektedir.

Sezgisel olmayan yöntemler, geleneksel yöntemlerle mümkün olmayan tüm yapısal parametrelerin etkili eniyilemesini sağladığı için son zamanlarda nanofotonik cihazların tasarımında etkili bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar arasında en önde gelenlerden genetik algoritmalar (Weile, D. S. vd., 1997), aşama-ayarlı metotlar (Piggott vd., 2015), belirli geometrik parametrelerin optimizasyonu (Abedi vd., 2015; Gondarenko vd., 2008) ve topolojik tasarım yöntemleri (Allaire, G., 2016) kullanılarak fotonik anahtar, dielektrik rezonatör, periyodik olmayan yapı optimizasyonu gibi uygulamalarda başarı sağlanmıştır. Genetik algoritmada ikilik sistem sayıları yalıtkan malzemenin olmasını ya da olmamasını göstermektedir. Bu yüzden genetik algoritma kullanan tasarımcının fazla özgürlüğü yoktur. Bu ikilik sisteminin etkisiyle genetik algoritmanın beklenenden çok iyi bir performans sergilememesi öncü olan bu çalışmalara ilginin az olmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla, yapılan bu çalışmalar sadece birer tasarım yöntemi olarak sunulmakla kalmışlardır. Bu çalışmalar, fotonik yapıların sadece teorik/analitik çözümler veya nümerik yöntemler kullanılarak tasarlanmayacağını, hatta klasik yöntemlerle tasarlanması mümkün olmayan yapıların da tasarlanabileceğini göstermiştir. Ancak bu yöntemler ile cihaz performanslarındaki fonksiyonellik verimlilik vb. birçok önemli değişken göz önünde bulundurulduğunda daha kapsayıcı ve kontrollü bir tasarım yöntemine ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple, literatürde gradyan tabanlı tersine yöntem çalışmaları önerilmiştir (Molesky, S. vd., 2018). Tezde kullanılan yöntem olan hedef öncelikli yaklaşım ise bu yöntemle benzer gradyan tabanlı tersine dizayn yaklaşımından ibarettir. (Lu vd., 2013).

Tasarlanan fotonik aygıtların uygun nümerik analiz yöntemleri diğer bir deyişle tasarlanan yapının elektromanyetik cevabının seçilerek performans değerlendirmesinin yapılması da tasarımın prototip ve sonrasında fabrikasyon aşamaları için son derece önemlidir. Bu analiz metotlarını sonlu elemanlar yöntemi (finite element method; FEM), frekans- alanında sonlu farklar yöntemi (finite-difference frequency-domain method; FDFD) ve zaman- alanında sonlu farklar

yöntemi (finite-difference time-domain method; FDTD) olarak üç ana başlık altında inceleyebiliriz. 1950'lerde uçak gövdesi ve yapısal analizi için geliştirilen sonlu elemanlar (FEM) yönteminde benzetim uzayı iki ve üç boyuta göre küçük alan ve hacimlere bölünmektedir. Basit olmalarından ötürü genellikle üçgensel ve dörtgensel geometrilerin yanı sıra bu küçük alt bölümler her şekil ve yönelimde olabileceğinden FEM yöntemi karmaşık geometrili problemler için uygundur. Bu yöntemde, her alt bölüm için Maxwell denklemlerinin çözümü temel fonksiyon olarak bilinen ve genellikle düşük dereceli bir polinom olan bazı fonksiyonel formlarla yaklaşık olarak ifade edilir. Daha sonra, bu alt bölüm çözümleri bölüm sınırlarında özel koşulları sağlamaya zorlanarak sürekli (continuous) hale getirilir ve genel çözümün küresel sınır koşullarına uyması sağlanır. Bu yöntemin dezavantajı oldukça karmaşık olmasıdır. Diğer FDFD yöntemi görece daha kolaydır çünkü bu yöntemde Maxwell denklemleri basit bir prosedür ile ayrıklaştırıldıktan sonra bu denklemleri karşılayan elektrik ve manyetik alan değerleri bulunur. Zaman ayırmaya (time stepping) gerek duymadan kararlı-durum (steady-state) çözümü bir matris ters çevirme işlemi yoluyla tek bir frekansta bulunur. Daha sonra ihtiyaç halinde her frekans için bir tane olmak üzere toplamda birden çok simülasyon çalıştırılarak geniş bant aralığında alan değerleri elde edilebilir. Bu yöntem özellikle malzeme parametreleri frekansa bağlı değişen dağıtıcı (dispersive) ortamları modellemede çok etkilidir.

Tezde elde edilen fotonik yapıların numerik analizinde sıkça kullanılan FDTD yöntemi de FDFD'deki gibi Maxwell denklemlerinin ayrıklaştırılması ve bu denklemleri karşılayan elektrik ve manyetik alan değerlerinin bulunması prosedürüne dayanmaktadır (İnan vd., 2011). Bu yöntemde simülasyon uzayı dalgaboyu-altı (sub-wavelength) ölçeklerde ve orantılı küçük zaman adımları üzerinden ayrıklaştırılır.

Bu tezde, deneme-yanılma yaklaşımı yerine sezgisel olmayan yöntemlerden biri olan gradyan temelli optimizasyon yöntemlerinden, hedef öncelikli algoritma ile tasarımı hedeflenen pasif optik cihazların yüksek verimlilik kabiliyeti, düşük güç tüketimi, sağlam ve üretilebilirlik temelinde, kompakt ve geliştirilebilir vaziyette tasarlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda tezin devamında görülebileceği üzere, ayarlanabilir port sayısı ile kompaktlık ve verim belirli bir aşamaya kadar korunarak, altı kanala kadar yüksek verimlilikte T-kavşak yapısına sahip dalgaboyu çoğullayıcı/tekilliyici tasarımı, dört kanala kadar yüksek verimlilik ve oldukça kompakt TE ve TM polarizasyon için ayrı ayrı olmak üzere T-kavşak mod çoğullayıcı/tekilliyici yapısı ve

son olarak ayarlanabilir port yapısı ile yüksek başarılı, kompakt, TE ve TM polarizasyonları için ayrı ayrı olmak üzere optik güç bölücü cihaza tasarımları yapılmıştır. Tezde sunulan yapılar ile algoritmanın kabiliyet sınırları görülmüş/genişletilmiş ve temel sorunlardan biri olan ayırıklaştırma işlemi için de üç farklı konsept literatüre sunulmuştur.



2. TEORİK MODEL VE YÖNTEM

2.1 Hedef Öncelikli Algoritma ve Ayrıklaştırma

Hedef-öncelikli tersine tasarım yaklaşımı en basit ve anlaşılır tanımıyla; kompakt, yüksek verimlilikte fonksiyonellikler sunan, birden fazla mod geçişine imkân veren, dalgaboyu ve sıcaklık kaymaları ile üretim hatalarına son derece duyarlı dışarıdan tasarımcının herhangi bir müdahalesine ihtiyaç duymadan, dalgaboyu altı mertebesinde cihaz tasarımına imkân veren ve mümkün olan en geniş parametre uzayını tarayarak yüksek performanslı yeni nesil tasarım yaklaşımıdır. Bu metot ile amacımız fiziksel gerçekliği sağlamak yerine belirli bir hassasiyete kadar hedef yapımıza ulaşmayı ve böylece çok daha yüksek ve çok daha küçük yapılar tasarlamamızı mümkün hale getirmektedir.

2.1.1 Tek amaçlı hedef öncelikli algoritma

Son yıllarda geliştirilen bu tasarım metodolojisinde ilk olarak istenen nanofotonik yapı için belirlenen maliyet fonksiyonuna hedef parametreleri girilir. E , H veya S gibi performans parametreleri bu şekilde algoritmaya tanıtıldıktan sonra yapının dielektrik dağılımı (ϵ) arka arkaya tekrarlanan iterasyonlar ile elde edilir.

$$\begin{aligned} \text{Gauss Kanunu} & \qquad \qquad \qquad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \text{Manyetizmada Gauss Yasası} & \qquad \qquad \qquad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \text{Faraday Yasası} & \qquad \qquad \qquad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \text{Amper Yasası} & \qquad \qquad \qquad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \end{aligned} \tag{2.1}$$

Denklem 2.1’de görüldüğü gibi Maxwell denklemlerinden Amper ve Faraday yasalarının diferansiyel formu kullanılarak Denklem 2.2(a)’daki haline çevrilir. Daha sonra zaman bağımlılığı denkleme $\exp(-i\omega t)$ olarak eklenir ve denklem 2.2(b) ve (c) elde edilir. Denklem 2.2(d)’de her iki taraf ε ’a bölünmüştür. Denklem 2.2(e)’ de her iki tarafın döneli alınmıştır. Denklem 2.3’te ise bulunan eşitliğe denklem 2.2(b) uygun yere konularak zamanda harmonik dalga denklemi gösterilmiştir. Tezde kullanılan algoritma 2B bu eşitliğin temel alınması ile sonuçlara ulaşılmıştır.

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}\quad (2.2 \text{ a})$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\mu_0 \omega \mathbf{H} \quad (2.2 \text{ b})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + i\varepsilon\omega \mathbf{E} \quad (2.2 \text{ c})$$

$$\varepsilon^{-1} \nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon^{-1} \mathbf{J} + i\omega \mathbf{E} \quad (2.2 \text{ d})$$

$$\nabla \times \varepsilon^{-1} \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \varepsilon^{-1} \mathbf{J} + \nabla \times i\omega \mathbf{E} \quad (2.2 \text{ e})$$

Denklem 2.3’de gösterilen dalga denklemi elde edilmiştir. Bu denklem hem ε^{-1} hem de \mathbf{H} değişkenlerine sahip olduğu için konveks olmayan bir problem sunar. Bu nedenle, Maxwell denkleminin manyetik alana ve dielektrik fonksiyonun tersine göre ayrı ayrı doğrusallık özelliğinden faydalanılarak bu denklem bi-konveks bir problem haline getirilmiştir.

$$\nabla \times \varepsilon^{-1} \nabla \times \mathbf{H} - \mu_0 \omega^2 \mathbf{H} = \nabla \times \varepsilon^{-1} \mathbf{J} \quad (2.2)$$

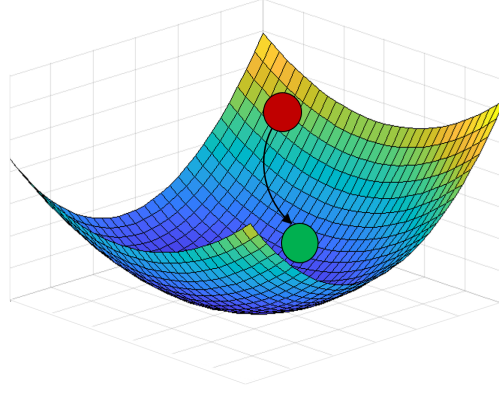
Kararlı durum dalga denklemi, manyetik alanda $f(x) = f_{ideal}$ koşuluna tabi olmak üzere $\min_x \|A(p)x - b(p)\|^2$ minimizasyon eniyileme problemi haline getirilmiştir. Burada, $A(p) = \nabla_x \varepsilon^{-1} \nabla_x - \mu_0 \omega^2$, $x = \mathbf{H}$, $b(p) = \nabla_x \varepsilon^{-1} \mathbf{J}$, $p = \varepsilon^{-1}$ ve $\|\cdot\|^2$ ikinci dereceden Euclidean norm operatörüdür. Dielektrik fonksiyonun tersine göre ise $p_{min} \leq p \leq p_{maks}$ koşulu altında $\min_p \|B(x)p - d(x)\|^2$, burada $B(x) = \nabla_x(\nabla_x \mathbf{H}) - \nabla_x \mathbf{J}$ ve $d(x) = \mu_0 \omega^2 \mathbf{H}$ minimizasyon eniyileme problemi olarak kabul edilmiştir. Doğrudan dalga denklemini çözmek yerine, Denklem 2.2’den, Denklem 2.4 ve 2.5’te görüldüğü gibi iki ana alt problem olarak elde edilmiştir. Bu alt problemler arasında dönüşümlü iterasyonlar yapılarak hedeflenen fotonik tasarım elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} & \underset{x,p}{\text{minimize}} \|A(p)\mathbf{x} - b(p)\|^2 \\ & \text{subject to } f(x) = f_{ideal} \end{aligned} \quad (2.3)$$

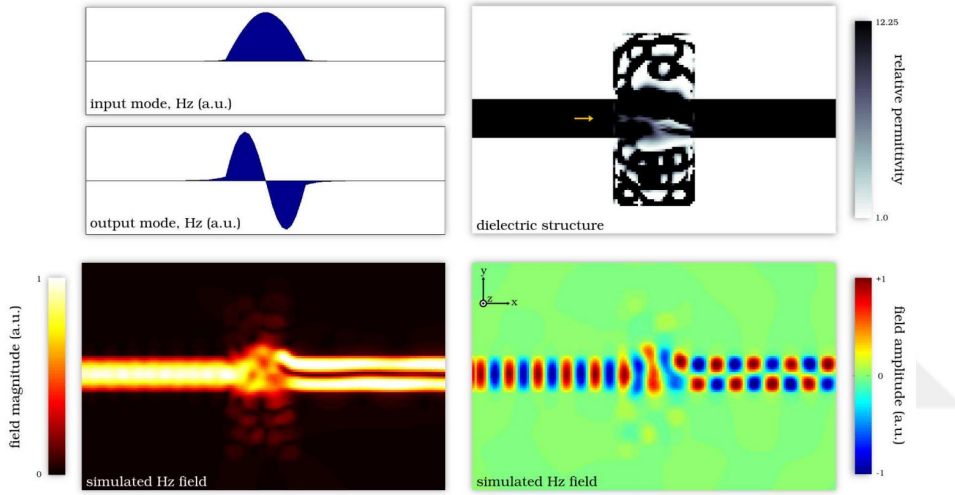
$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{minimize}} \|A(p)\mathbf{x} - b(p)\|^2 \\ & \text{subject to } f(x) = f_{ideal} \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} & \underset{p}{\text{minimize}} \|B(x)p - d(x)\|^2 \\ & \text{subject to } p_0 \leq p \leq p_0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Algoritmanın hedeflenen fonksiyonu sağlaması özel bir eniyileme çözümleyicisi olan CVX'in (convex) Matlab 'ta kullanılması ile gerçekleştirilir (M. Grant ve S. Boyd, 2013). Konveks optimizasyonda Şekil 2.1'de görüldüğü iteratif olarak global minimaya ulaşmaya çalışır. Oluşan yapının sürekli dielektrik dağılıma sahip olmasının nedeni CVX'in belirli aralıktaki değerleri (p_{min}, p_{maks}) sürekli haliyle eniyilemede kullanmasıdır. Algoritma için koşulan hedefleri sayısı yani yapının kompleksliği yapı performansını doğrudan etkilemektedir. Tek hedefli yapılarda standart bir ev bilgisayarı ile 30-40 dakikada sonuca ulaşabilirken kompleks problemlerde üst düzey bilgisayarlar ile günlerce süren iterasyonlar meydana gelmektedir. Tek hedefli hedef öncelikli algoritma ile örneğin yapıdan sadece 1550nm dalgaboyunda TE temel modun çıkışta TE birinci dereceden moda çevrilmesi istenir ve yapı doğrudan giriş çıkış portları aynı ekseninde olacak şekilde algoritmaya nispeten daha kolay bir görev verilir. Böylece tek bir hedef kolaylıkla minimize veya maksimize edilerek yapı oluşturulur. Prof. Vučković ve ekibinin yayınladıkları Optics Express makalesinde şekil 2.2'de görüleceği üzere algoritmaya yalnızca optik mod üzerine girdi yapmaları üzerine aldıkları başarılı sonuç gözükmektedir. Burada yapı üretilebilir olmamakla beraber ilerleyen yıllarda eşitli yöntemler ve algoritmalar önerilmiştir.



Şekil 2.1: Hedef öncelikli algoritmanın gradyan temelli olması ile hedefe bir başka deyişle global optimaya yakınsaması şematik gösterimi.



Şekil 2.2: Prof. Vučković ve ekibi tarafından önerilen Hedef öncelikli algoritma ile sürekli kırıcılık indisine sahip optik mod dönüştürücü yapısı (Lu ve Vučković, J. vd., 2011).

Sonuç olarak hedef öncelikli algoritma tek hedefli çalışmalar için oldukça hızlı ve yüksek başarımlı sürekli dağılıma sahip yapıları çok kısa sürede tasarlanabilmektedir.

2.1.2. Hedef öncelikli algoritmanın birden fazla amaç için uygulanması

Bir önceki bölümde anlatılan tek amaç için tersine tasarım algoritması ile birden fazla amaç için hazırlanmış hedef öncelikli algoritma arasında işleyiş bakımından herhangi bir farkı bulunmamaktadır. Eşitlik 2.5'te birden fazla amaç için yapılmış dalga denklemi gösterilmektedir.

$$\nabla \times \varepsilon^{-1} \nabla \times \mathbf{H}_i - \mu_0 \omega_i^2 \mathbf{H}_i = \nabla \times \varepsilon^{-1} \mathbf{J}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.5)$$

Burada, m farklı amaç sayısını, ω_i açısal frekansları, ε malzemenin dielektrik sabitini, \mathbf{H}_i , ω_i açısal frekansındaki manyetik alanları, μ_0 boşluktaki geçirgenliği, \mathbf{J}_i , ω_i 'daki akım yoğunluğunu göstermektedir.

Amaçlanan hedef(ler) doğrusal cebir dilinde formüle edilerek ve gerekli değiştirmeleri uygulayarak, alanlar önce performans hedeflerini yerine getirmeye zorlanır ve Maxwell denklemlerini karşılamaya çalışılarak fiziksel kalıntılar en aza indirilir (Y. Chen vd., 2008) Bu şekilde, alan ve yapı iki alt problem Denklem 2.6'da görüldüğü gibi dönüşümlü iteratif olarak değiştirilerek yapı elde edilir,

for

$$\min_{\mathbf{H}_i} \|A_i(\varepsilon^{-1})\mathbf{H}_i - b_i(\varepsilon^{-1})\|^2 \text{ hedef } f(\mathbf{H}_i) = f_{i,ideal},$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$\min_{\varepsilon^{-1}} \sum_i \|C_i(\mathbf{H}_i)\varepsilon^{-1} - d_i(\mathbf{H}_i)\|^2 \text{ hedef } \varepsilon_{min}^{-1} \leq \varepsilon^{-1} \leq \varepsilon_{maks}^{-1},$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

end for

Burada,

$$A_i(\varepsilon^{-1}) = \nabla \times \varepsilon^{-1} \nabla \mathbf{x} - \mu_0 \omega_i^2,$$

$$b_i(\varepsilon^{-1}) = \nabla \times \varepsilon^{-1} \mathbf{J}_i,$$

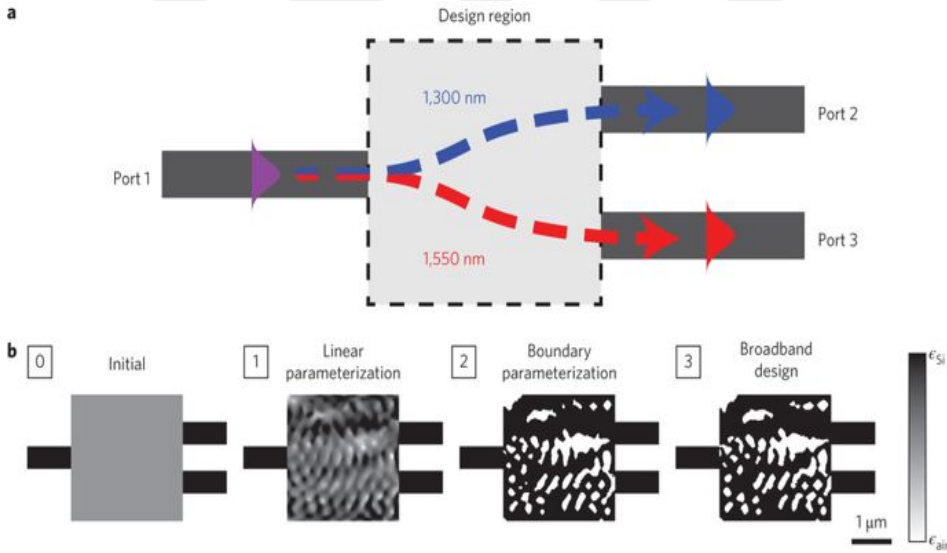
$$C_i(\mathbf{H}_i) = \nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}_i) - \nabla \times \mathbf{J}_i,$$

$$d_i(\mathbf{H}_i) = \mu_0 \omega_i^2 \mathbf{H}_i$$

$f_{i,ideal}$, $\| \|^2$, $\|A_i(\varepsilon^{-1})\mathbf{H}_i - b_i(\varepsilon^{-1})\|^2$ ve $\|C_i(\mathbf{H}_i)\varepsilon^{-1} - d_i(\mathbf{H}_i)\|^2$ sırasıyla; i 'inci amacın arzulanan elektromanyetik davranışı, Öklid operatörü, alan ve yapı alt probleminin fiziksel kalıntısıdır. Alan alt problemi ve yapı alt problemi, sırasıyla doğrusal eşitlik ve doğrusal eşitsizlik kısıtlamaları olan ikinci dereceden problemlerdir. Ve alan alt problemi, bir faktör çözüme yöntemi [46] kullanılarak kolayca çözülebilirken, yapı alt problemi CVX MATLAB paketi (Grant, M. ve Boyd, S., 2014) kullanılarak çözülebilir. Böylece, nihai yapı sürekli dielektrik dağılıma sahip olarak elde edilmiş olur. Bu tez çalışmalarında dielektrik limitler sürekli dizayn için

silisyum elementi temelinde üretim yapılacağı temel alınarak $\epsilon_{air}^{-1} \leq \epsilon^{-1} \leq \epsilon_{Si}^{-1}$ aralığında seçilmiştir.

