

MİKRO VE NANO YAPILI SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜK KIRINIM OPTİKLERİNİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

DESIGN AND PRODUCTION OF MICRO AND NANO STRUCTURED SUPER RESOLUTION DIFFRACTIVE OPTICS

KEMAL RÜZGAR

Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin Fizik

Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2019

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30/ 12 / 2019


KEMAL RÜZGAR

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin olarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- ☐ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

30 / 12 / 2018

(imza)
KEMAL RÜZGAR

ÖZET

MİKRO VE NANO YAPILI SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜK KIRINIM OPTİKLERİNİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Kemal RÜZGAR

Doktora, Fizik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Aralık 2019, 200 sayfa

Geleneksel optik bileşenlerin çözünürlük sınırının aşılması amacıyla süper çözünürlük optikleri geliştirilmiştir. Bir süper çözünürlük uygulaması olarak mikro kırınım optikleri, ışığın kırılması ilkesi ile çalışan geleneksel optik bileşenlerin çözünürlük sınırının aşılmasında önemli bir yere sahiptir. Foton elekleri, mikro kırınım ilkesiyle çalışan bir optik bileşen tasarımıdır. Bu tezde foton eleklerinin tasarlanması ve mikro fabrikasyon yöntemi olan fotolitografi tekniği ile üretilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar iki ana başlık altında toplanmaktadır.

Birinci aşamada, süper çözünürlük özelliği gösteren kırınım optiklerinin tasarlanması ve tasarım sonucunda elde edilecek odaklama özelliklerinin araştırılması amacıyla bir simülasyon kodu geliştirilmiştir. Bu kod yardımıyla foton eleklerinin optik performansını belirleyen şiddet dağılımı ve çözünürlük özellikleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Kullanım alanlarına göre, üç farklı foton eleği modeli tasarlanmış ve özellikleri incelenmiştir. Çözünürlük ve şiddet modülasyonun uygulama alanına göre değiştirebilen

model sonuçları, referans foton eleği modelleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, en yüksek çözünürlüğe sahip modelde, çözünürlükte % 10,5'lik bir artışa karşılık şiddette kayda değer bir düşüş gözlenmemiştir. Elde edilen diğer bir önemli sonuç ise, geliştirilen Tüm Değişken Boyutlu Foton Eleği çözünürlüğün % 2,7 artışı yanında şiddet seviyesinin % 57 artmış olmasıdır. Hem değişen d/w oranı bölgeleri hem de sabit delik çaplarına sahip hibrit bir tasarım için yürütülen üçüncü model, Parçalı Değişken Boyutlu Foton Eleği, simülasyonlarında ise, çözünürlüğün referans foton eleğine göre % 3,6 arttığı belirlenmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmaların ikinci aşamasında, bir mikro fabrikasyon tekniği olan fotolitografi yöntemi ile, özel olarak düşürme ve ıslak kimyasal aşındırma alt yöntemleri ile foton eleklerinin üretilmesi gerçekleştirilmiştir. Çapları yaklaşık 15 - 150 μm arasında değişen iğne delikleri kullanılarak tasarlanan foton elekleri üretilmiştir. Üretim sürecinde fotolitografi tekniğinin özel bir uygulama aracı olan maskesiz lazer yazıcı kullanılmıştır. Her iki alt üretim yöntemi de foton eleği üretimi için optimize edilmiş, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Üretimde oluşan hata mekanizmaları analiz edilmiş ve giderilmiştir.

Anahtar Kelimeler: süper çözünürlük, mikro kırınım optikleri, foton eleği, mikro fabrikasyon fotolitografi, maskesiz fotolitografi, düşürme yöntemi, kimyasal aşındırma yöntemi.

ABSTRACT

DESIGN AND PRODUCTION OF MICRO AND NANO STRUCTURED SUPER RESOLUTION DIFFRACTIVE OPTICS

Kemal RÜZGAR

Doctor of Philosophy, Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Akın BACIOĞLU

December 2019, 200 pages

Super resolution optics have been developed for surpassing the resolution limit of conventional optical components. As an application of the super resolution, micro diffraction based optical devices have an important role to exceed the resolution limit of the conventional components. Photon sieves are a design of optical components based on the principle of micro-diffraction optics. In this thesis, the design and production of photon sieves are aimed by using photolithography as a micro-fabrication method. In this context, the study is grouped under two main headings.