Amaç sayısının artması ile problem daha kompleks hale gelmekte ve böylece nihai sonucun global optimaya yaklaşması yani başka bir ifade ile fiziksel kalıntı miktarımız artacaktır. Ve bunun sonucu olarak verimde azalış beklemek hata olmayacaktır. Literatürde bunun en güzel örneklerinden biri Şekil 2.3'te gösterilen Piggott A. vd. tarafından yayınlanan iki kanallı dalgaboyu ayırıcı makalesinde görülmektedir. Yukarıda Şekil 2.2'de gösterilen tek hedefli yapı neredeyse yüzde yüz verimlere ulaşırken burada yapı hedefi arttığı için exponansiyel olarak algoritmaya zorluk yüklemekte ve rapor edilene göre yüksek kapasiteli bilgisayarlar ile günlerce süren iterasyonlar görülmüştür. Şekil 2.3(a)' da yapı genel şemasını görürken (b)' de ise yapının nihai üretilebilir safhaya gelmesi için uygulanan ek yöntemler ve sonuçta elde edilen ayrıklaştırılmış yapı gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Tersine dizayn algoritmasında yapını sürekli dielektrik dağılıma sahip olan çıktısından çeşitli ayrıklaştırma yöntemleri uygulanarak elde edilen ayrık sonuç yapısının gösterimi (Piggott A. vd., 2016)

Pratikte, fotonik cihazlar, yalnızca silikon ve havadan oluşan ikili yapılar gibi bir dizi malzeme yoluyla ayrı bir dielektrik dağılımına sahiptir. Bu ayrıklaştırma sürecine farklı yaklaşımlar uygulanabilir. Anlatılanlar ışığında hedef öncelikli algoritma tasarımcılara yani bizlere yüksek verimli kompakt, dayanıklı ve sınırsız serbestlik derecesi vermektedir. Ancak ek bir yöntem uygulamadan çıkan yapının üretimi

imkansıza yakındır. Bu sebeple ortaya ek bir mühendislik koyarak yapıyı ayırık hale getirmemiz şarttır.

2.1.3. Hedef öncelikli tersine tasarım yöntemi ile ayırıklaştırma

Tersine tasarlanmış yapıda elde edilen yalıtkan dağılımın çeşitli ayırıklaştırma yöntemleri ile üretilebilir yapılara dönüştürülmesi mümkün olmaktadır (Callewaert vd., 2016).

En basit yöntem belirlenen bir eşik değerinden, $\varepsilon_{eş}$, büyük değerleri silisyumun dielektrik değerine yakınsatırken küçük değerleri havanın dielektrik değerine götürmektir. Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse ($\varepsilon > \varepsilon_{eş}$ için $\varepsilon = \varepsilon_{silisyum}$ ve $\varepsilon \leq \varepsilon_{eş}$ için $\varepsilon = \varepsilon_{hava}$). Burada $\varepsilon_{eş}$ değerinin seçimi performans kriterleri için çok önemli olmaktadır. Bu değer numerik olarak her bir tasarım için tekrar belirlenmelidir. Bu ayırıklaştırma işlemini seviye ayırıklaştırması olarak adlandırabiliriz. Seviye ayırıklaştırma yönteminin verimliliği sürekli dielektrik dağılıma sahip yapının dağılımına son derece bağlıdır. Eğer yapı belirlenen dielektrik sabitleri aralığının uç değerleri yerine ara değerlerde yoğunlaşmış ise seviye ayırıklaştırma yöntemi ile başarılı sonuç almak zordur. Bu sebeple dielektrik dağılım bulunurken yapının ayırık olmasına yönelik bir maliyetin tanımlandığı optik diyot tasarımında literatüre sunulan ayırıklaştırma maliyetli yöntemine benzer bir yaklaşım kullanılabilir. Bu yöntemde de öncelikle oluşan sürekli dielektrik dağılımlı yapının fiziksel fazlalığını en düşük değer yapan $\varepsilon_{eş}$ değeri belirlenir. Dielektrik sabiti alt problemine yeni önerilen dağılımın, p , bir önceki iterasyonda üretilen sürekli dağılımın belirlenen $\varepsilon_{eş}$ 'ne göre seviye ayırıklaştırması yapılarak elde edilen ayırık dağılımdan, p_{bin} , farkının γ katı maliyet olarak amaç fonksiyonuna eklenmiştir. Matematiksel ifadesi Denklem 2.8'de verilmiştir.

$$\min_p \|B(x)p - d(x) + \gamma(p - p_{bin})\|^2. \quad (2.8)$$

Ayırıklaştırma maliyetli yöntemde γ katsayı ile yeni önerilen dağılımın ayırık dağılımdan ne kadar fazla uzaklaşabileceği sınırlandırmaktadır. Tabii ki hala CVX paketinden kaynaklanan çözümümüz, p , sürekli dağılıma sahip olmaktadır. Bu sebeple

aynı çalışmada yapının ne kadar ayırık olduğunu gösteren B parametresi Denklem 2.9'deki gibi tanımlanmıştır.

$$B = \text{ortalama} \left| 2 \frac{\varepsilon - \varepsilon_{hava}}{\varepsilon_{silisyum} - \varepsilon_{hava}} - 1 \right|. \quad (2.9)$$

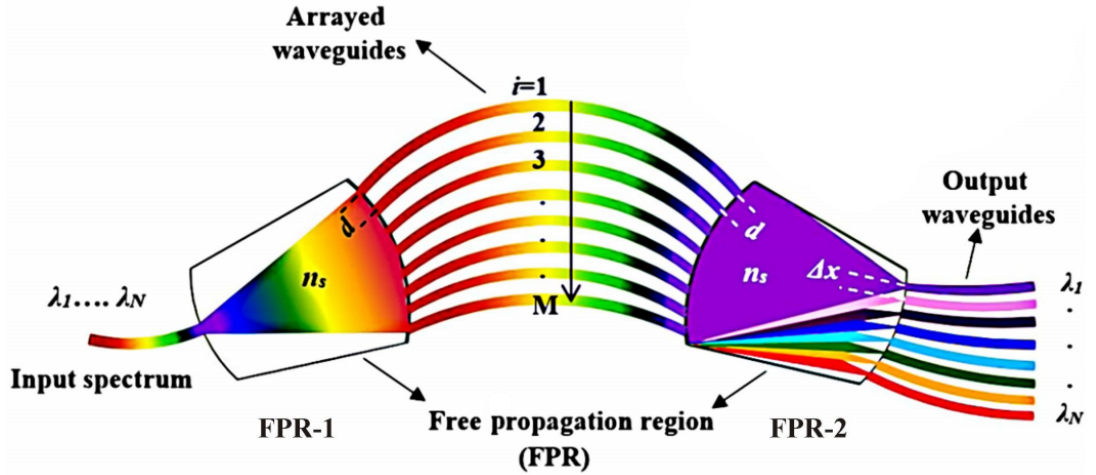
B değeri en iyi durumda yani yapının tamamen ayırık olduğu halde 1 en kötü durum olan yapının tamamen silisyum ve havanın dielektrik sabitinin ortalamasında olduğunda 0 değerini almaktadır. Yani yapı ne kadar ayırık ise B değeri 1'e yaklaşmaktadır. Algoritmanın ürettiği yapının B parametresi ne kadar 1'e yakınsa yapı tamamen seviye ayrıklaştırılması ile ayrıklaştırıldığında performans kriterlerinde kabul edilebilir değişimler olacaktır.

Genellikle, nanofotonik cihazlar analitik olarak tasarlanmış bir yapıdan başlayarak tasarlanır ve sadece birkaç parametre elle ayarlanır (Reed vd., 2008). Güçlü optimizasyon algoritmaları kullanarak bu işlemi otomatikleştirmek son yıllarda giderek daha popüler hale geldi. Tam parametre alanı ararken daha az yer kaplayan ve yüksek performanslı cihazlar tasarlamak mümkündür (Lu vd., 2013; Piggot vd., 2015). Keyfi topolojilerle tasarım yapmak üretim zorluklarını ortaya çıkarmaktadır, hesaplamalı olarak tasarlanmış yapıların çoğu, endüstriyel standartlardaki optik litografi yöntemi ile çözümülemesi zor özelliklere sahiptir.

3. DALGABOYU ÇOĞULLAYICI VE TEKİLLEYİCİ TASARIMI

Son zamanlarda insanların teknolojiye, teknolojinin de insana olan talebi önlenemez bir biçimde yükselmektedir. Bu ihtiyaca cevap vermek için ülkeler, büyük şirketler haberleşme teknolojilerine milyarlarca Amerikan doları yatırım yapmakta ve talep edilen hız ve büyük veriye karşılık vermeyi amaçlamaktadırlar. Dalgaboyu çoğullayıcı (DBÇ) sistemleri talep edilen bu hızın fiber optik haberleşme sistemlerinde efektif olarak kullanılmasına sağladığı ekonomik çözümler ve verinin doğru bir şekilde iletilmesi avantajlarından büyük katkılar sağlamıştır.

Günümüzde DBÇ sistemleri Şekil 3.1’de de görüleceği üzere dizili dalga kılavuzu ızgarası (AWG) yapıları ile sağlanmaktadır. Tasarımcı bu sayede birden fazla dalgaboyunu ilgili çıkış için kullanabilmektedir. Ancak bu cihazların kompakt ve yüksek verimli olarak tasarlamak oldukça zordur. Literatürdeki yapı boyutları birkaç mm’den onlarca mm’ye kadar değişmekte ve tasarımcıya limitli bir değişim alanı bırakmaktadır.



Şekil 3.1: Dizili dalgakılavuzu ızgarayapılarının DBÇ için kullanılmasının şematik olarak gösterimi (Ali S. A. vd., 2017).

Bu sebeple modern teknolojik kabiliyetlere uygun olacak küçüklük ve verimlilikte DBÇ tasarımı elzem hale gelmiştir.

3.1. Hedef Öncelikli Algoritmanın Problem İçin Uygun Hale Getirilmesi

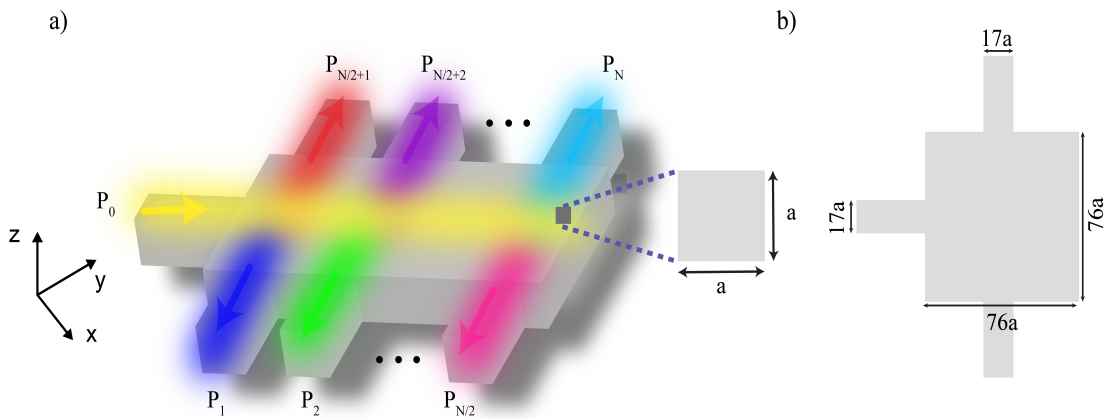
Dalgaboyu çoğullayıcı sistemleri (DBÇ) adından da anlaşılacağı üzere optik dalgaboyunu arzulan çıkış portuna yönlendiren ve böylece tek bir fiber optik kabloda çok daha fazla bilgi taşınmasını sağlayan cihazlardır. Bilgi kapasitesi tasarlanan DBÇ'nin verimli bir şekilde ayırabileceği dalgaboyuna bağlıdır. Ancak günümüzde maliyet ve bir eniyileme bir cihazın veya bir konunun geleceğini belirlemektedir. Küçük çip teknolojileri neredeyse tek atom seviyesine inerken artık büyük boyutlu ve problemleri cihazlardan bahsedemeyeceğimiz de açıktır. Bu sebeple haberleşme sistemlerinde kilit rol oynayan fiber optik haberleşme sistemleri de bu trendi yakalamaktadır. DBÇ sistemleri de haliyle verimliliklerinden pek bir şey kaybetmeden küçülmeli ve bu yüksek bant iletim talebine karşılık vermelidirler. Bu sebeple optimizasyon algoritmaları ve üretilebilirlik baz alınarak tasarladığımız DBÇ'ler oldukça önem arz etmektedir.

Literatürde, geleneksel yöntemlerle tasarlanmış DBÇ'lere, dalga kılavuz ızgaraları (Sasaki K. vd., 2005), echelle grating çoklayıcı yapılarında (Horst, F. vd., 2009), halka rezonator dizilerinde (Little, B. E. vd., 2004) rastlanmaktadır ve bunlar oldukça büyük boyutları ile on mikrometreden yüzlerce micrometreye çıkan yapıları içlerinde barındıran yapılardır.

3.2. Yöntem Ve Sonuçlar

Hedef-öncelikli algoritma kullanılarak yüksek verimli ve ultra kompakt $1 \times N$ T-kavşak DBÇ sistemleri tasarlanmıştır. Bu çalışmada sunulan tasarımlar; 1×2 , 1×4 ve 1×6 DBÇ'lerdir. Bu çalışma ve geçmişteki ilgili çalışmalar arasındaki fark, altı kanala kadar en büyük dalgaboyu seçiminin yanı sıra yapıların çoklayıcı olarak eşzamanlı ters çalışmasını gerçekleştirilmesidir. Bu çalışmada, DBÇ'lerin istenen işlevselliği, her bir çalışma dalgaboyunda iletim verimliliğinin maksimumuna ulaşmasıdır. FDTD, belirtilen dalga boylarında iletim verimliliğini doğrulamak ve önerilen DBÇ'lerin spektral iletimini elde etmek için kullanılmıştır (J. Lu vd., 2013, A. Alpkilic vd., 2020, Y. Yılmaz vd., 2019). İkinci bölümde anlatıldığı gibi, hedef-öncelikli ters tasarım metodolojisi iki adımda uygulanır: ilk olarak konveks optimizasyonun bir ürünü olarak elde edilen sürekli dağılıma sahip tasarım elde edilir ve daha sonra ayrıklaştırma yöntemi ile tasarım üretilebilir hale yani sadece iki maddeden meydana gelmiş hale çevrilir.

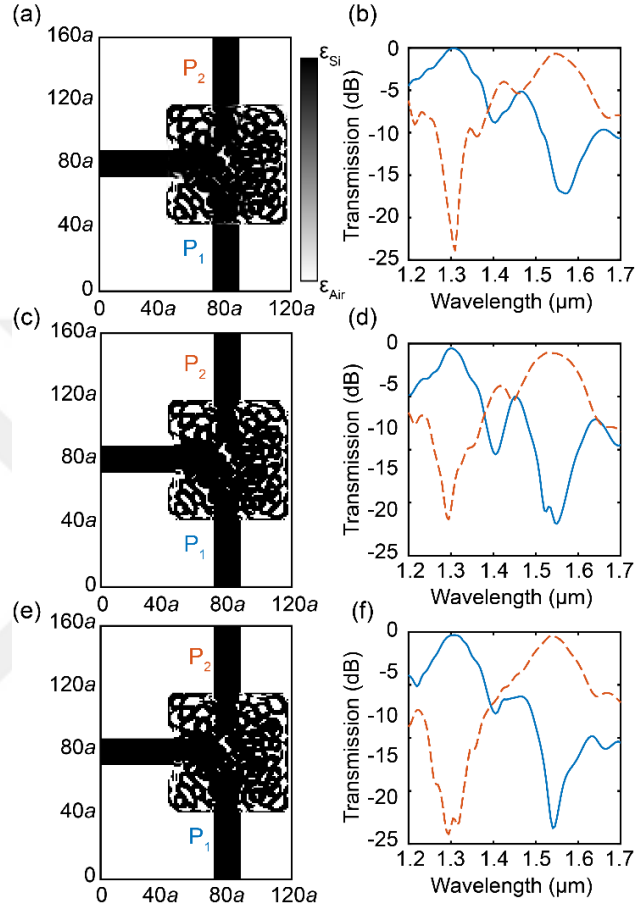
Tasarlanan $1 \times N$ dielektrik iki boyutlu DBÇ'lerin şematik bir temsili Şekil 3.1.'de gösterilmektedir. Yapılardaki çıkış dalga kılavuzları, giriş dalga kılavuzu kanallarına göre enine kenarlara dik konumlandırılmıştır (T-kavşak). T-kavşak konfigürasyonunun Y-kavşak konfigürasyonuna göre avantajı, çıkış portlarının tek bir karşılıklı kenar yerine iki enine kenara yerleştirilmesidir, böylece daha fazla çıkış portu sağlayabilir ve diğer optik sistemlere çeşitli montaj seçenekleri sunabilir. Tüm DBÇ'lar, temel TE polarizasyonuna sahip bir ışık kaynağı için tasarlanmıştır (E_x, E_y, H_z 'nin sıfır olmayan bileşenleri ile). Hesaplama alanı, olası geri yansımaları ortadan kaldırmak için mükemmel uyumlu katmanlarla (PML) çevrilidir (Berender, 1994). Hedef dalga boyları, en kısa dalgaboyu P_1 'e yönlendirilirken, en uzun dalgaboyu P_N 'ye yönlendirilecek şekilde port numaralarıyla ilişkilendirilmiş ve dalga boyları telekomünikasyon bantları dikkate alınarak tanımlanmıştır. Örgü sabiti, birim hücrenin fiziksel boyutlarını ifade eden parametredir ve bu çalışmada 37 nm olduğu belirlenmiştir, örgü sabiti değeri imalat işlemi için oldukça küçük görünebilir, ancak Vučković ve ark. elektron ışını litografisi (EBL) kullanılarak aynı örgü sabitine sahip nanofotonik cihazlar üretmişlerdir. Dalga kılavuzlarının genişliği $17a$ (629 nm) olarak belirtildi. Tüm sürekli yapıların başlangıç dielektrik sabiti silisyumun elektrik geçirgenliğine ayarlanmıştır (12.25). Yukarıda sözü edilen epsilon eşik ve ayrıklaştırma -maliyet yöntemleri, sürekli yapıların ayrıklaştırılması için kullanılmıştır.



Şekil 3.2: Dalgaboyu çoğullayıcı gösterimi. (a) Üç boyutlu cihaz gösterimi ve birim hücre boyutu. (b) 1×2 dalgaboyu çoğullayıcı yapısının genişlik ve boyut bilgilerinin gösterimi.

Şekil 3.2'den görülebileceği üzere gelen spesifik dalgaboyu amaçlanan çıkış portuna yönlendirilmektedir. Burada portların birbirlerine olan konumları kanalların birbirine

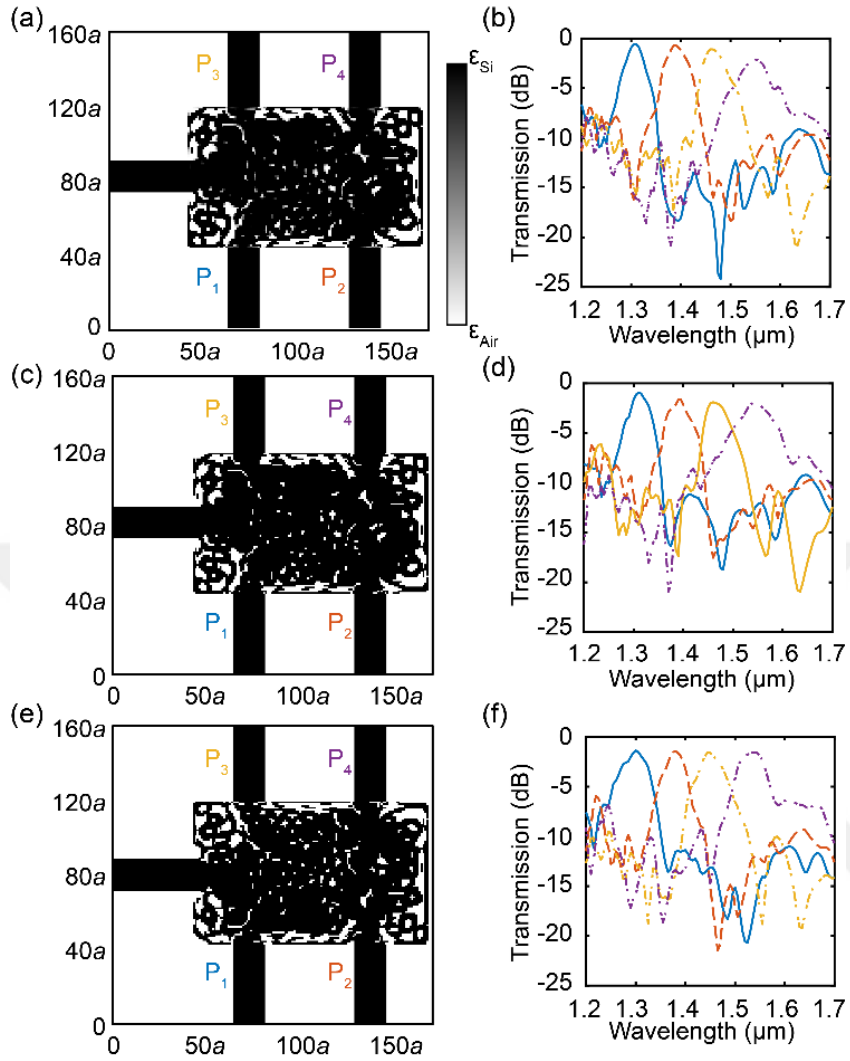
üzerine olan kayıp etkini azaltıp artırmaktadır. Bu sebeple tasarım sırasında dalga kılavuzlarının konumları parametrik olarak taranmıştır. Port genişliklerinin 16 a olması temel TE mod polarizasyonuna sahip dalganın mod genişlemesine ve başka modların oluşmasına mahal vermemek için Lumerical mod çözücünde ayrıca test edilmiştir.



Şekil 3.3: (a) Sürekli dağılıma sahip sürekli dielektrik 1×2 T kavşak DBÇ, (b); (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ϵ_{th} method kullanılarak elde edilmiş ayrıklaştırılmış yapı, (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (e) ayrıklaştırma-maliyet fonksiyonu ile elde edilmiş ayrıklaştırılmış DBÇ (f) (e) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.

Şekil 3.3, $2.80 \mu m \times 2.80 \mu m$ 'lık ($76a \times 76a$) kapladığı, tersine tasarlanmış 1×2 ultra kompakt fotonik çoğullayıcı cihazlarını göstermektedir. Şekil 3.3(a)'da kesintisiz dielektrik dağılımlı cihaz yaklaşık olarak 6 saatte elde edildi. Şekilde gösterildiği gibi, DBÇ $1.2-1.7 \mu m$ aralığında geniş bant ışığı, iki hedef dalgaboyuna $1.31 \mu m$ (O-bandı) ve $1.55 \mu m$ (C-bandı) sahip ışınlara böler. Şekil 3.3(a)'daki cihazın iletim spektrumları Şekil 3.3(b)'de sunulmaktadır. İletim verimliliği, $1.31 \mu m$ 'de -0.06 dB ve $1.55 \mu m$ 'de -0.70 dB idi, bu da % 85'den daha yüksek verimde oldukça umut vericidir. Çalışma

dalga boylarındaki çapraz girişim ihmal edilebilir derecede küçüktür, sırasıyla -26.01 ve -13.88 dB ve ilgili çıkış portlarında hesaplanmıştır. Ayrıca, Şekil 3.3 (c), Şekil 3.3 (a) yapısındaki epsilon eşik yöntemi ile elde edilen ($\epsilon_{th}=4.5$) ayrıklaştırılmış yapıyı ile göstermektedir. Optimal ϵ_{th} sayısal olarak hesaplanmış, böylece fiziksel artık en aza indirilmiştir. Şekil 3.3 (d)'de gösterilen epsilon eşik ayrıklaştırılmış yapısının iletim verimleri, -13.58 ve -12.78 dB çıkış noktalarında çapraz girişime ek olarak, sırasıyla $1.31 \mu\text{m}$ 'de -0.59 dB ve $1.55 \mu\text{m}$ 'de -0.95 dB olarak elde edilmiştir. Sürekli ve epsilon eşik tasarımları ile karşılaştırıldığında, Şekil 3.3 (a)'daki yapı esas olarak silisyumdan oluşur ve gri yapının B parametresi 0.94'tür. Böyle yüksek B parametresinin nedeni, sürekli tasarımın başlangıç dielektrik sabitinin silisyumun dielektrik sabitinin değeri olmasıdır. T-kavşak 1×2 DBÇ'lerin bir başka çalışmasında, ayrıklaştırılmış yapı ayrıklaştırma-maliyet yöntemiyle elde edilmiştir, burada $\epsilon_{th}=6$ alınırken $\gamma = \text{iterasyon} \times 10^{-12}$ yani her bir iterasyonda sabit 10^{-12} artış gösterecek şekilde belirlenmiştir. Bu sürekli yapının B değeri 0.98'dir ve iletim verimleri -0.04 ve -0.265 dB'dir. İterasyon sayısının 15,000'e yükselmesi gerekir (yaklaşık olarak 9 saat sürer) çünkü algoritma, iki dalgaboyu için performans kriterleri sağlamanın yanı sıra ayrıklaştırma işlemini gerçekleştirmeye çalışmasıdır. Şekil 3.3 (e), ayrıklaştırma-maliyet yöntemi kullanılarak elde edilen ayrıklaştırılmış yapıyı göstermektedir. İletim verimleri, hedeflenen dalgaboyunun artan sırasına göre -0.30 ve -0.54 dB'dir ve çapraz girişim, $1.31 \mu\text{m}$ için -17.80 dB ve $1.55 \mu\text{m}$ için -15.29 dB'dir. Şekil 3.3 (d) ve (f)'de, $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda iletim değerindeki artışa ek olarak, $1.40 \mu\text{m}$ civarında istenmeyen tepe noktasının uzaklaştırıldığı açıktır. Kanal konfigürasyonu 1×4 olan diğer DBÇ tasarımları, Şekil 3.4'te sunulmaktadır. Tasarımlar, eklenen kanalların yayılma doğrultusu boyunca uzatılmakta ve sonuçta $4.60 \mu\text{m} \times 2.80 \mu\text{m}$ ($76a \times 124a$) yer kaplamaktadır. 1×4 T-eklem DBÇ'nin sürekli dielektrik dağılımı Şekil 3.4. (a)'da gösterilmiştir, burada simülasyon yaklaşık olarak 18 saat sürmüştür. Şekil 3.4. (b), $[1.20-1.70] \mu\text{m}$ dalgaboyu aralığındaki transmisyonları gösterir, burada tasarım nihai dalga boylarında yüksek iletim verimliliği sağlamaktadır: $1.31 \mu\text{m}$ 'de -0.57 dB, $1.39 \mu\text{m}$ 'de -0.71 dB (E-bandı) $1.47 \mu\text{m}$ 'de -1.25 dB (S-bandı) ve $1.55 \mu\text{m}$ 'de -2.11 dB. Yüksek iletim performansına ek olarak, cihazın çapraz girişim değerleri $[-13.05 - -16.66]$ dB aralığındadır. Şekil 3.4. (a)'daki yapı için sayısal olarak belirlenmiş bir $\epsilon_{th}=4.3$ olan epsilon eşik yönteminden kaynaklanan ayrıklaştırılmış yapının dielektrik dağılımı Şekil 3.4. (c)'de gösterilmektedir ve normalleştirilmiş iletim verimleri Şekil 3.4. (d)'de verilmektedir.

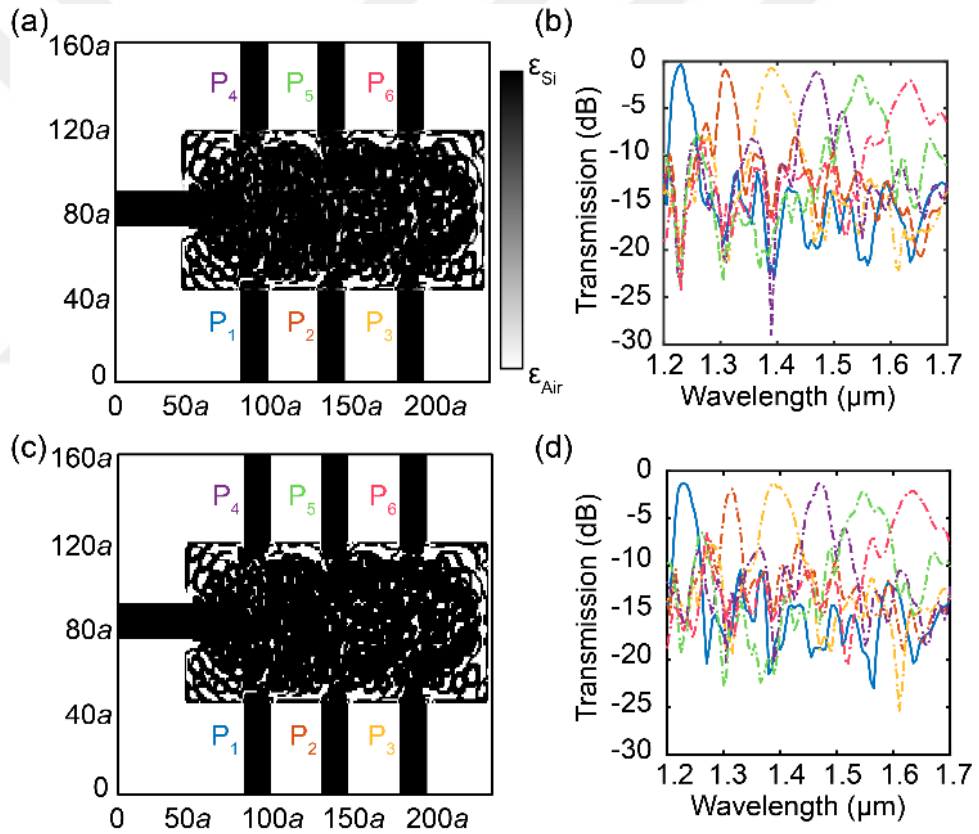


Şekil 3.4: (a) Sürekli dağılıma sahip sürekli dielektrik 1×4 T-kavşak DBC, (b); (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ϵ_{th} method kullanılarak elde edilmiş ayrıklaştırılmış yapı, (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (e) ayrıklaştırılma-maliyet fonksiyonu ile elde edilmiş ayrıklaştırılmış DBC (f) (e) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.

Şekil 3.4. (d)'de sunulan epsilon eşik ayrıklaştırılmış yapısının iletim verimleri, $1.31 \mu m$ 'de -0.92 dB, $1.39 \mu m$ 'de -1.65 dB, $1.47 \mu m$ 'de -2.07 dB ve $1.55 \mu m$ 'de -2.23 dB'dir. Şekil 3.4. (a)'daki sürekli yapının B değeri 0.95 olduğundan, yapı epsilon eşik yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmış hale getirildiğinde iletim değerlerinde kabul edilebilir bir azalma vardır.

T-bağlantı 1×4 DBC'lerin bir başka çalışmasında, sürekli yapı $\epsilon_{th} = 6.0$, $\gamma = 10^{-12}$ iterasyon sayısı ile ayrıklaştırılma-maliyet yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve yaklaşık

olarak 26 saat sürmüştür. Bu sürekli yapının B değeri 0.97'dir ve iletim verimleri $1.31 \mu\text{m}$ 'de -1.02 dB , $1.39 \mu\text{m}$ 'de -1.10 dB , $1.47 \mu\text{m}$ 'de -1.16 dB ve $1.55 \mu\text{m}$ 'de -1.18 dB 'dir. İkileştirme-maliyet yöntemi kullanılarak elde edilen ayrıklaştırılmış yapı, Şekil 3.4. (e)'de gösterilmiştir. Şekil 3.4. (f)'de, ayrıklaştırma-maliyet, ayrıklaştırılmış yapının iletim verimlilikleri, $1.31 \mu\text{m}$ 'de -1.86 dB , $1.39 \mu\text{m}$ 'de -1.89 dB , $1.47 \mu\text{m}$ 'de -1.77 dB ve $1.55 \mu\text{m}$ 'de -1.87 dB 'dir ve çapraz girişim yaklaşık -13 dB civarındadır. 1×2 tasarımla karşılaştırıldığında, sürekli ve ayrıklaştırılmış yapılar arasındaki iletim verimliliğindeki farkın yüksek olmasının nedeni 1×4 tasarımdaki daha fazla hedefin olmasıdır. İkileştirme-maliyet yönteminde, ayrıklaştırma maliyetinin ve her bir frekansın fiziksel artıklarının toplamı en aza indirildiği için, ayrıklaştırma etkisi artan frekans ile azalmaktadır.

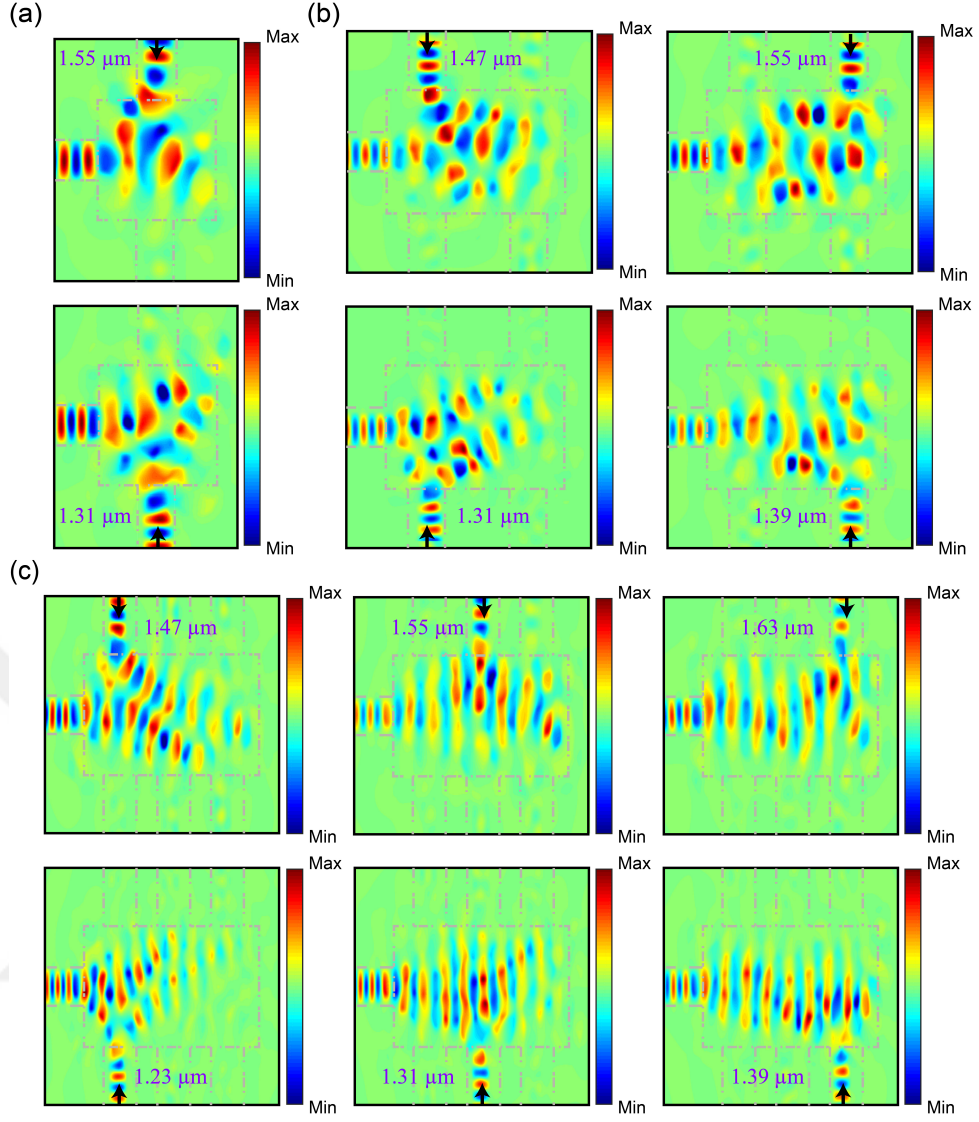


Şekil 3.5: (a) Sürekli dağılıma sahip sürekli dielektrik 1×4 T-kavşak DBC, (b); (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ϵ_{th} method kullanılarak elde edilmiş ayrıklaştırılmış yapı, (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.

Bu çalışmada kullanılan tasarım yaklaşımının daha fazla doğrulanması için, Şekil 3.5.'te gösterildiği gibi $6,95 \mu\text{m} \times 2,80 \mu\text{m}$ ($76a \times 192a$) küçük cihaz boyutlarına sahip 1×6 DBC'ları test edilmiştir. Altı çıkış portuna sahip tersine tasarlanmış bir DBC'nın

ilk gösterimi. Şekil 3.5. (a)'da gösterilen sürekli dielektrik dağılıma sahip cihaz yaklaşık 110 saatte tasarlanmıştır. Yapının karmaşıklığı nedeniyle, simülasyon süresi diğer yapılara göre önemli ölçüde artmıştır. [1.20-1.70] μm dalgaboyu spektrumlarını kapsayan iletim değerleri Şekil 3.5. (b)'de verilmektedir. Önerilen $1 \times N$ DBC sisteminin diğer yapılarında olduğu gibi, 1×6 T-eklem DBC cihazı, tanımlanmış dalga boylarında 1.23 μm 'de (daha kısa dalgaboyu) -0.90 dB 1.31 μm , 1.39 μm 'de -0.70 dB, 1.47 μm 'de -1.14 dB, 1.55 μm 'de -1.80 dB ve 1.63 μm 'de -2.12 dB (U-bandı) ultra yüksek aktarımlar sağladı. bu tasarımın önemli bir artışı çıkış kanallar arası mesafenin 80 nm gibi küçük bir değere sahip olmasıdır. Tasarlanan yapıda, dalgaboyunun artan düzeninde çıkış dalga kılavuzları için -25.63, -20.23, -21.72, -17.72, -16.63 ve -15.86 dB'de önemli ölçüde düşük çapraz girişim gözlemlenmiştir. $\epsilon_{th} = 4.3$ ile epsilon eşik yaklaşımı Şekil 3.5. (c)'de gösterilmiştir. Şekil 3.5. (d)'de, epsilon eşik yöntemi ile üretilen yapının iletim verimleri 1.23 μm 'de -1.33 dB, 1.31 μm 'de -2.13 dB ve 1.39 μm 'de -1.32 dB, 1.47 μm 'de -1.39 dB, - 1.55 μm 'de 2.25 dB ve 1.63 μm 'de -2.20 dB'dir ve cihazın çapraz girişim değerleri [-15.39 - -18.42] dB aralığındadır. Bu kabul edilebilir iletim verimliliği değerleri, dalgaboyu artmasına rağmen algoritmanın T-eklem DBC'ları başarıyla tasarladığını göstermektedir. İkileştirme-maliyet yaklaşımının performansı, artan dalgaboyu portları ile azalmıştır. İki dalgaboyu tasarımı için, epsilon eşik yönteminden daha iyiyken artan dalgaboyu sayısı ile, epsilon eşik yönteminin etkinliği, ayırıklaştırma -maliyet yönteminden daha yüksektir. Bu nedenle, 1×6 tasarımına ayırıklaştırma-maliyeti yaklaşımı uygulanmamıştır.