In the first step, a simulation code was developed to design the diffraction optics and to investigate the focusing properties upon the design. With the help of this code, the intensity distribution and the resolution properties which determine the optical performance of photon sieves have been investigated. According to their usage areas three different photon sieve models were designed and their properties were examined. The results of the models which can vary according to the application area of the resolution and intensity modulation are compared with the control models. Accordingly, in the highest resolution model, there was no significant decrease in the intensity despite a 10.5 % increase in the resolution. Another important result obtained is that the resolution in the other model increased by 2.7 % besides the increase in the intensity by 57 %.

In the second stage of the thesis, photon sieves were produced by means of photolithography method which is a micro fabrication technique, especially with drop and wet chemical etching methods. Photon sieves are produced by using pinholes with the diameters ranging from 15 to 150 μm . During the production processes, the mask-less laser writer, a special application of the photolithography technique, was used. Both

subproduction methods were optimized for the photon sieve production, and the results were discussed. The error mechanisms in the production are analyzed and eliminated.

Keywords: super resolution, micro diffractive optics, photon sieve, micro fabrication, photolithography, mask-less photolithography, lift-off method, chemical etching method.

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken bana bilimsel açıdan bilgisi ve tecrübesi ile destek olan ve akademik gelişimimde bana destek olan danışmanım Sayın Doç. Dr. Akın Bacıoğlu'na

Çalışmalarım süresince laboratuvarında çalışma yapabilmem için gereken teknik desteklerinden dolayı TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'ne

Özellikle proje çalışmalarında yer aldığım ve bana çalışma konularımında ilerlemem için fayda sağlayan OPMER projesine

Benden üretimler konusunda desteğini esirgemeyen OPMER proje yöneticisi Sayın Dr. Adem Yenisoy'a

Arkama her baktığımda orda olduklarını bildiğim, her konuda bana güvenerek başarılı olma yolunda en büyük destekçim olan annem Müesser Rüzgar, babam, İzzet Rüzgar ve abim, Mahmut Rüzgar'a,

Hayatımda olup her zaman yanımda olarak bana destek olduğu için sevgili eşim, Çise Nazım Rüzgar'a

Teşekkür ederim

Kemal RÜZGAR

Aralık 2019, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTAMALAR	xxii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Optik İlkeler	3
2.1.1. Kırılma ve Kırınım	3
2.1.2. Kırınım Teorileri	4
2.1.3. Huygens, Huygens Fresnel ve Eğim Faktörü	5
2.1.4. Fraunhofer Teorisi	8
2.1.5. Tek Yarıktaki Kırınım ve Çift Yarıktaki Kırınım	8
2.1.6. Dairesel Açıklıktan Fraunhofer Kırınımı ve Airy Deseni	11
2.1.7. Fresnel Kırınım Teorisi	13
2.1.8. Çözünürlük	16
2.1.9. Süper Çözünürlük	18
2.2. Kırınım Optikleri	19
2.2.1. Fresnel Bölge Plakası (FZP), Geometrisi ve Çalışma Prensibi	19