CVX optimizasyon paketi sadece bir global optimum üretir, bu özellik bize DBC'lerin dalgaboyu birleştirici olarak kullanmaya imkân sağlar, yani DBC yapısında giriş olarak kullanılan port, birleştiricide Şekil 3.6. (a), (b) ve (c) de gösterildiği gibi çıkış portu olarak tasarlanmıştır. Elektromanyetik cevap analizleri, Lumerical FDTD kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada, yüksek performanslı 2D $1 \times N$ çoğullayıcı yapıları önerilmiştir ve sayısal olarak doğrulanmıştır. Ortaya çıkan cihazlar, hepsi entegre fotoniklerin çeşitli uygulamaları için hayati önem taşıyan ultra yüksek iletim, oldukça küçük boyutlu, düşük çapraz gürültü ve nispeten dar dalgaboyu aralığı elde edilmiştir.



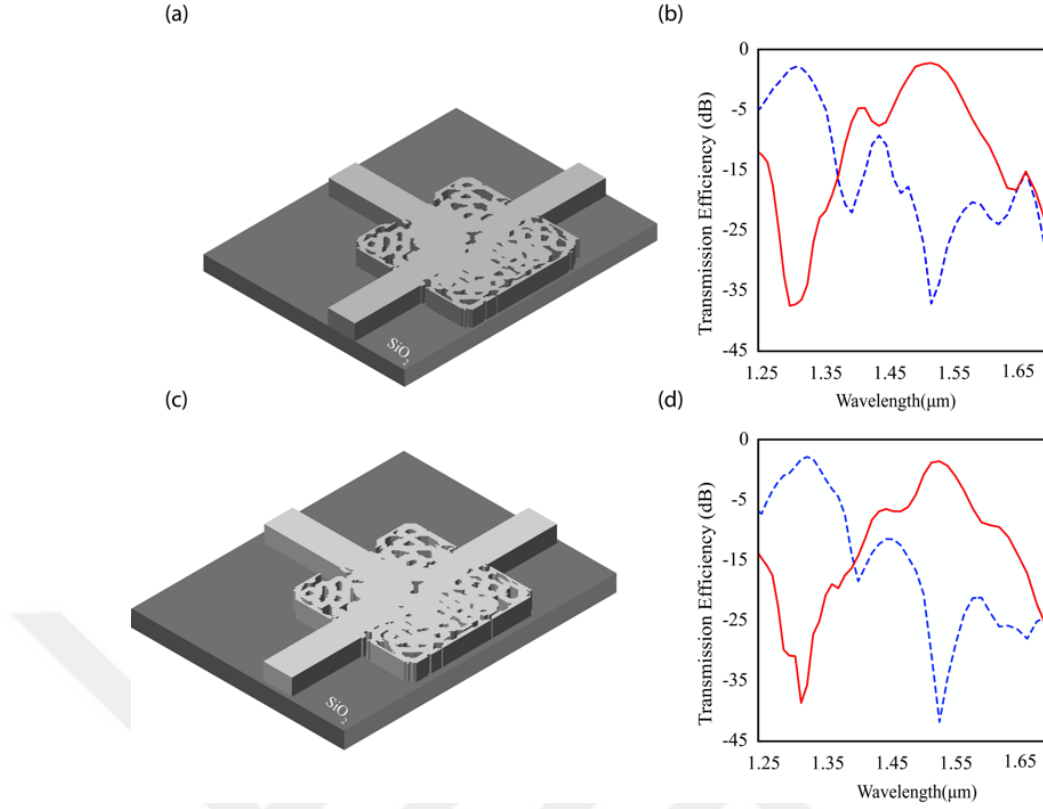
Şekil 3.6: Sürekli dielektrik dağılıma sahip yapının H-manyetik alan dağılımı, (a) 1×2 , (b) 1×4 ve (c) 1×6 T-kavşak çoğullayıcılar. Oklar optik dalganın giriş olarak verilen portunu göstermektedir.

Yakın zamanda önerilen ters tasarım algoritmaları kullanılarak uygulanan tüm dielektrik 2D $1 \times N$ T kavşaklı çoğullayıcı sistemleri, yeni nesil entegre fotonik devrelerde kullanım için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle, önerilen fotonik tasarımlar, minyatür optik bileşenlerin üstün özelliklerini gerektiren yeni nesil fotonik uygulamaları için umut vericidir. Üretim için hedef-öncelikli algoritma ile elde edilen yapıların hazırlanması süreci ilk önce ikilleştirme ile, diğer bir deyişle ayrıklaştırma ile başlar. Bu işlemden sonra, 2D analizi yapılır ve ideal olarak kalınlığın sonsuz uzunlukta olduğu varsayılır.

3.3. Dalgaboyu oğullayıcıların 3B Olarak Modellenmesi

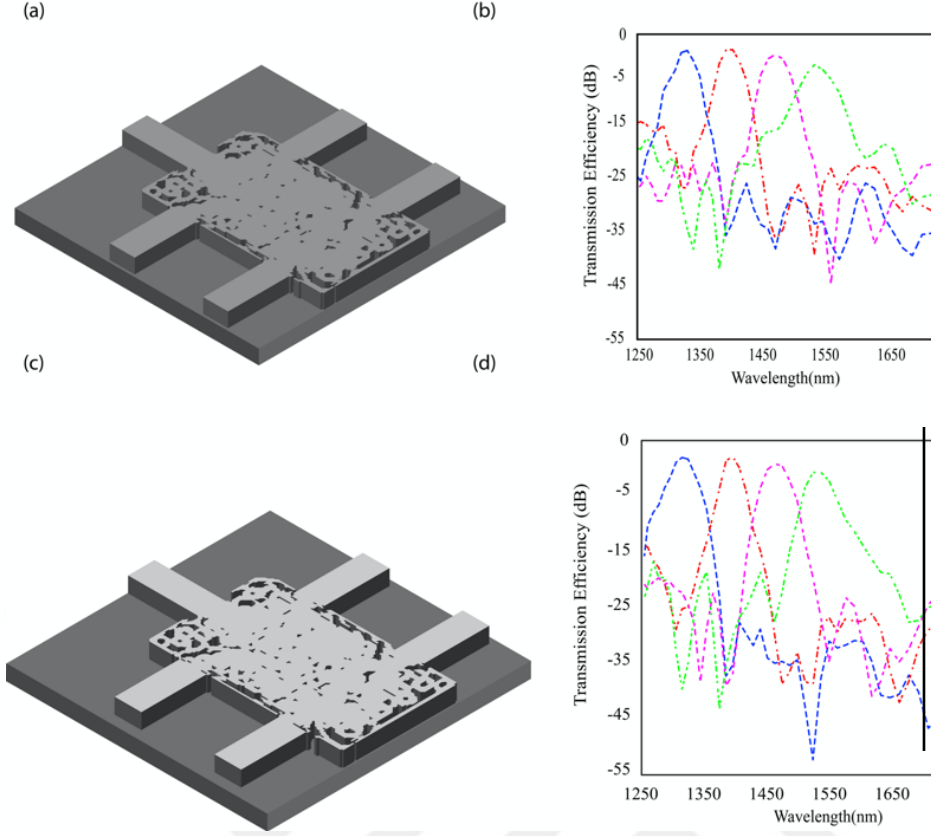
Sistemi gerçek hataya entegre etmek ve modellemek amacıyla 3B FDTD simülasyonları gerçekleştirildi. 3B yapı, Lumerical FDTD ile optimum kalınlık seçilerek belirlenen ve tüm tasarlanmış $1 \times N$ oğullayıcı yapıları için 300 nm'ye eşit olan belirli bir kalınlık atanarak elde edilmiştir. İki çıkışa sahip DB'lerin iletim verimliliği % 15-30 azalmıştır. Örneğin, 1×2 epsilon eşit methodu ile elde edilen yapıda iletim verimleri 1.31 μm 'de -1.98 dB ve 3B için 1.55 μm 'de -1.71 dB iken iletim verimleri 1.31 μm 'de -0.59 dB ve 2D için 1.55 μm 'de -0.95 dB'dir. Bu bilgiler ışığında, verimlilik değerlerini artırmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu sonucuna vardık. Tasarım ve üretim süreçlerindeki farklı optimizasyon teknikleri literatürde incelenmiştir. (Piggott, 2015). Bu çalışmaya göre, yapının üretimi sırasındaki kusurlar ve safsızlıklar nedeniyle cihaz verimliliği azalmıştır, ancak bu sorunlar tasarlanan cihazın işlevselliğinde herhangi bir olumsuz etkiye neden olmamıştır. İki boyutlu ayrıklaştırılmış yapılara z-ekseninde kalınlık atayarak 3B simülasyonları gerçekleştirilmiş. Kalınlık, Lumerical FDTD ile optimum değer seçilerek belirlenmiş ve tüm tasarlanmış $1 \times N$ oğullayıcılar için 300 nm olarak uygulanmıştır.

şekil 3.7, x, y ve z boyutlarında sırasıyla $2.80 \mu\text{m} \times 2.80 \mu\text{m} \times 0.30 \mu\text{m}$ 'lik boyuta sahip 3B 1×2 DB'leri göstermektedir. şekil 3.7. (a)'daki cihazın iletim spektrumları şekil 3.7 (b)'de sunulmaktadır. İletim verimliliği, şekil 3.7 (a)'da 3B ayrıklaştırılmış yapı için 1.31 μm 'de -1.98 dB ve 1.55 μm 'de -1.71 dB iken, iletim verimleri 1.31 μm 'de -0.59 dB ve 2D epsilon eşit methodu ayrıklaştırılmış yapısı için 1.55 μm 'de -0.95 dB'dir. Diğer taraftan, şekil 3.7 (c), ayrıklaştırma-maliyet yönteminden elde edilen 3B yapıyı göstermektedir ve şekil 3.7 (d)'de gösterilen iletim verimleri, sırasıyla 1.31 μm ve 1.55 μm için -1.73 dB ve -1.93 dB'dir. İkkileştirme-maliyet yöntemi kullanılarak elde edilen 2D ayrıklaştırılmış yapının hedeflenen dalgaboyu sırasının artan düzeninde -0,30 dB ve -0,54 dB iletim verimlilikleri vardır. 1×2 DB'ler için 2D ve 3B simülasyonlarının iletim verimliliği farkı yaklaşık %15'tir.



Şekil 3.7: (a) ϵ_{th} eşik method kullanılarak elde edilmiş tamamen dielektrik ayrıklaştırılmış 1×2 T-kavşak DBC, (b) (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ayrıklaştırma-maliyet fonksiyonu ile elde edilmiş ayrıklaştırılmış DBC (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.

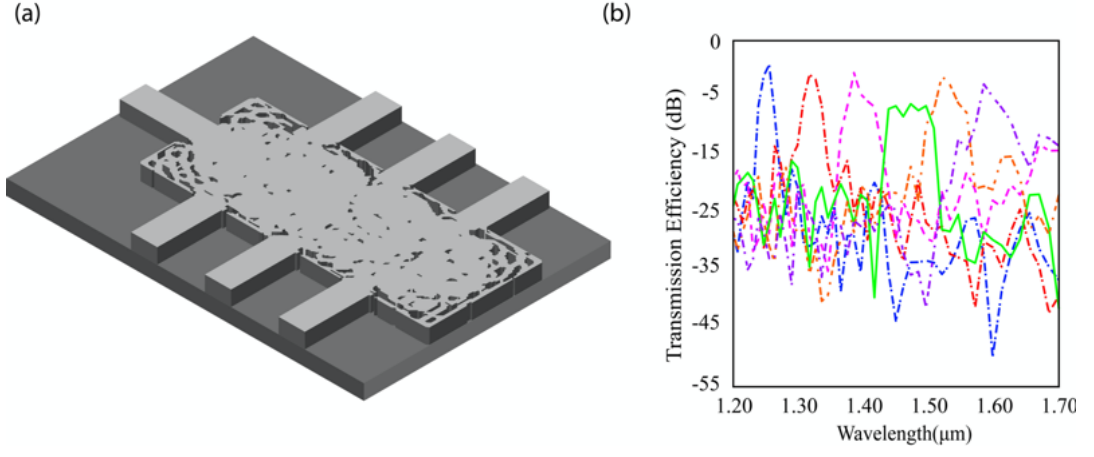
Şekil 3.8 kapladığı alan $4.60 \mu\text{m} \times 2.80 \mu\text{m} \times 0.30 \mu\text{m}$ olan ters tasarımlı 3B 1×4 DBC'leri göstermektedir. Şekil 3.8(b), $[1.20-1.70] \mu\text{m}$ aralığında, Şekil 3.8(a)'da ϵ_{th} yöntemi ile elde edilen yapının transmisyonlarını göstermektedir. Burada tasarım, nihai dalga boylarında yüksek iletim verimliliği sağlar: $1.31 \mu\text{m}$ 'de -2.87 dB , $1.39 \mu\text{m}$ 'de -3.10 dB , $1.39 \mu\text{m}$ 'de -3.62 dB $1.47 \mu\text{m}$ ve $1.55 \mu\text{m}$ 'de -3.88 dB . Sunulan epsilon eşik yöntemi ile ayrıklaştırılmış yapının 2D 1×4 'ün iletim verimleri $1.31 \mu\text{m}$ 'de -0.92 dB , $1.39 \mu\text{m}$ 'de -1.65 dB , $1.47 \mu\text{m}$ 'de -2.07 dB ve $1.55 \mu\text{m}$ 'de -2.23 dB 'dir. Şekil 3.8(c), ayrıklaştırma-maliyet yönteminden elde edilen 3B yapıyı göstermektedir. Verimlilikler, Şekil 3.8(d)'de gösterildiği gibi, sırasıyla $1.31 \mu\text{m}$, $1.39 \mu\text{m}$, $1.47 \mu\text{m}$ ve $1.55 \mu\text{m}$ için -2.94 dB , -2.79 dB , -3.54 dB ve -3.98 dB 'dir. İkili hale getirme maliyetinin 2D ayrıklaştırılmış yapının iletim verimleri, $1.31 \mu\text{m}$ 'de -1.86 dB , $1.39 \mu\text{m}$ 'de -1.89 dB , $1.47 \mu\text{m}$ 'de -1.77 dB ve $1.55 \mu\text{m}$ 'de -1.87 dB 'dir. 1×4 DBC'ler için 2D ve 3B simülasyonlarının iletim verimliliğindeki fark yaklaşık %25'tir.



Şekil 3.8: (a) ϵ_{th} method kullanılarak elde edilmiş tamamen dielektrik, ayrıklaştırılmış 1×4 T-kavşak DBÇ, (b) (a) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri, (c) ayrıklaştırma -maliyet fonksiyonu ile elde edilmiş ayrıklaştırılmış DBÇ (d) (c) yapısına ait normalize edilmiş dB cinsinden iletim verimliliği değerleri.

Şekil 3.9, ayak izi $6.95 \mu\text{m} \times 2.80 \mu\text{m} \times 0.30 \mu\text{m}$ olan ters tasarımı 3B 1×6 DBÇ'leri gösterirken, Şekil 3.9(a)'daki cihazın iletim spektrumları Şekil 3.9(b)'de sunulmaktadır. İletim verimleri $1.23 \mu\text{m}$ 'de -2.93 dB , $1.31 \mu\text{m}$ 'de -3.57 dB , $1.47 \mu\text{m}$ 'de -6.41 dB , $1.55 \mu\text{m}$ 'de -4.73 dB ve $1.63 \mu\text{m}$ 'de -5.11 dB 'dir. Epsilon eşik yöntemini oluşturan 2D yapının iletim verimleri $1.23 \mu\text{m}$ 'de -1.33 dB , $1.31 \mu\text{m}$ 'de -2.13 dB ve $1.39 \mu\text{m}$ 'de -1.32 dB , $1.47 \mu\text{m}$ 'de -1.19 dB , $1.55 \mu\text{m}$ 'de -2.15 dB ve $1.63 \mu\text{m}$ 'de -2.20 dB . 2D ve 3B simülasyonların iletim verimliliklerindeki en büyük fark $1.47 \mu\text{m}$ 'de gerçekleşir ve %50'ye eşittir. Diğer dalga boylarında ortalama %25'lik bir kayıp vardır. Kalınlık değeri 1×6 tasarım için optimize edilebilir, ancak hedeflerin sayısı arttığından hesaplama süresi önemli ölçüde artar.

Sonuç olarak, ayrıklaştırılmış çoğullayıcı tasarımlarının verimliliğinin üçüncü boyuta geçildiğinde %15-30 arasında azaldığını gösterdik. Yapı verim değerlerinin artırılması için mevcut yapılara ilave optimizasyon teknikleri uygulanabilir.



Şekil 3.9: (a) Epsilon eşik yöntemi ile elde edilmiş ful-dielektrik 3B 1×6 T-kavşak DBÇ 'nin gösterimi. (b) 3B 1×6 T-kavşak DBÇ 'nin normalize edilmiş dB cinsinden transmisyon verim değerleri.



4. MOD ÇOĞULLAYICI TASARIMI

Mod çoğullayıcı yapılar günümüz optik haberleşme sistemlerinin vazgeçilmez cihazları haline gelmiştir. Yüksek kapasiteleri veri talebini karşılamak amacıyla dalgaboyu çoğullayıcılar ile mod çoğullayıcı sistemlerin kullanılması hem ekonomik anlamda tasarruf sağlamış hem de giderek artan veri talebine karşılık verilmiştir. Mevcut teknolojinin hızla ilerlemesi ve daha verimli daha kompakt yapı ihtiyacının artması nedeniyle, mod çoğullayıcı yapılarda da daha küçük ancak daha yüksek verimli ve daha az enerji tüketen cihazların tasarımı ve üretimi zorunlu hale gelmiştir.

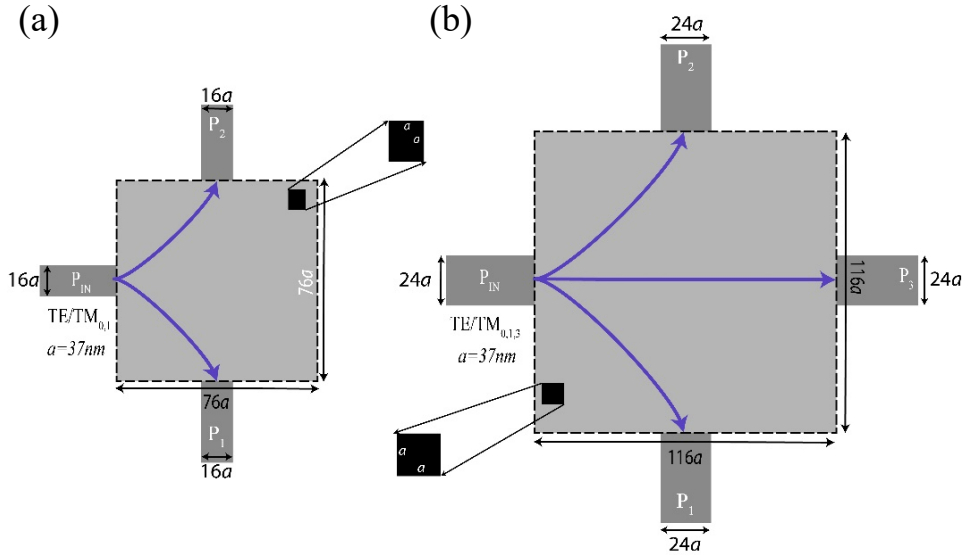
4.1. Hedef öncelikli Algoritmanın Problem İçin Uygun Hale Getirilmesi

Bütün bu gelişmeleri göz önüne aldığımızda hedef-öncelikli algoritma ile bu cihazın yüksek başarımla tasarımı gerçekleştirilmiştir. Böylece iki farklı mod yüksek verimlilikler ve çok küçük yapı boyutlarında başarı ile tasarlanmıştır. Şekil 3.8’de tasarlanan mod çoğullayıcı yapısının tasarım parametreleri gösterilmektedir. Hedef dalgaboyu 1.55µm olarak seçilmiştir ve çalışılacak modun dalga kılavuzunda oluşması için Lumerical FDE ile dalga kılavuzları çalışılacak maksimum moda göre optimize edilmiştir ve buna göre kalınlıklar tayin edilmiştir.

4.2. Yöntem Ve Sonuçlar

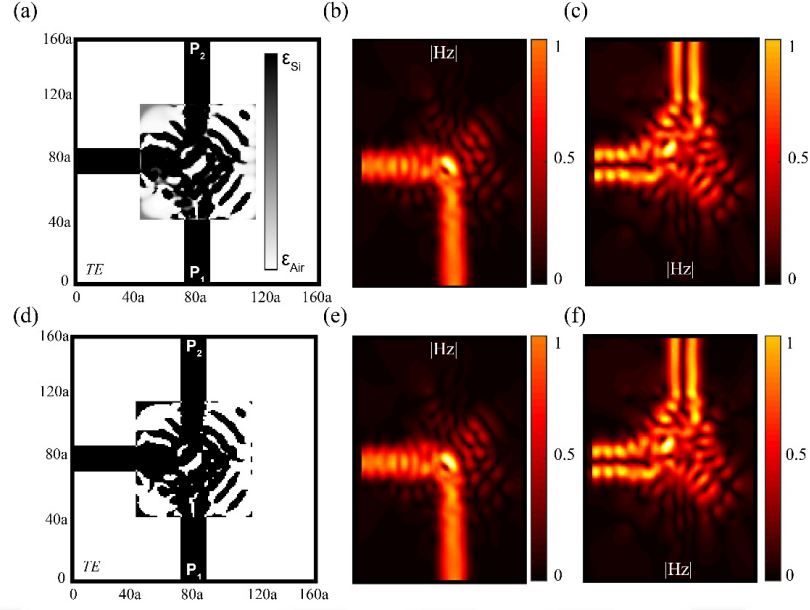
Çok küçük yapı boyutlarında ve son derece verimli enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) 1×2 ve 1×3 mod çoğullayıcılar geliştirilmiştir. Tasarlanan yapılarda, örgü sabiti 37 nm ve hedef dalgaboyu 1.55 µm olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda TE ve TM polarizasyon için farklı tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Buradaki sonuçlar (TE için H_z alanı, TM için H_z alanı) FDFD ve FDTD kullanılarak analiz edilmiştir. Tasarımlar, cihazın nihai işlevsellik hedefi olarak önceden tanımlanmış telekom dalga boylarında yüksek ışık yöneltilmiş ışınların tanımlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. İlk olarak hedef öncelikli algoritması kullanarak, sürekli dielektrik dağılıma yapılar elde edildi, elde edilen bu yapıların ayrıklaştırılmış hale getirilmesi için literatürde çeşitli yöntemler mevcuttur (Chang, W. vd.,2018) ancak biz elde edilen epsilon dağılımına

kontrollü bir yaklaşım uyguladık şöyle ki eğer epsilon değeri belirlediğimiz eşik değerinden büyükse o birim hücreyi silisyum küçük ise hava olarak kabul ediyoruz.



Şekil 4.1: TE / TM 0,1,2 mod çoğullayıcıların şematik gösterimi (a) yapı boyutu ve birim hücre boyutu ile (a)1 x 2 T-eklem, (b) 1 x 3 T-eklem.

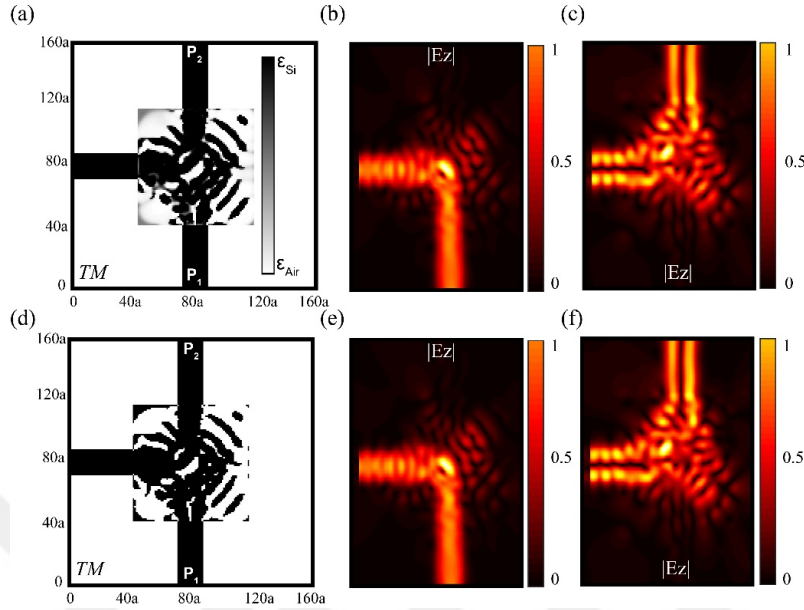
Buradaki yöntem dalgaboyu çoğullayıcı yapısında kullandığımız epsilon eşik metodu ile aynıdır. 1x2 ve 1x3 kanal konfigürasyonlarına sahip tamamen dielektrik mod çoğullayıcıların şematik gösterimleri Şekil 4.1(a-b) 'de gösterilmiştir. Şekilde verildiği gibi, çıkış dalga kılavuzları 1x2 yapısındaki giriş kanalına enine dik konumlandırılmıştır. Bunun aksine, 1x3 mod çoğullayıcı, giriş kanalına göre yerleştirilmiş iki dik ve bir paralel çıkış portu içermektedir. Tüm dalga kılavuzu genişlikleri 1x2 için $16a$ ve 1x3 için $24a$ olarak belirlenmiştir. Dalga kılavuzlarının genişlik farkının nedeni daha yüksek modları daha geniş dalga kılavuzlarının desteklemesidir. Bu çalışmada hedef öncelikli algoritma ile çok modlu mod çoğullayıcı tasarımı yapılmıştır. Böylece algoritmaya birden fazla amaç yüklenmiş ve sistem çıktısının performansı için algoritmaya ek kriterler eklenmiştir. Sonuçta ise oldukça verimli T kavşak mod çoğullayıcıları gösterilmiştir. 2D TE/TM T-eklem 1x2 mod çoğullayıcı tasarladık. İterasyon sayısı, yaklaşık üç saatlik bir süreye karşılık gelen 6000 olarak belirlenmiştir. Tasarlanan yapının boyutları, literatürdeki benzer çalışmalardan esinlenerek $76a \times 76a$ olarak belirtilmiş ve algoritmada gerekli iyileştirmeler yapılmıştır.



Şekil 4.2: $TE_{0,1}$ 1×2 mod çoğullayıcı yapısı (a), $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$ boyuta sahip sürekli dielektrik dağılıma sahip yapı, (b); (a)' ya ait TE_0 mutlak H_z dağılımı, (c), (a)' ya ait TE_1 mutlak H_z dağılımı. (d); (a) ' ya epsilon eşik yöntemi uygulanması ile elde edilen ayrıklaştırılmış yapı. (e), (d)' ya ait TE_0 mutlak H_z dağılımı, (f), (d)' ye ait TE_1 mutlak H_z dağılımı.

Sürekli epsilon dağılımına sahip mod çoğullayıcı yapısı, Şekil 4.2(a) 'da gösterilmiştir ve H_z dağılımları, Şekil 4.2(b-c)'de gösterilmiştir. 6000 yinelemede TE 1×2 sürekli yapıları için elde edilen verimlilik sırasıyla TE_0 ve TE_1 için -0.49 dB ve -0.37 dB'dir. TE_1 modunun TE_0 için belirtilen çıkış portuna oranı olan kanallar arasındaki kayıp -21,14 dB, tersi ise -26,18 dB'dir. Elde edilen sürekli yapının ayrıklaştırılması için epsilon eşiği sayısal yöntemlerle belirlenmiş ve sürekli epsilon dağılımına uygulanmıştır. Bu yaklaşımdan sonra elde edilen ayrıklaştırılmış yapı ($\epsilon_{th} = 5.2$), Şekil 4.2(d) 'de gösterilmiştir ve bu ayrıklaştırılmış yapının H_z dağılımları, Şekil 4.2(e-f)'de gösterilmiştir. İkili yapı için elde edilen verimlilik TE_0 ve TE_1 için sırasıyla -0.73 dB ve -0.89 dB'dir. İkili yapının çapraz girişim değerleri P_1 için -24.34 dB ve P_2 için -20.39 dB'dir. Sonuçlardan da görülebileceği gibi, sürekli yapıdan ayrıklaştırılmış yapıya geçişin bir maliyeti vardır, bu nedenle hedeflerimizden biri, minimum düşüş olarak verimlilik düşüşünü %8-10 seviyesinde tutmaktır. Ayrıca, $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$ boyutundaki tasarımın, kısa simülasyon süresi nedeniyle gelecekteki fotonik uygulamalar için daha uygun olduğu düşünülmelidir. TM 1×2 sürekli yapısı Şekil 4.3 (a)'da gösterilmiştir ve H_z dağılımları Şekil 4.3 (b-c)'de gösterilmiştir. Bu sürekli yapı için 6000 iterasyonda elde edilen verim TE_0 ve TE_1 için sırasıyla -0.09 dB ve -0.28 dB'dir. Kanallar arasındaki kayıplar, P_1 ve P_2 için sırasıyla -24.52 dB ve -20.87 dB'dir.

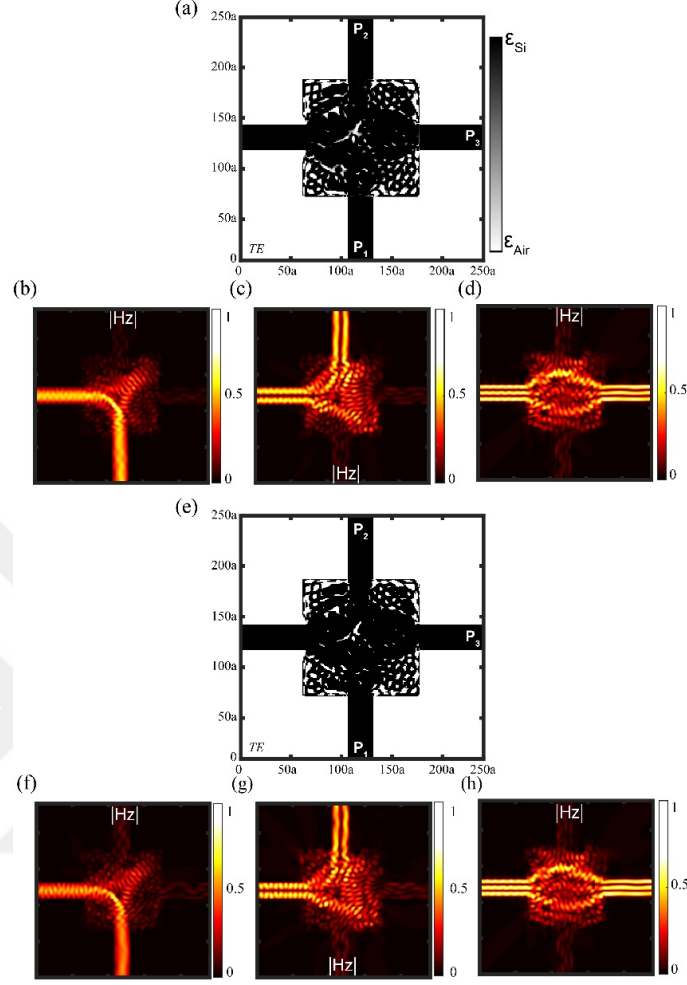
Elde edilen sürekli yapının ayrıklaştırmak için epsilon eşik sayısal yöntemlerle ($\epsilon_{th}=3.1$) belirlenmiş ve sürekli epsilon dağılımına uygulanmıştır.



Şekil 4.3: $TM_{0,1}$ 1×2 mod çoğullayıcı yapısı (a), $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$ boyuta sahip sürekli dielektrik dağılıma sahip yapı, (b); (a)' ya ait TM_0 mutlak E_z dağılımı, (c), (a)' ya ait TM_1 mutlak E_z dağılımı. (d); (a) ' ya epsilon eşik yöntemi ($\epsilon_{th}=3.1$) uygulanması ile elde edilen ayrıklaştırılmış yapı. (e), (d)' ya ait TM_0 mutlak E_z dağılımı, (f), (d)' ye ait TE_1 mutlak E_z dağılımı. İterasyon sayısı 6000 olarak uygulanmıştır.

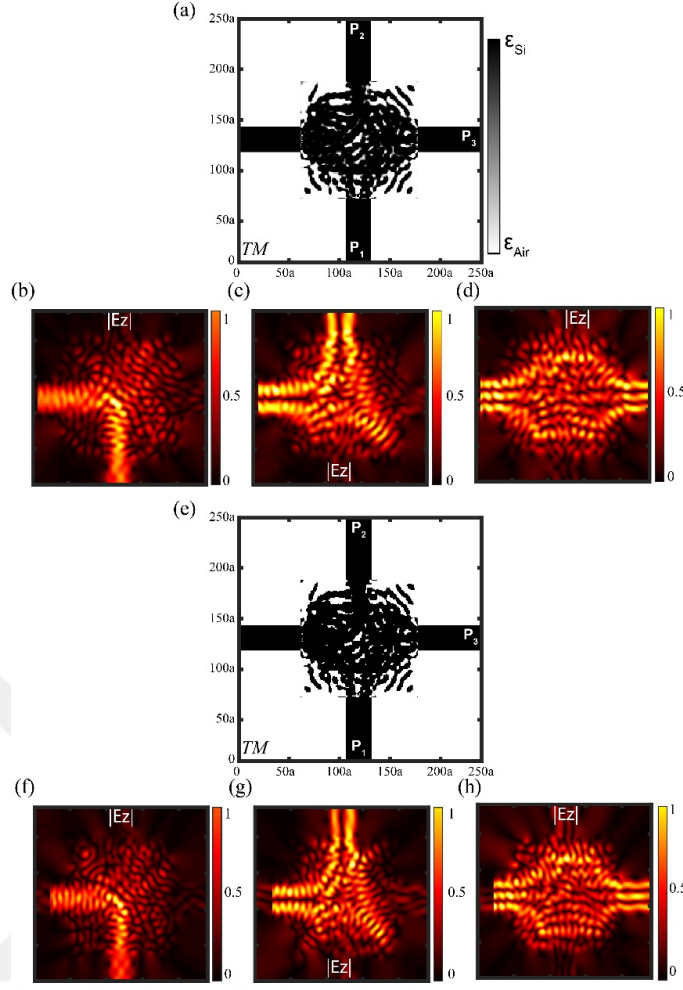
Bu yaklaşımdan sonra elde edilen ayrıklaştırılmış yapı ($\epsilon_{th} = 3.1$), Şekil 4.3 (d) 'de gösterilmiştir ve bu ayrıklaştırılmış yapının H_z dağılımları, Şekil 4.3 (e-f)' de gösterilmiştir. İkili yapı için elde edilen verimlilik TM_0 ve TM_1 için sırasıyla -0.12 dB ve -0.38 dB'dir. İkili yapının çapraz girişim değerleri P_1 için -28.34 dB ve P_2 için -26.75 dB'dir. Bu yapıdaki iletim değerlerinin küçük değişiminin nedeni sadece iki modun kullanılmasıdır. Bu bölümde, Şekil 4.4(a-h) 'de gösterildiği gibi, yüksek performanslı TE / TM 1×3 mod çoğullayıcılar önerilmiştir. Önerilen tasarım, dikey olarak hizalanmış iki çıkış portu ile paralel bir çıkış portuna sahiptir. TE 1×3 10000 iterasyon kullanılarak elde edilen sürekli yapı Şekil 4.4(a) 'da gösterilmiştir ve yapının H_z dağılımları Şekil 4.4(b-d)' de gösterilmiştir. Her bir kanala karşılık gelen modal verimlilikler artan sırayla ($TE_{0,1,2}$) -0.2118 dB, -0.2255 , -0.7619 dB elde edildi. çapraz girişim aralığı ayrıca P_0 , P_1 , P_2 kanalları arasında $\%0.118 \pm 0.050$ olarak hesaplandı. Şekil 4.4(e) ayrıklaştırılmış yapıyı göstermektedir. Yapı, epsilon eşik yaklaşımı yoluyla Şekil 4.4(a)'dan elde edilmiştir. Şekil 4.4(f-h) ayrıklaştırılmış yapının H_z dağılımlarını göstermektedir. Analizlerden elde edilen modal verimler TE_0 , TE_1 , TE_2 için sırasıyla -0.62 dB, -0.69 dB ve -1.42 dB'dir. Verimlilikteki azalmanın nedeninin,

modların sayısı ve yetersiz hesaplama süresinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.4: TE_{0,1,2} 1×3 mod çoğullayıcı yapısı (a), 2.8 μm × 2.8 μm boyuta sahip sürekli dielektrik dağılıma sahip yapı, (b); (a)'ya ait TE₀ mutlak H_z dağılımı, (c), (a)'ya ait TE₁ mutlak H_z dağılımı, (d), (a)'ya ait TE₂ mutlak H_z dağılımı. (e); (a)'ya epsilon eşik yöntemi ($\epsilon_{th}=5$) uygulanması ile elde edilen ayrıklaştırılmış yapı. (f), (e)'ya ait TE₀ mutlak H_z dağılımı, (g), (e)'ye ait TE₁ mutlak H_z dağılımı, (h), (e)'ye ait TE₂ mutlak H_z dağılımı.

TM 1×3 10000 iterasyon kullanılarak elde edilen sürekli yapısı Şekil 4.5(a)'da gösterilmiştir ve E_z dağılımları Şekil 4.5(b-d)'de gösterilmiştir. Modsal verimler TM₀ için -0.21 dB, TM₁ için -0.22 dB ve TM₂ için -0,76 dBdir. Çapraz girişim aralığı P₀, P₁, P₂ kanalları arasında %0.118 ± 0.050 olarak hesaplandı. Epsilon eşik yaklaşımı ile Şekil 4.5(a)'dan elde edilen ayrıklaştırılmış yapı Şekil 4.5(e)'de gösterilmektedir. Şekil 4.5(f-h) ayrıklaştırılmış yapının E_z dağılımlarını göstermektedir. Analizlerden elde edilen modal verimler TM₀, TM₁, TM₂ için sırasıyla -0.62 dB, -0.69 dB ve -1.42 dB'dir.



Şekil 4.5: $TM_{0,1,2}$ 1×3 mod çoğullayıcı yapısı (a), $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$ boyuta sahip sürekli dielektrik dağılıma sahip yapı, (b); (a)' ya ait TM_0 mutlak E_z dağılımı, (c), (a)' ya ait TE_1 mutlak E_z dağılımı, (d), (a)' ya ait TM_2 mutlak E_z dağılımı. (e); (a)' ya epsilon eşik yöntemi ($\epsilon_{\text{th}}=5$) uygulanması ile elde edilen ayrıklaştırılmış yapı. (f), (e)' ya ait TM_0 mutlak E_z dağılımı, (g), (e)' ye ait TM_1 mutlak E_z dağılımı, (h), (e)' ye ait TM_2 mutlak E_z dağılımı.

5. OPTİK GÜÇ BÖLÜCÜ TASARIMI

Optik güç ayırıcılar, fotonik entegre devrelerin temel yapı parçalarından biridir ve hafif güç dağıtımı için veya optik anahtarlar, optik faz dizileri ve mod çoklayıcılar (Tomofuji, S. vd., 2009; Kwong, D. vd., 2011; Li, T. vd., 2013; Doylend, J. K. vd., 2011) gibi daha karmaşık cihazlar oluşturmak için bileşenler olarak yaygın olarak kullanılır. Şimdiye kadar, artırılmış verimliliğe sahip birçok güç ayırıcının Y bağlantısını, çok modlu girişim kuplorünü, fotonik kristalleri, yönlü kuplorü (Chung, K. K. vd., 2006; Tao, S. H. vd., 2008; Sheng, Z. vd., 2012) kullandığı gösterilmiştir. Bunlar arasında, güç ayırıcıların (Xing, J.vd., 2013; Solehmainen, K. vd., 2006) gerçekleştirilmesinde sivri yapı kapsamlı bir şekilde incelendi, ancak daha önce önerilen bu ayırıcıların önemli ölçüde daha uzun bir konik uzunluğa (yüzlerce μm) ihtiyacı vardır. 2008'de yayınlanan bir rapor, geniş bölme açısına ve tek tip çıktılara sahip basamaklı 1x2 ayırıcılardan oluşan 1×16 ayırıcıyı sundu (Tao, S. H. vd., 2008). Hem MMI yapılarını hem de Y branşına dayalı güç ayırıcıyı kullanan Si hibrit plazmonik dalga kılavuzları başka bir çalışmada sunulmuştur (Wang, J. vd., 2011).