2.2.2.	Optik sistemler ve Fresnel Bölge Plakalarında Çözünürlük	21
2.2.3.	Fresnel Bölge Plakalarında İkincil Maksimumlar	22
2.2.4.	Faz Özellikli Fresnel Bölge Plakası	22
2.2.5.	Foton Eleği	22
2.2.6.	Foton Eleğinin Fresnel Bölge Plakasına Göre Avantajları ve Dezavantajları	24
2.2.7.	Foton Elekleri ve Çözünürlük	26
2.2.8.	Foton Eleği Uygulama Alanları	27
3.	FOTON ELEĞİ TASARIMI	28
3.1.	Foton Eleği Tasarım Parametreleri	29
3.2.	Foton Eleği Tasarım Simülasyonları	30
3.3.	Foton Eleği Modelleri ve Uygulanan Geliştirmeler	37
3.3.1.	Tüm Değişken Boyutlu Foton Eleği (AVS-PS)	43
3.3.2.	Sabit Çap Değerli Foton Eleği (CDS-PS)	45
3.3.3.	Parçalı Değişken Boyutlu Foton Eleği (SVS-PS)	47
3.3.4.	Model sonuçları	49
4.	FOTON ELEĞİ ÜRETİMİ	54
4.1.	Litografi Yöntemi İle Foton Eleği Üretimi	54
4.1.1.	Litografi Yöntemleri	54
4.1.2.	Fotolitografi Yöntemi	56
4.2.	Üretim Gelişimi	64
4.2.1.	Alttaş Hazırlığı	67
4.2.2.	Ön ısıtma ve ısıtma işlemleri	69
4.2.3.	İnce Film Kaplama	71
4.2.4.	Kaplanan İnce Filmler ve Özellikleri	75

4.2.5.	Fotoduyarlı Malzemeler ve Fotoduyarlı Kaplama İşlemi	76
4.2.6.	Desen Oluşturma	80
4.2.7.	Maskesiz Optik Litografi Yöntemi	82
4.2.8.	Tab Etme/Geliştirme	89
4.2.9.	Kalıntı Silme Ve Temizleme	90
4.3.	Litografi Teknikleri: Prosedürler ve Sonuçlar	90
4.3.1.	Düşürme (Lift Off) Tekniği.....	91
4.3.2.	Islak Kimyasal Aşındırma Tekniği	92
4.4.	Yapısal Analiz Yöntemleri ve Sonuçlar	94
4.4.1.	Optik Mikroskop Yöntemi	95
4.4.2.	Optik Profilometre Yöntemi	97
4.4.3.	Spektrofotometre Yöntemi	100
5.	SONUÇ VE YORUM	104
5.1.	Üretim Sonuçları	104
5.2.	Optik Litografi Hata Mekanizmaları	105
5.3.	Maskesiz Yazıcı Desenlendirme Mekanizmaları	106
5.4.	Litografi İşlem Adımları Mekanizmaları	118
5.4.1.	Düşürme Yöntemi Deneysel Üretim Sonuçları	122
5.4.2.	Kimyasal Aşındırma Yöntemi Deneysel Üretim Sonuçları	132
5.5.	Maskesiz Yazıcı Hızlı Üretim Tekniği	146
5.6.	Üretimin Optik Performansa Etkisi	154
6.	Genel Sonuçlar ve Yorum	167
7.	Gelecek Çalışmaları	172
KAYNAKLAR		173
Ekler		180
EK 1-Çizelgeler:		180

EK 2 - Program Detayları-Simülasyon Kodu	183
EK 3 - Tezden Türetilmiş Yayınlar	199
EK 4 - Tez Çalışması Orijinallik Raporu	200
ÖZGEÇMİŞ	201

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Foton eleği tasarım parametreleri	30
Çizelge 3.2 Tasarlanan foton eleği modellerinin delik çapları ve d/w oranları	51
Çizelge 3.3 Tasarlanan modellerin odak merkezi şiddet dağılımları ve Airy diski yarıçap değerleri	52
Çizelge 4.1 Üretim çalışmalarında kullanılan fotoduyarlı malzemeler ve kaplama işlemi parametreleri	73
Çizelge 4.2 Ni/Ag ince film kaplama parametreleri	79
Çizelge 4.3 Kloe Dilase 650 maskesiz yazıcı sistem özellikleri	84
Çizelge 4.4 Foton eleği üretiminde kullanılan sistem parametreleri	84
Çizelge 4.5 Foton eleği üretiminde desenlendirme işleminde kullanılan objektifler ve özellikleri	87
Çizelge 4.6 Olympus BX53 optik mikroskop objektifleri	98
Çizelge 4.7 Zygo Zegage Plus interferometrik objektifler ve özellikleri	101
Çizelge 5.1 Islak kimyasal aşındırma işlemi süreç parametreleri	141
Çizelge 5.2 Hızlı yazım tekniği parametrelendirme çalışmalarında elde edilen parametrik delik çapları	154