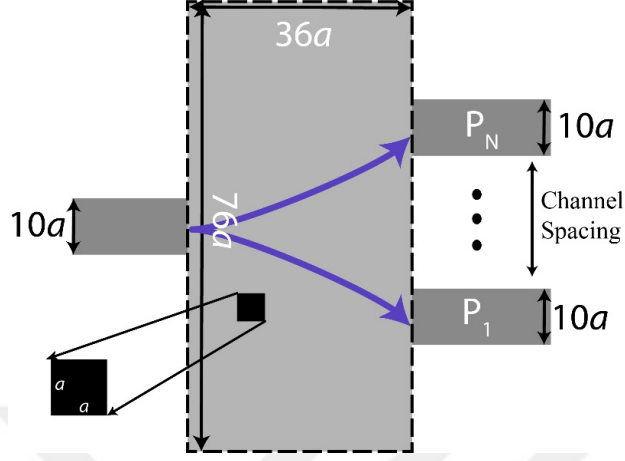
5.1. Hedef Öncelikli Algoritmanın Problem İçin Uygun Hale Getirilmesi

Optik güç bölücüler optik haberleşme sistemlerinde kullanılan bir diğer pasif optik cihazlardan biridir. Bu çalışmadaki $1 \times N$ optik güç ayırıcı tasarımlarının hepsinde, merkezi iletişim dalgaboyu, optik iletişim bandı göz önüne alındığında $1,55 \mu\text{m}$ (C-bandı) kullanılmıştır. Tüm yapılarda, kaynak temel moddur ve güç bölücü yapısının solunda bulunan giriş dalga kılavuzu aracılığıyla yapıya enjekte edilir.

5.2. Yöntem Ve Sonuçlar

Önerilen güç ayırıcı cihazlarımızın iletim karakteristiklerini değerlendirmek için Lumerical FDTD' de kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Ayrıca, simülasyon alanı istenmeyen yansımaları önlemek için mükemmel uyumlu katmanlarla (PML) kaplanmıştır ve tüm güç ayırıcı yapıları sırasıyla $-x$ ve $-y$ yönünde $1.332 \mu\text{m} \times 2.812 \mu\text{m}$ 'dir ($36a \times 76a$), kullanılan birim hücre büyüklüğü ise 37 nm 'dir. Tüm tasarımlarda

portların genişliği ve mesafesi, yani Si kırılma indisi 3.50 olarak alınan Si giriş ve çıkış dalga kılavuzları arasındaki kanal aralığı 370 nm'dir ($10a$). Yapısal ve malzeme parametreleri de Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

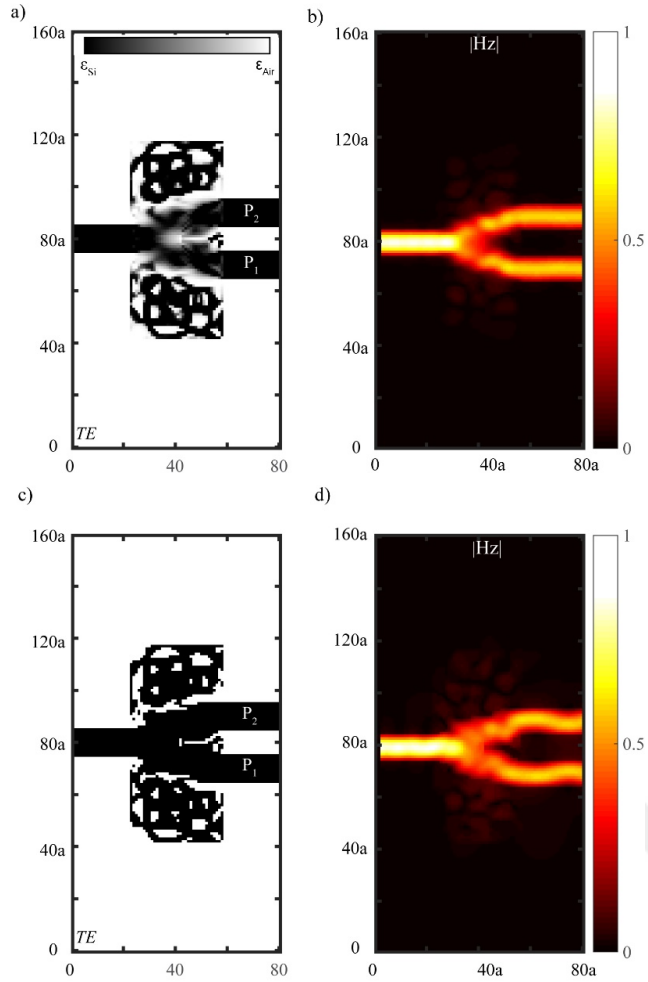


Şekil 5.1: $1 \times N$ optik güç ayırıcı cihazın şematik olarak gösterimi.

Tüm güç ayırıcı tasarımlarımızda, birincil amaç, minimum giriş kaybı ve çıkış portlarında temel mod yayılımları ile çıkış dalga kılavuzlarında eşit güç bölünmesi sağlamaktır. Ekleme kaybını hesaplamak için, giriş dalga kılavuzunun sonuna bir monitör yerleştirilirken, çıkış gücünü ölçmek için her çıkış bağlantı noktasında bir monitör bulunur. Ayırıcının güç tekdüzeliği, tüm çıkış bağlantı noktalarındaki maksimum ve minimum çıkış gücü arasındaki fark olarak hesaplanırken, araya yerleştirme kaybı, giriş enjeksiyon gücü ile ayırıcı bölgedeki yayılan dalganın gücü arasındaki fark hesaplanmıştır.

Şekil 5.2(a), TE polarizasyonu için sürekli dielektrik dağılımlı 3B güç ayırıcısının dielektrik dağılımını göstermektedir. Şekil 5.3(a) 'nın sürekli dielektrik dağılıma sahip yapısı 1000 iterasyonda elde edilmiş ve yaklaşık 16 dakika sürmüştür. Çıkış portları, giriş dalga kılavuzuna göre eşit mesafede bulunur ve çıkış portları (kanal aralığı) arasındaki mesafe 370 nm'dir ($10a$). Sürekli dielektrik dağılımı için normalize edilmiş güç değerleri P_1 ' de -3.0070 dB ve P_2 ' de -3.0245 dB iken, araya yerleştirme kaybı ve güç homojenliği sırasıyla -30 dB ve 0.0175 dB'dir. Şekil 5.2(b), Şekil 5.2(a) 'daki gri yapı için hesaplanan mod yayılımlarını göstermektedir. Şekil 5.2(b) 'de kolaylıkla görülebileceği gibi, çıkış dalga kılavuzlarında temel TE modu olarak yayılır. Şekil 5.2(a) 'daki gri desene dayalı olarak optimize edilmiş ayrıklaştırılmış yapı Şekil 5.2(c)'

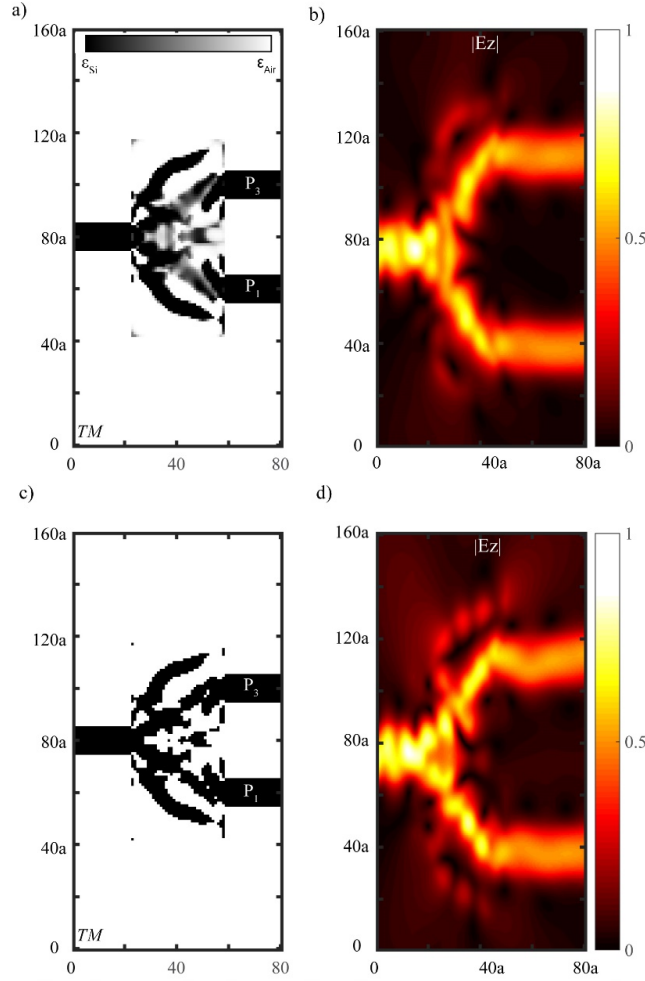
de gösterilmiştir. Sayısal olarak hesaplanan eşik değeri, ayrıklaştırma işlemi için 2.2 olarak uygulanmıştır.



Şekil 5.2: 1×2 TE sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) \mathbf{H} -manyetik alanı dağılımları (c); (a)'ya $\epsilon_{th}=2.2$ uygulanarak elde edilen ayrıklaştırılmış yapı ve (d) (c)'de gösterilen yapıya $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda, TE polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.

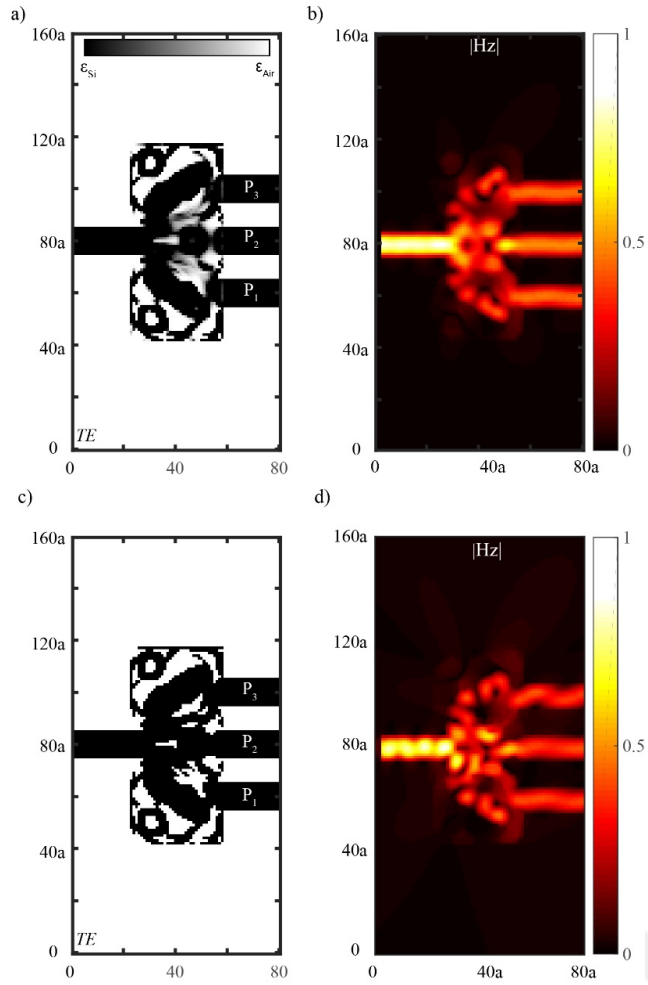
Simülasyon sonuçları, ayrıklaştırılmış cihazın ± 0.1140 dB güç dengesizlikleri (P_1 'de -3.0191 dB ve P_2 'de -3.1140 dB) içinde < -20 dB araya yerleştirme kaybı gösterdiğini göstermektedir. Bu değerlerden de görülebileceği gibi, bu gri desen yapısının ayrıklaştırma sürecinin bir sonucu olarak hafif düşüşler vardır. Şekil 5.2(d), ayrıklaştırılmış yapının cihaz üzerinden \mathbf{H} -alan dağılımını göstermektedir.

1000 iterasyonda ve yaklaşık 10 dakika içinde hedef-öncelikli algoritması ile oluşturulan 1×2 TM optik güç ayırıcı yapısı Şekil 5.3 (a)'da verilirken, yapının \mathbf{E} -alanı dağılımı Şekil 5.3(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3: 1×2 TM sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) E_z -elektrik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=6.5$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda, TM polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.

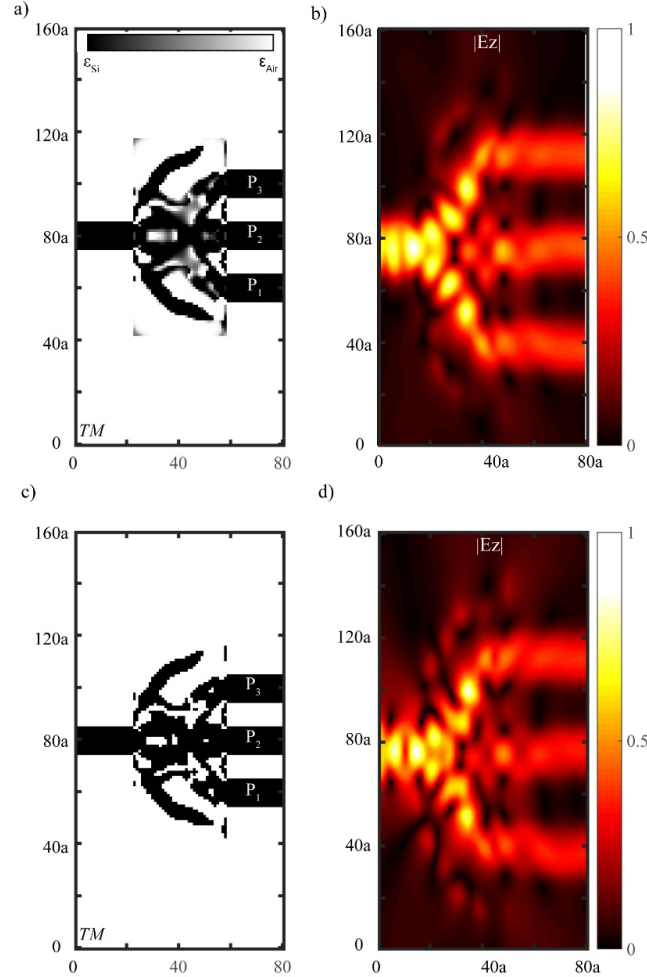
Bu tasarımda giriş modu, düzlem içi dalga kılavuzunun E_z -polarize temel TM modundan oluşur. Şekil 5.3 (a)'da sunulan yapının iletim karakteristikleri şunlardır: araya girme kaybı -15 dB , alıcı güçler P_1 'de -3.25 dB ve P_2 'de -3.07 dB 'dir ve güç bütünlüğü 0.17 dB 'dir. 3B TE güç ayırıcı ile karşılaştırıldığında, bu tür ince levhalardaki TM modlarının daha az sınırlandırılması nedeniyle tüm performans kriterlerinde hafif bir azalma vardır. İkili yapının dielektrik dağılımı, sayısal olarak belirlenmiş bir $\epsilon_{th}=6.5$ ile Şekil Şekil 5.3(c)'de gösterilmiştir. P_1 ve P_1 çıkış güçleri sırasıyla -3.45 dB ve -3.22 dB 'ye eşittir. TE polarizasyon tasarımında olduğu gibi, 1×2 TM optik güç tasarımının, ayrıklaştırma işleminin bir sonucu olarak kabul edilebilir azalmaları olmuştur. Şekil 5.3 (c)'de sunulan cihazın E_z alanı Şekil 5.3 (d)'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4: 1×3 TE sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) \mathbf{H} -manyetik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=4.1$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda, TE polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.

Şekil 5.4 (a), TE polarizasyonu için sürekli dielektrik dağılımlı 1×3 güç ayırıcısının dielektrik dağılımını göstermektedir. Şekil 5.4 (a)'nın gri yapısı 2000 tekrarıyla elde edildi ve yaklaşık 32 dakika sürmüştür. Bu tasarımın amacı her çıkış portunda $-4,77$ dB'dir. Simülasyon sonuçları, sürekli cihazın ± 0.3728 dB güç dengesizliği içinde < -17 dB araya yerleştirme kaybı gösterdiğini göstermektedir (P_1 'de -5.1428 dB, P_2 'de -4.3533 dB ve P_3 'te -5.1145 dB). Şekil 5.4 (b), gri yapının cihaz boyunca \mathbf{H} -alan dağılımını göstermektedir. Şekil 5.4 (b)'de kolaylıkla görülebileceği gibi, orta portun temel TE modu yayılımı diğer portlardan daha fazla güce sahiptir. Ayrıca, Şekil 5.4 (c), Şekil 5.4(a) yapısında eşik yaklaşımı ile elde edilen optimize edilmiş ayrıklaştırılmış yapıyı $\epsilon_{th}=4.1$ ile gösterir. Şekil 5.4 (c)'de sunulan yapının çıkış güçleri, çıkış portlarının artan sırasıyla yaklaşık $\% 27.8 \pm 1.6$ 'ya kadar -5.4622 dB, -5.3254 dB ve -5.8269 dB'dir. Bu yapı için, ayrıklaştırma gücün yüksek olduğu orta

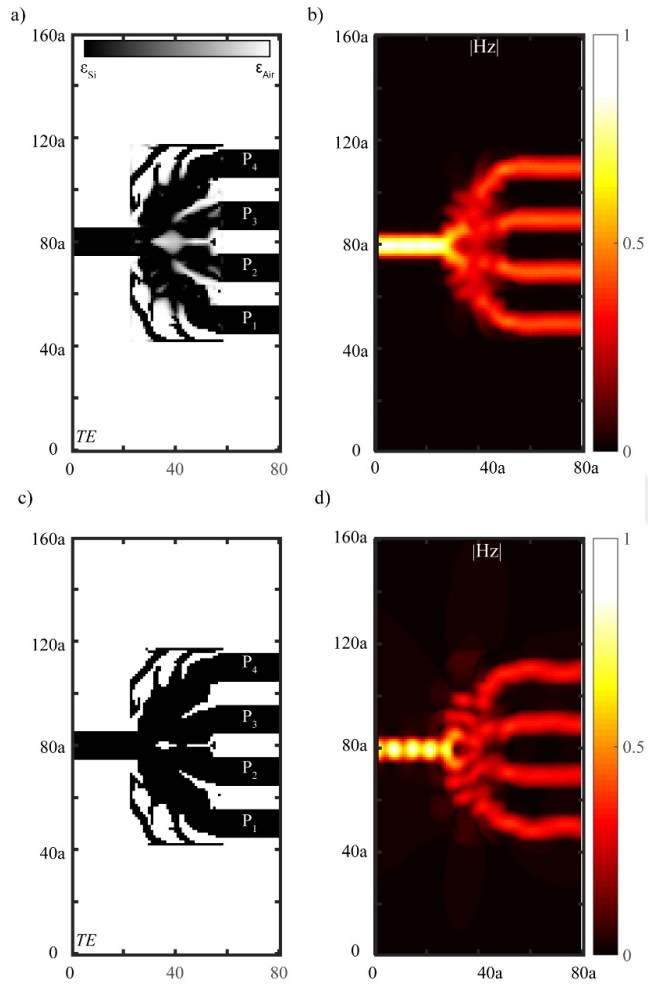
bağlantı noktasında daha fazla etkiye sahiptir, ancak ayrıklaştırılmış yapının performansı hala kabul edilebilir seviyededir. Şekil 5.4 (d), Şekil 5.4 (c)'de gri yapı için hesaplanan mod yayılımlarını göstermektedir. Araya yerleştirme kaybı nispeten yüksektir ve giriş dalga kılavuzundaki \mathbf{H} -alanı dağılımındaki bozukluklardan anlaşılabilir.



Şekil 5.5: 1×3 TM sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) \mathbf{E} -elektrik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=6.8$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda, TM polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.

TM polarizasyonu için 1×3 kanal konfigürasyonuna sahip diğer optik güç ayırıcı tasarımları Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Yaklaşık 32 dakikada üretilen sürdüğü 1×3 TM güç ayırıcısının sürekli dağılımı Şekil 5.5(a)'da gösterilmektedir. $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda temel TM modu için Şekil 5.5(a)'daki mod yayılımı, Şekil 5.5(b)'de gösterilmiştir. Şekil 5.5 (a)'daki gri yapının iletim karakteristikleri $[-4.74 -5.34]$ dB aralığındadır. Yüksek iletim performansına ek olarak, cihazın girişim kaybı -12.64 dB idi. 1×3 TE güç dallandırıcı ile karşılaştırıldığında, yukarıda belirtilen düşük hapsedme

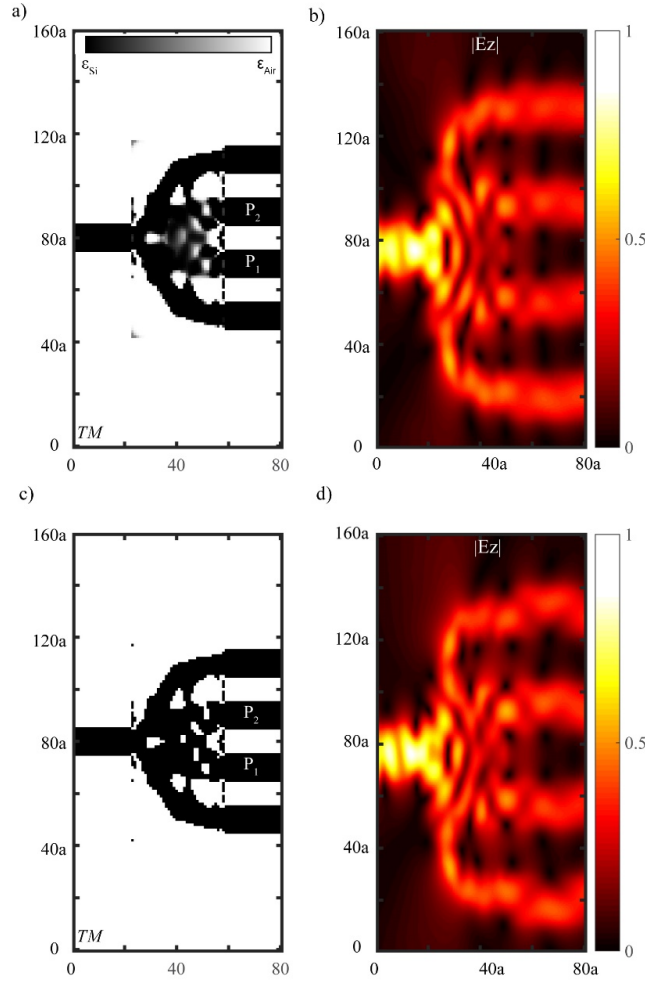
sorunu nedeniyle tüm performans kriterlerinde hafif bir düşüş gözlenmektedir. $\epsilon_{th} = 6.8$ ile eşik yaklaşımı Şekil 5.5(c)'de gösterilmiştir. Şekil 5.5(c)'de gösterilen ayrıklaştırılmış yapının güç verimliliği P_1 'de -5.8423 dB, P_2 'de -5.6216 dB ve P_3 'te -4.8797 dB'dir. Burada, P_3 portunun ayrıklaştırılmış yapıdaki gücünün sürekli yapıdakinden daha büyük olduğuna dikkat etmeliyiz. Önceki tüm tasarımlarda olduğu gibi, 1×3 TM optik güç tasarımı, ayrıklaştırma işleminin bir sonucu olarak kabul edilebilir düşümlere sahiptir. 1,55 um dalgaboyunda temel TM modu için Şekil 5.5 (c)'de sunulan cihazdan mod yayılması, Şekil 5.5(d)'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6: 1×4 TE sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) H -manyetik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=3.5$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının 1.55 μm dalgaboyunda, TE polarizasyon için mod yayılımının gösterimi.

3000 iterasyonda ve yaklaşık 40 dakika içinde objektif birinci algoritma tarafından oluşturulan 1×4 optik güç ayırıcı yapısı, Şekil 5.6(a) 'da verilmektedir. Şekil 5.6(a)'da gösterilen yapının güç verimliliği P_1 'de -6.4302 dB, P_2 'de -5.7774 dB, P_3 'te -5.8704 dB ve P_4 'te -6.0572 dB'dir. Araya yerleştirme kaybı ve güç bütünlüğü sırasıyla; -

28.5387 dB ve 0.5598 dB'dir. Ayrıca, cihazın **H**-alanı dağılımı Şekil 5.6 (b)'de gösterilmiştir ve çoğaltan temel TE modu Şekil 5.6 (b)'de görülebilir. İkili yapının dielektrik dağılımı, Şekil 5.6 (c)'de, sayısal olarak belirlenmiş bir dördüncü $\epsilon_{th} = 3.5$ ile gösterilmiştir. Çıkış güçleri, artan çıkış bağlantı noktası sırasına göre -6.4859 dB, -6.7453 dB, -6.3047 dB ve -6.3916 dB'ye eşittir. Şekil 5.6 (d), Şekil 5.6 (c)'de sunulan cihazın **H** manyetik alanını gösterir.



Şekil 5.7: (a) 1×4 TM sürekli dielektrik dağılıma sahip güç ayırıcı cihazın (a) dielektrik geçirgenlik ve (b) **E**-elektrik alanı dağılımları (c) (a)'daki yapıya $\epsilon_{th}=6.5$ sınırı uygulanması ile elde edilen yapının $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda TM mod için dielektrik dağılımı göstermektedir, (d) **E**-elektrik alanın ayırık yapıdaki dağılımını göstermektedir.

Bu bölümde, yüksek performanslı bir 1×4 TM optik güç ayırıcı, Şekil 5.7'de gösterildiği gibi, simülasyonda 3000 tekrarlama için hedef-öncelikli algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen tasarım, paralel dört çıkış kanalına sahiptir yapının 1×4 TM güç ayırıcısının sürekli dağılımı Şekil 5.7(a)'da gösterilmektedir, burada simülasyon ~ 40 dakika sürmektedir. Şekil 5.7(a)'daki gri yapının iletim karakteristikleri $[-5.76 -6.89]$ dB aralığındadır. Yüksek iletim performansına ek olarak,

cihazın araya girme kaybı -12.15 dB olarak elde edilmiştir. 1,55 μm dalgaboyunda temel TM modu için Şekil 5.7 (a)'daki mod yayılımı, Şekil 5.7 (b)'de gösterilmiştir. 1 \times 4 TE güç ayırıcı ile karşılaştırıldığında, yukarıda belirtilen daha düşük hapsedme sorunu nedeniyle tüm performans kriterlerinde hafif bir azalma dikkat çekmektedir. $\epsilon_{\text{th}} = 6.5$ ile eşik yaklaşımı, Şekil 5.7(c)'de gösterilmiştir. Şekil 5.7 (c)'de gösterilen ayırılmış yapının güç verimliliği P_1 'de -6.1349 dB, P_2 ' de -6.7064 dB, P_3 ' te -6.0032 dB ve P_4 'te -6.7440 dB'dir. Burada, ayırılmış yapıdaki P_1 ve P_2 portunun gücünün, sürekli yapıdakinden daha büyük olduğunu belirtmeliyiz. Önceki tüm tasarımlarda olduğu gibi, TM 1 \times 4 optik güç tasarımı da ayırma işleminin bir sonucu olarak kabul edilebilir düşümlere sahiptir. 1.55 μm dalgaboyunda temel TM modu için Şekil 5.7 (c)'de sunulan cihazdan mod yayılımı, Şekil 5.7(d)'de gösterilmiştir.

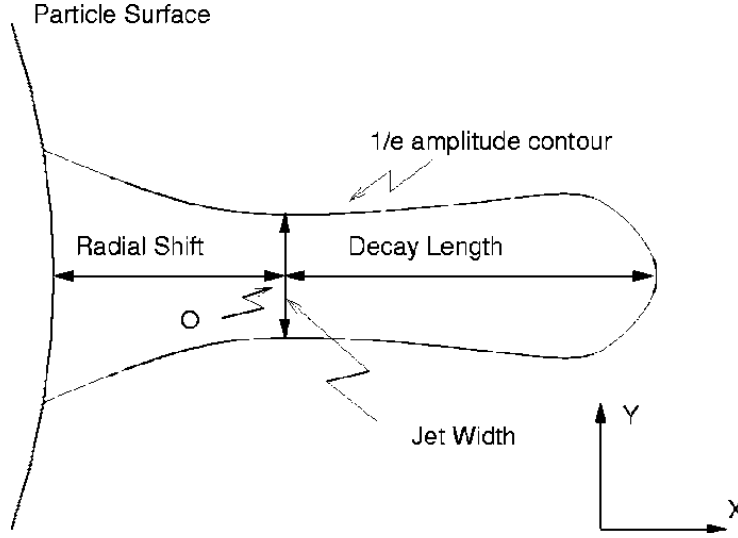
Hedef öncelikli algoritma ile optiksel güç bölücü tasarımı başarı ile gerçekleştirilmiştir. Algoritmaya hassas güç bölücü tasarımı için gerekli formülasyonlar yazılmıştır ve çıktı olarak yukarıdaki sonuçlar gösterilmiştir.



6. DİĞER ÇALIŞMALAR

6.1. Fotonik Nanojet

2004 yılında yayınlandığından beri fotonik nanojet konusu araştırmaları artarak devam etmektedir (Li vd., 2016). Bir dielektrik küreyi veya silindiri bir düzlem dalga ile aydınlatarak, yakın alanda yüksek derecede odaklanmış bir ışık jeti üretilebilir. Yakın alan ışığını manipüle etme yeteneği, mikro ve nano ölçekli cihazları klasik optik sınırlarının ötesinde çalıştırmak için gereken hassas kontrolü sağlar. Fotonik nanojetler, çeşitli dalga boylarının kırınım sınırından ve yayılma mesafesinden daha dar olan yüksek yoğunluklu, yüksek odaklanmış ışınlar elde etmek amacıyla yeni bir teknik olarak sunulmuştur. Kiriş geometrisine ek olarak, ışığın dielektrik partikülün yakınında geri saçılması nanometre ölçekli partiküllerin varlığına duyarlıdır. Nanojetlerin özelliklerinin daha fazla iyileştirilmesi, homojen olmayan parçacıklar, eliptik veya garip şekilli parçacıklar ve parçacık zincirleri dahil çeşitli yollarla elde edilmiştir. Fotonik nanojet yapısı, tıbbi görüntüleme ve partikül tespitinden, nanofabrikasyona kadar birçok alanda potansiyel uygulamalara sahiptir. Nanojetler ve benzer fenomenler veri depolama, ileri nanolitografi teknikleri ve nanometre ölçeğinde partiküllerin saptanması gibi konularda ise halihazırda kullanımı kanıtlanmıştır. Nanojetleri karakterize etmek için dört parametre tanımlanır (Şekil 6.1). Birincisi, tepe genliği, bir birim genlik olay düzlemi dalgası için, bu nanojet'teki **H** alanının maksimum genliğidir. İkincisi, radyal kayma: Bu, pik genlik noktasının parçacığın yüzeyinden radyal mesafesidir. Üçüncü olarak, bozulma uzunluğu, bu, alanın tepe genliğinin $1/e$ değerine düştüğü tepe genlik noktasından radyal mesafedir. Dördüncü olarak, jet genişliği: Bu, tepe genliği noktasının alanın teğetsel yönde tepe değerinin $1/e$ değerine düştüğü noktalara iki katı mesafesidir. Pik genlik, odaklama gücünün bir ölçüsüdür. Radyal kayma bir lensin çalışma mesafesine benzer. Çürüme uzunluğu ve jet genişliği, bir merceğin odak derinliğine ve spot boyutuna benzer.



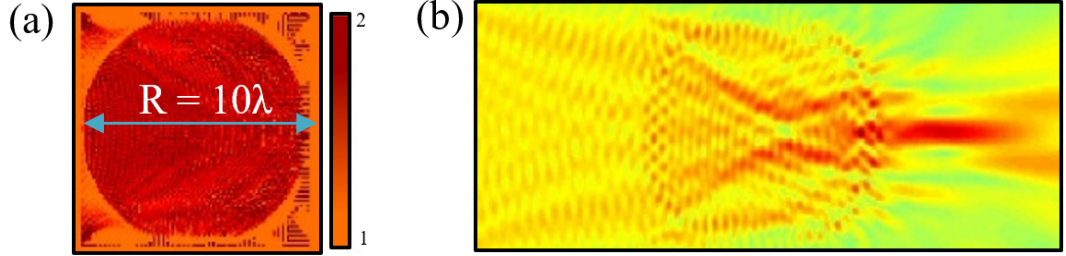
Şekil 6.1: Fotonik nanojetin karakteristiği maksimum genliğin oluştuğu yer O noktasında. (Itagi vd., 2005)

Proje kapsamında ise hedef-öncelikli algoritma ile fotonik nanojet tasarımları yapılmıştır. Gelecek vaat edici bu çalışma ile çok daha yüksek performanslı ve yukarıda bahsedilen alanlar için kullanıma elverişli tasarımlar ortaya çıkarmak mümkün olacaktır.

6.1.1. Tersine Yaklaşım İle Fotonik Nanojet Tasarımı

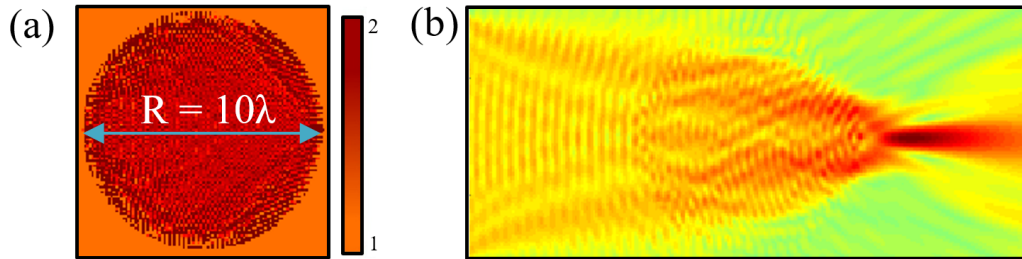
Fotonik nanojet, düzlem dalga ile aydınlatılmış dalgaboyunun iki ile kırk katı arasında çapa sahip olan silindirik veya kürenin arka planında yarı tepede tüm genişliği yaklaşık $\lambda/3$ olan ve bu değeri yaklaşık 2λ koruyabilen dar ve yüksek güçte elektromanyetik ışın demetidir (Heifetz, 2009). Mie teorisi ve Deby serileri ile fotonik nanojetin optiksel karakteristiğini analitiksel ve numerik olarak inceleyen çalışma değerli bir bakış açısı kazandırmıştır (Itagi, 2005). Bu çalışmada silindirik parçacığın ve ortamın dielektrik sabiti, gelen düzlem dalganın dalgaboyu ve parçacığın çapı gibi ayarlanabilir parametrelerin; nanojetin karakteristik özelliklerine yani manyetik alanın şiddetine, manyetik alanın şiddetinin en yüksek değerinin parçacıktan uzaklığı olan aksenal kaymaya (radial shift), benek genişliğinin aksenal boyutuna (jet width) ve benek genişliğinin dalgaboyu altında kaldığı mesafeye (decay length) etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ortaya konan en önemli sonuçlardan bir tanesi nanojet karakteristiğini oluşturan temel faktörün gelen dalganın giriş ve çıkış dairesel yüzeylerden kırılma olmasıdır. Nanojet karakteristiğinin görülebilmesi için dalgaboyunun $1/100$ katında birim hücre boyutuna (a) sahip yüksek çözünürlüklü FDTD metodu kullanılmıştır (Chen, 2004). Bizim çalışmamızda hassasiyet ise $1/10$ 'dir. Yüksek hassasiyetten

dolayı silindirik parçacığın çapı dalgaboyunun 10 katı olarak alınmıştır. Başlangıç dielektrik dağılıma algoritmanın bağımlılığından dolayı parçacığın başlangıç dielektrik dağılımı 1.70 alınmıştır. Kullanılan dalgaboyu 500 nm olup dolayısıyla yapı 5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ boyutlarına sahiptir.



Şekil 6.2: (a) Karesel bölgede değişen yapının dielektrik dağılımı. (b) yapı içerisinde ve arkasında meydana gelen H alan sonuçları.

Şekil 6.2(a)'da eniyileme bölgesi olarak karesel bir alanın seçilerek nanojet tasarımının gerçekleştirildiği yapı verilmiştir. 1000 iterasyon sonucu oluşan yapıda başlangıç değeri ve nanojet karakteristiğinden dolayı ağırlıklı olarak merkezdeki dairesel bölgede değişimler olmuştur. Şekil 6.2(b)'de yapı içerisinde ve arkasında meydana gelen H alan sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde 1λ boyunca $\lambda/4$ benek çapını korumaktadır.

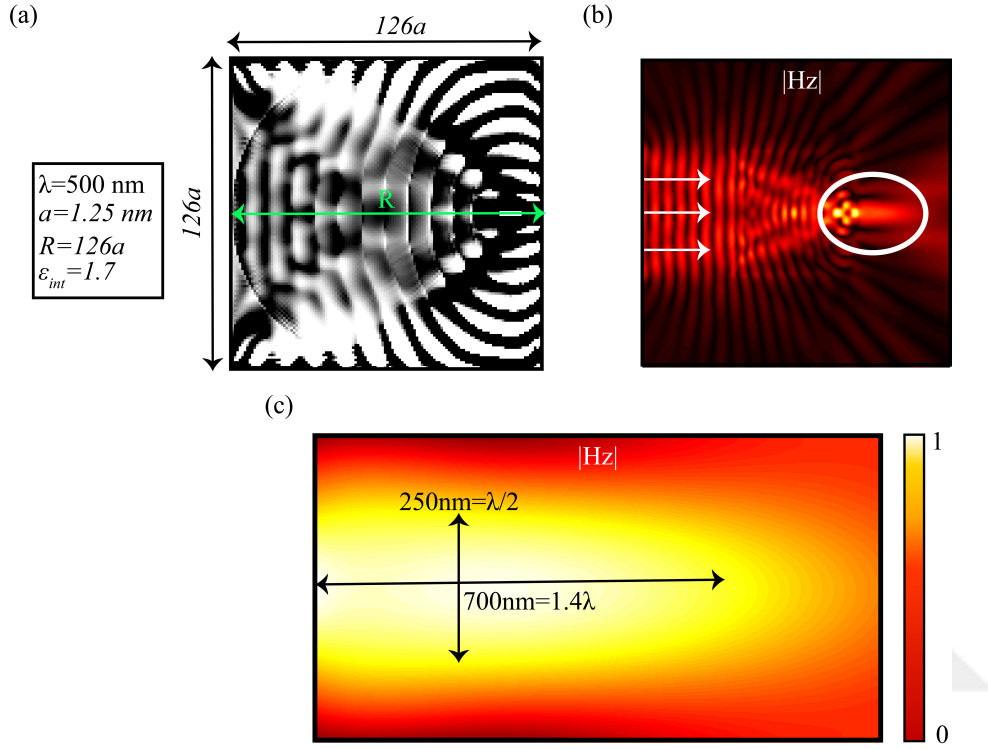


Şekil 6.3: (a) Dairesel bölgede değişen yapının dielektrik dağılımı ve (b) yapı içerisinde ve arkasında meydana gelen H alan sonuçları.

Şekil 6.3'te eniyileme bölgesi olarak dairesel bir alanın seçilerek 1000 iterasyon sonucu oluşan yapının dielektrik dağılımının sadece dairesel alanda değişmesine izin verilmiş ve eniyilemenin yapılabilmesi için kodsız ve matematiksel değişiklikler yapılmıştır. Bu sonuçlar incelendiğinde 1.5λ boyunca $\lambda/4$ benek çapını korumaktadır. Karesel değişime oranla dairesel değişim ile yapılan eniyilemede maksimum alan genliği daha fazla olmaktadır.

Çok daha küçük yapı boyutu ile nanojet karakteristiği ortaya çıkarabilmek için algoritmada gerekli modifikasyonlar yapılarak oluşturulan yapının dielektrik dağılımı

Şekil 6.4 (a)'da gösterilmiştir. Şekil 6.4 (b), FDFD yöntemi ile incelenen yapının elektromanyetik davranışını gösterirken, Lumerical FDTD tarafından incelenen nanojetin büyütülmüş görüntüsü Şekil 6.4 (c) 'de gösterilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde, $\lambda/2$ ile jet genişliği 1.4λ boyunca korunur. Bildiğimiz kadarıyla, bu ters tasarımı ilk fotonik nanojet çalışmasıdır.