Çizelge 5.3 Hızlı yazım tekniği parametrelendirme çalışmalarında elde edilen odak mesafesi ve şiddete bağlı delik çapları	155
Çizelge 5.4 Kimyasal aşındırma ve düşürme yöntemi örneklerine ait desenlendirme parametreleri.....	157
Çizelge 5.5 Üretim etkilerinin incelenmesi amacıyla tasarlanan foton eleği parametreleri.	158
Çizelge 5.6 Düşürme ve ıslak kimyasal aşındırma yöntemleri ile üretilen örneklerin hesaplanmış şiddet ve FWHM değerleri	168
Çizelge 8.1 Düşürme örnekleri desenlendirme parametreleri	182
Çizelge 8.2 Islak kimyasal aşındırma örnekleri desenlendirme parametreleri.....	184

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Farklı kırılma indislerine sahip ortamdaki ışık hareketi.	
3 Şekil 2.2 Düzlem dalga yarık etkileşimi sonrasında oluşan yakın alan ve uzak alan şiddet dağılımı [23].	
5 Şekil 2.3 Küresel dalgalar için Huygens prensibi temsili [3].	
6 Şekil 2.4 Küçük bir yarık ile ışık etkileşimi sonrasında oluşan kırınım deseni optik alan dağılımının fazör yöntemi ile gösterimi [4].	7
Şekil 2.5 Eğim faktörü $K(\theta)$, $\mathbf{k}$ vektörünün büyüklüğü k alanda θ 'nın fonksiyonu olarak değişmektedir. $\theta = \pi$, $K(\theta) = 0$ durumunda geriye doğru devam eden dalganın genliği 0 olduğu noktayı göstermektedir [4].	7
Şekil 2.6 a) tek yarıkta b) çift yarıkta Fraunhofer kırınımı, c) tek yarıkta kırınım dalga gösterimi d) çift yarıkta kırınım ve girişimin dalga gösterimi [29].	
9 Şekil 2.7 Tek ve çift yarıkta kırınım olayının yarattığı girişim ve kırınım etkileri ile çift yarıkta, kırınım ve girişim alan dağılımı bileşke şiddet dağılımı gösterimi [30].	10
Şekil 2.8 İdeal bir Airy deseninin iki boyutlu görünümü ile aynı alan dağılımını detektörde oluşturduğu şiddet deseni görüntüsü. Burada R normalize koordinat ve $\Phi_0(R)$ alan dağılımıdır [31].	
11 Şekil 2.9 Birinci tip sıfıncı mertebeye Bessel fonksiyonu grafiği.	
12	
Şekil 2.10 Tek yarıktan a) Fraunhofer kırınımı b) Fresnel kırınımı dalga dağılımı.	13
Şekil 2.11 Cornu spirali grafiği. x ve y eksenleri Fresnel kırınımı için Fresnel integrallerinin sonuçlarını vermektedir (Eşitlik 2.11 ve 2.12) [24].	14