Şekil 6.4: Fotonik nanojet (a) dielektrik dağılımı (b) sürekli dağılıma sahip H_z manyetik alanının kuvvet dağılımı (c) oluşan nanojet etkisinin (b) büyütülmüş hali.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında pasif optik haberleşme ara bağlantı cihazlarının tasarımı, gradyan tabanlı tersine tasarım algoritması olan hedef öncelikli algoritma kullanılarak gösterilmiştir. Tezde dalgaboyu çoğullayıcı/tekilliyici, mod çoğullayıcı, optiksel güç bölücü ve ek çalışma olarak fotonik nanojet sunulmuştur. Tasarım sırasında günümüz üretim sınırları düşünülerek simülasyonlarda en küçük birim hücre boyutu $40 \text{ nm} \times 40 \text{ nm}$ olarak ele alınmıştır. Gösterilen pasif optik ara bağlantı cihazlarında elektromanyetik dalganın oluşturacağı modlar ve diğer dalga kılavuzlarına olan gürültü miktarları göz önüne alınıp bu şekilde tasarım ortaya konulmuştur. Kullanılan algoritmadan dolayı elde edilen sürekli dielektrik dağılıma sahip yapılar iki farklı yöntem ile ayrıklaştırılmış ve üretime hazır hale getirilmiştir. Uygulanan bu yöntemler sırası ile epsilon eşik yöntemi ve ayrıklaştırma maliyetli yöntemlerdir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları olmasına rağmen hedef sayısının az olduğu durumlarda epsilon eşik yöntemi ile sonuca yani ayırık yapıya daha çabuk ulaşılabileceği sonucuna varılmıştır. Ancak birden fazla amaçlı yapılarda yapının karmaşıklığı yüzünden ayrıklaştırma maliyetli yöntemi kullanmak yapının ayrıklaştırılma başarısı için önem arz etmektedir. Yapılar 2B olarak tasarlanmış ve -z ekseninde kalınlık verilerek optimum kalınlık bulunmuş ve 3B simülasyon analizleri yapılmıştır. Burada 3B tasarım yapılmamasının esas sebebi çok büyük işlem gücü gerektirmesi ve algoritmanın tasarım sınırlarını aşmasıdır. Gerekli ve yeterli şartlar sağlandığında bu yapıların optiksel litografi ile boyutuna uygun olarak üretimi yayınlanan çalışmalara bakıldığında rahatlıkla gözükmektedir. Veya başka bir yöntem olarak tasarlanan yapılar mikrodalga tayfına göre yeniden optimize edilerek silisyum yerine 3B yazıcıların ve mikrodalga deneyine uygun olarak PLA filamentler ile tasarımı yapılabilir. Nitekim, araştırma grubumuzda bu yöntemler ile yayınlar literatüre sunulmuştur.

Tezde gösterilen yapılardan DBÇ cihazları tersine dizayn ile normalde tasarlanması çok güç olarak küçüklük ve verimlilikte T kavşak yapıların tasarımı gösterilmiş ve burada pasif optik bağlantıların gelecekte dalgaboyu altı mertebelerine inilebileceği

sergilenmiştir. Böylece oldukça küçük alanlarda yüksek veri iletimi ve yüksek verim korunarak fotonik devrelerin çalışmasına katkıda bulunulmuştur. T- kavşak yapısı ile birim alanda daha fazla dalga kılavuzu ile daha fazla dalgaboyunu ayırmak mümkün hale gelmiştir. Tasarlanan yapıların tamamen silisyum olması günümüz üretim ve tasarım kabiliyetine uygun olduğu anlamına gelmektedir.

Bir diğer gösterilen yapı ise mod çoğullayıcı sistemlerdir. Bu cihaz da tıpkı DBC' ler gibi optik haberleşme sistemlerinin vazgeçilmez parçalarından biri ve maliyet kaleminin azaltılmasında kritik rol oynayan pasif cihazlardan biridir. T kavşak mod çoğullayıcı yapıları ile oldukça küçük alanlarda yüksek verimlilikler ile T kavşak yapısından dolayı birim alana daha fazla dalga kılavuzu ve dirsek bağlantılar verimsel kayıplar en aza indirilecek şekilde sunulmuştur. TE-TM polarizasyon için iki farklı cihaz dört porta kadar tasarlanmış ve bilgisayar gücü sağlandığı taktirde oldukça küçük boyutlarda mod çoğullayıcıların tasarlanabileceği gösterilmiştir. Bu yapıda tasarım parametreleri üretim için gerekli ve yeterli minimum grid büyüklüğü göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Yukarıda bahsedildiği gibi, yapı boyutlar μm mertebesinde korunarak optiksel litografi ile fabrikasyonu yapılabilir veya yapı boyutları mikrodalga rejimine çekilerek 3B yazı ile PLA malzemesi veya kırıcılık indisi olarak uygun bir malzeme kullanılarak üretimi gerçekleştirilip deneysel aşamaya geçilebilir. Literatürde Dr. Koray Aydın ve ekibi benzer tersine algoritmalar kullanarak tasarlanmış oldukları Fresnel lens tasarımlarını 3B yazıcı ile üreterek yapının fonksiyonelliğini başarı ile göstermişlerdir.

Bir diğer çalışmamız olan optiksel güç bölücü cihaz tasarım ile TE ve TM polarizasyonları için ayrı ayrı olmak üzere dört çıkış portuna kadar başarı ile optiksel gücü bölmeyi başardık. Bu çalışma ile daha karmaşık yapıların daha küçük boyutlarda verimlilik korunarak tasarlanması amaçlanmıştır. Örneğin, Mach-Zehnder interferometresi tasarımlarında optisel gücün bölünmesi aşamasında veya hafif güç gerektiren yapı tasarımlarında başarı ile kullanılabilceğinin önü açılmıştır.

Genel olarak tezde oldukça umut vadeden tersine tasarım yöntemlerinden gradyan temelli yöntemlerden olan hedef öncelikli tersine algoritma ile dalgaboyu çoğullayıcı, mod çoğullayıcı, optiksel güç bölücü sistemler tasarlanmış ve gösterilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda görülmektedir ki; daha kompleks ve birçok amacı rahatlıkla yerine getirebilecek ve geleceksel yöntemler ile tasarlanması oldukça zor olan aktif veya pasif dalgaboyu altı cihazların tasarımı mümkün hale gelmiştir ve gelmeye

devam edecektir. Özellikle yeni optimizasyon türlerinin geliştirilmesi ve yapay zeka uygulamalarının (So, S. vd., 2020) entegre optik&fotonik cihazlar için daha fazla kullanılmaya başlanması ile tasarlanan yapıların fonksiyonellikleri ve verimlilikleri hızla artacak, üretim maliyetleri ise hızla azalacaktır.





KAYNAKLAR

- Abedi, K., Mirjalili, S. M.** (2015). "Slow light performance enhancement of Bragg slot photonic crystal waveguide with particle swarm optimization algorithm", *Optics Communication*, 339, 7-13.
- Ali, S. A., & Hong, S. J.** (2017). Compact arrayed waveguide gratings for visible wavelengths based on silicon nitride. *Ukr. J. Phys. Opt*, 18(4), 239-248.
- Allaire, G., Jouve, F., & Michailidis, G.** (2016). Thickness control in structural optimization via a level set method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(6), 1349-1382.
- Alpkılıç, A. M., Yılmaz, Y. A., & Kurt, H.** (2019, September). Parametric study of multi-outputs T-junction spatial mode demultiplexers design with an objective-first algorithm. In *Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVI* (Vol. 11089, p. 110890M). International Society for Optics and Photonics.
- Bogaerts, W., De Heyn, P., Van Vaerenbergh, T., De Vos, K., Kumar Selvaraja, S., Claes, T., ... & Baets, R.** (2012). Silicon microring resonators. *Laser & Photonics Reviews*, 6(1), 47-73.
- Bullock, D. L., Shih, C. C., & Margulies, R. S.** (1993). Photonic band structure investigation of two-dimensional Bragg reflector mirrors for semiconductor laser mode control. *JOSA B*, 10(2), 399-403.
- Callewaert, F., Butun, S., Li, Z., & Aydin, K.** (2016). Inverse design of an ultra-compact broadband optical diode based on asymmetric spatial mode conversion. *Scientific reports*, 6(1), 1-10.
- Chen, J., Zhang, Y., & Shi, Y.** (2016). An on-chip triplexer based on silicon Bragg grating-assisted multimode interference couplers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 29(1), 63-65.
- Chu, S. T., Little, B. E., Van, V., Hryniewicz, J. V., Absil, P. P., Johnson, F. G., ... & Shanton, J.** (2004). Compact full C-band tunable filters for 50 GHz channel spacing based on high order micro-ring resonators. In *Optical Fiber Communication Conference* (p. PD9). Optical Society of America.
- Chung, K. K., Chan, H. P., & Chu, P. L.** (2006). A 1×4 polarization and wavelength independent optical power splitter based on a novel wide-angle low-loss Y-junction. *Optics communications*, 267(2), 367-372.
- Doylend, J. K., Heck, M. J. R., Bovington, J. T., Peters, J. D., Coldren, L. A., & Bowers, J. E.** (2011). Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator. *Optics express*, 19(22), 21595-21604.

- Enoch, J. M.** (2006). History of mirrors dating back 8000 years. *Optometry and vision science*, 83(10), 775-781.
- Gondarenko, A., Lipson, M.** (2008). “Low modal volume dipole-like dielectric slab resonator”, *Optics Express*, 20, 21558-21575
- Grant, M., & Boyd, S.** (2014). CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1.
- Han, S., Seok, T. J., Quack, N., Yoo, B. W., & Wu, M. C.** (2015). Large-scale silicon photonic switches with movable directional couplers. *Optica*, 2(4), 370-375.
- Horst, F., Green, W. M., Offrein, B. J., & Vlasov, Y. A.** (2009). Silicon-on-insulator echelle grating WDM demultiplexers with two stigmatic points. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(23), 1743-1745.
- Inan, U. S., & Marshall, R. A.** (2011). *Numerical electromagnetics: the FDTD method*. Cambridge University Press.
- Karabchevsky, A., Katiyi, A., Ang, A. S., & Hazan, A.** (2020). On-chip nanophotonics and future challenges. *Nanophotonics*, 9(12), 3733-3753.
- Kriss, T. C., & Kriss, V. M.** (1998). History of the operating microscope: from magnifying glass to microneurosurgery. *Neurosurgery*, 42(4), 899-907.
- Kwong, D., Hosseini, A., Zhang, Y., & Chen, R. T.** (2011). 1×12 Unequally spaced waveguide array for actively tuned optical phased array on a silicon nanomembrane. *Applied Physics Letters*, 99(5), 051104.
- Lalau-Keraly, Christopher M., et al.** (2013). Adjoint shape optimization applied to electromagnetic design. *Optics express* 21.18: 21693-21701
- Li, T., Zhang, J., Yi, H., Tan, W., Long, Q., Zhou, Z., ... & Wu, H.** (2013). Low-voltage, high speed, compact silicon modulator for BPSK modulation. *Optics express*, 21(20), 23410-23415.
- Lindberg, D. C.** (1967). Alhazen’s theory of vision and its reception in the West. *Isis*, 58(3), 321-341.
- Lu, J., & Vučković, J.** (2012). Objective-first design of high-efficiency, small-footprint couplers between arbitrary nanophotonic waveguide modes. *Optics express*, 20(7), 7221-7236.
- Lu, Jesse, and Jelena Vučković.** (2010). Inverse design of nanophotonic structures using complementary convex optimization. *Optics express* 18.4: 3793-3804.
- Luan, E., Shoman, H., Ratner, D. M., Cheung, K. C., & Chrostowski, L.** (2018). Silicon photonic biosensors using label-free detection. *Sensors*, 18(10), 3519.
- M. Grant and S. Boyd**, 2013 “CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta,” <http://cvxr.com/cvx/>. 2013.
- Weile, D. S., & Michielssen, E.** (1997). Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45(3), 343-353.

- 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.
- Newton, I.** (1726). *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Vol. 3). Apud Guil. & Joh. Innys, Regiæ Societatis typographos.
- Painter, O., Lee, R. K., Scherer, A., Yariv, A., O'brien, J. D., Dapkus, P. D., & Kim, I.** (1999). Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser. *Science*, 284(5421), 1819-1821.
- Pedroni, V. A.** (2020). *Circuit Design with VHDL*. MIT Press
- Piggott, A. Y., Lu, J., Lagoudakis, K. G., Petykiewicz, J., Babinec, T. M., & Vučković, J.** (2015). Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer. *Nature Photonics*, 9(6), 374-377.
- Reed, G. T.** (2008). *Silicon photonics: the state of the art*. John Wiley & Sons.
- Sasaki, K., Ohno, F., Motegi, A., & Baba, T.** (2005). Arrayed waveguide grating of $70/\text{spl times}/60/\text{spl mu}/\text{m}/\text{sup } 2/\text{size}$ based on Si photonic wire waveguides. *Electronics Letters*, 41(14), 801-802.
- Sheng, Z., Wang, Z., Qiu, C., Li, L., Pang, A., Wu, A., ... & Gan, F.** (2012). A compact and low-loss MMI coupler fabricated with CMOS technology. *IEEE Photonics Journal*, 4(6), 2272-2277.
- So, S., Badloe, T., Noh, J., Rho, J., & Bravo-Abad, J.** (2020). Deep learning enabled inverse design in nanophotonics. *Nanophotonics*, 9(5), 1041-1057.
- Soldano, L. B., Veerman, F. B., Smit, M. K., Verbeek, B. H., Dubost, A. H., & Pennings, E. C.** (1992). Planar monomode optical couplers based on multimode interference effects. *Journal of Lightwave Technology*, 10(12), 1843-1850.
- Solehmainen, K., Kapulainen, M., Harjanne, M., & Aalto, T.** (2006). Adiabatic and multimode interference couplers on silicon-on-insulator. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(21), 2287-2289.
- Sprengers, J. P., Gaggero, A., Sahin, D., Jahanmirinejad, S., Frucci, G., Mattioli, F., ... & Höfling, S.** (2011). Waveguide superconducting single-photon detectors for integrated quantum photonic circuits. *Applied Physics Letters*, 99(18), 181110.
- Taillaert, D., Van Laere, F., Ayre, M., Bogaerts, W., Van Thourhout, D., Bienstman, P., & Baets, R.** (2006). Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides. *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(8R), 6071.
- Tao, S. H., Fang, Q., Song, J. F., Yu, M. B., Lo, G. Q., & Kwong, D. L.** (2008). Cascade wide-angle Y-junction 1×16 optical power splitter based on silicon wire waveguides on silicon-on-insulator. *Optics express*, 16(26), 21456-21461.
- Tomofuji, S., Matsuo, S., Kakitsuka, T., & Kitayama, K. I.** (2009). Dynamic switching characteristics of InGaAsP/InP multimode interference optical waveguide switch. *Optics express*, 17(26), 23380-23388.

- Wang, J., Guan, X., He, Y., Shi, Y., Wang, Z., He, S., ... & Dai, D.** (2011). Sub- μm 2 power splitters by using silicon hybrid plasmonic waveguides. *Optics express*, 19(2), 838-847.
- Xing, J., Li, Z., Yu, Y., & Yu, J.** (2013). Design of polarization-independent adiabatic splitters fabricated on silicon-on-insulator substrates. *Optics Express*, 21(22), 26729-26734.
- Xu, Q., Schmidt, B., Pradhan, S., & Lipson, M.** (2005). Micrometre-scale silicon electro-optic modulator. *nature*, 435(7040), 325-327.
- Y. Chen, T. A. Davis, W. W. Hager, S. Rajamanickam.** (2008). Algorithm 887: CHOLMOD, supernodal sparse Cholesky factorization and update/downdate. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 35(3), 22.
- Yang, K. Y., Skarda, J., Cotrufo, M., Dutt, A., Ahn, G. H., Sawaby, M., ... & Vučković, J.** (2020). Inverse-designed non-reciprocal pulse router for chip-based LiDAR. *Nature Photonics*, 14(6), 369-374.
- Yilmaz, Y. A., Alpkilic, A. M., Yeltik, A., & Kurt, H.** (2020). Inverse design of efficient and compact $1 \times N$ wavelength demultiplexer. *Optics Communications*, 454, 124522.
- Yilmaz, Y. A., Alpkiliç, A. M., & Kurt, H.** (2019, September). Inverse design of 2D nanophotonics devices: $1 \times N$ optical power splitters, and photonic nanojet. In *Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2019* (Vol. 11080, p. 110802N). International Society for Optics and Photonics.
- Yu, Z., Cui, H., & Sun, X.** (2017). Genetically optimized on-chip wideband ultracompact reflectors and Fabry–Perot cavities. *Photonics Research*, 5(6), B15-B19.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet Mesut ALPKILIÇ
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Tarihi ve Yeri : 21.07.1992, Malatya
E-posta : ahmetmesutalpkilic@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Yüksek Lisans** : 2020, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Tam Burslu, 3.79/4.00)
- **Lisans** : 2017, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (3.05/4.00)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görevler
2017-2020	Ankara	Tam Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi

Yıl	Yer	Ödüller
2019	San Diego	SPIE Optics&Photonics Congress Seyehat Ödülü
2017-2020	Ankara	TÜBİTAK Yüksek Lisans Araştırma Bursu
2015	Kayseri	TÜBİTAK 2209/A Bitirme Projesi Desteği

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- *Y. A. Yilmaz**, *A. M. Alpkilic**, *A. Yeltik*, *H. Kurt* “High-performance 1×N T-junction Wavelength (De)Multiplexer Systems by Inverse Design”, **Optics Communications**, January, 2020, *Eşit katkıda bulunan yazarlar.
- *A. M. Alpkilic*, *Y. A. Yilmaz*, *A.B. Icli*, *B. K. Yildirim*, *H. Kurt* “Inverse Design of Highly Efficient Polarization Insensitive Wavelength Demultiplexer and demonstration of experimentally of functions in microwave region”, (Yazım Aşamasında)
- *A. M. Alpkilic*, *Y. A. Yilmaz*, *H. Kurt* “Parametric study of multi-outputs T-junction spatial mode demultiplexers design with objective-first algorithm” SPIE Optics&Photonics, San Diego, CA, USA, August 11 - 15, 2019
- *Y. A. Yilmaz*, *A. M. Alpkilic*, *H. Kurt* “Inverse design of 2D nanophotonics devices: 1xN optical power splitters, negative refractive index medium, and photonic nanojet” SPIE Optics&Photonics, San Diego, CA, USA, August 11-15, 2019
- *Y. A. Yilmaz*, *A. M. Alpkilic*, *D. Yilmaz*, *M. Tutgun*, *A. Yeltik*, *H. Kurt* “Parametric study of wavelength demultiplexers designed via objective-first algorithm” SPIE Optics&Photonics, San Diego, CA, USA, August 19 - 23, 2018
- *M. Tutgun*, *A. M. Alpkilic*, *Y. A. Yilmaz*, *D. Yilmaz*, *A. Yeltik*, *H. Kurt* “On-chip photonic filter design via objective-first algorithm”, SPIE Optics&Photonics, San Diego, CA, USA, August 19 - 23, 2018

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- *I. A. Atalay*, *H. A. Gunes*, *A. M. Alpkilic*, *H. Kurt* “Multi-objective particle swarm optimization on ultra-thin silicon solar cells”, **Journal of Optics**, October, 2020
- *Y. A. Yilmaz*, *A. M. Alpkilic*, *M. Tutgun*, *D. Yilmaz*, *I. A. Atalay*, *A. Yeltik*, *H. Kurt* “Inverse Design of Integrated Photonic Structures” 21th International Conference of Transparent Optical Networks (ICTON), Angers, France, July 9 - 13, 2019
- *I. A. Atalay*, *A. M. Alpkilic*, *Y. A. Yilmaz*, *C. Babayigit*, *H. Kurt* “Surface Texturing with Multi-objective Particle Swarm Optimization for Absorption Enhancement in Silicon Photovoltaics” 21th International Conference of Transparent Optical Networks, Angers, France, July 9 - 13, 2019
- *D. Yilmaz*, *M. Tutgun*, *Y. A. Yilmaz*, *A. M. Alpkilic*, *A. Yeltik*, *H. Kurt* “Inverse design of next-generation nanophotonic devices” 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE, Izmir, TURKEY, 2018/5/2
- *D. Yilmaz*, *M. Tutgun*, *Y. A. Yilmaz*, *A. M. Alpkilic*, *A. Yeltik*, *H. Kurt* “Design of nanobeam cavity with inverse objective-first algorithm” 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE, Izmir, TURKEY, 2018/5/2