Şekil 2.12 Tek yarıktan Fresnel ve Fraunhofer kırınımı karşılaştırması. Fresnel kırınım desenindeki minimum, Fraunhofer kırınımındaki minimumun aksine sıfır değildir [32].	15
Şekil 2.13 a) Kırınım limitli bir mercek tarafından oluşturulan ve Airy diskleri tamamen ayrılmış iki noktaya ait görüntü b) çözülebilir iki noktanın kırınım desenleri, c) iki inkohorent kaynağın çözünürlük limitinde oluşturduğu kırınım deseni [28] .	16
Şekil 2.14 Çözünürlük sınırı, Rayleigh kriteri. Kesikli çizgiler her iki Airy diskinin (kırınım tepesinin) bileşkesini vermektedir [28].	17
Şekil 2.15 Nümerik açıklık şematik gösterimi.	18
Şekil 2.16 Düzlem dalga ile aydınlatılan ve her bir açıklığın sınırı birbirinden yarım dalga boyu kadar uzak olan FZP şematik gösterimi [24].	20
Şekil 2.17 a) Airy diski 2b gösterimi ve şiddet deseni b) çözülebilir iki noktasal kaynağın kırınım deseni ve şiddet deseni c) Rayleigh kriteri 2b gösterimi ve şiddet dağılımı gösterimi d) Abbe kriteri 2b gösterimi ve şiddet dağılım grafikleri e) Sparrow kriteri 2b gösterimi ve şiddet dağılım kriteri [38].	21
Şekil 2.18 Işık kaynağı, foton eleği ve odak düzlemini konumsal ve açısal dağılımının şematik gösterimi [2].	23
Şekil 2.19 a) FZP b) Fresnel bölgelerine yerleştirilmiş delikler ve c) foton eleği yapısı gösterimi.	24
Şekil 2.20 Odak noktası şiddet değerinin delik çapının Fresnel bölge genişliğine oranı (d/w) ile değişim grafiği. Delik çapı Fresnel bölge genişliğinden büyük olduğu durumda oluşan yapıcı girişim bölgeleri [15].	25
Şekil 3.1 Yapıcı ve yıkıcı girişim sağlayan Fresnel bölgeleri ve bu bölgelere yerleştirilmiş deliklerin dağılımı.	29
Şekil 3.2 MATLAB tabanlı programın geliştirmesi ve işlem adımları şematik gösterimi.	31
Şekil 3.3 Foton eleği yapısındaki genel dağılım ve odak mesafesi şematik gösterimi [43].	32

Şekil 3.4 Foton eleği tasarım programı kullanıcı arayüzü görünümü.	35
Şekil 3.5 Foton eleği Fresnel bölgelerinin ayırık alan dağılımları.	36
Şekil 3.6 Foton eleği Fresnel bölgelerinin çözünürlüğe katkıları.	37
Şekil 3.7 Delik çapı Fresnel ve bölge genişliği (d/w) oranlarının odak düzlemindeki şiddet dağılımına etkisi (yeşil eğri 20. Fresnel bölgesi için yapıcı girişimleri meydana getiren d/w oranlarını, kırmızı eğri ise aynı Fresnel bölgesi için yıkıcı girişim meydana getiren d/w oranlarını göstermektedir).	38
Şekil 3.8 Foton eleği delik dağılımı ve odak düzlemi şiddet dağılımı.	39
Şekil 3.9 Değişken oranlı (d/w) bölgelerin yarattığı şiddet dağılımları.	41
Şekil 3.10 d/w oranı 1 ve 1.53 olan foton eleklerinin geliştirilen program ile alan analizi (referans PS 1 $d/w=1$, referans PS 2 $d/w=1.53$).	42
Şekil 3.11 Tüm Değişken Boyutlu Foton Eleği (AVS-PS) modeli. (d/w oranları değişimi 1'den 1.53'e kadar) a) AVS-PS modeli 0-90°lik alandaki delik dağılımı b) AVS-PS odak düzlemi şiddet dağılımı.	44
Şekil 3.12 Sabit Çap Değerli Foton Eleği (CDS-PS) modeli. (d/w oranları değişimi 0.262'den 1.552'ye kadar, sabit çap değeri 16.5 μm) a) CDS-PS modeli 0-90°lik alandaki delik dağılımı b) CDS-PS odak düzlemi şiddet dağılımı.	46
Şekil 3.13 Parçalı Değişken Boyutlu Foton Eleği (SVS-PS) modeli. (1, 2 ve 3. parçalardaki sabit değerleri sırasıyla 36.30, 25.67 ve 16.23 μm). a) SVS-PS modeli 0-90°lik alandaki delik dağılımı b) SVS-PS odak düzlemi şiddet dağılımı	48
Şekil 3.14 AVS-PS modeli ile referans foton elekleri şiddet ve çözünürlük karşılaştırılması a) AVS-PS, Referans foton eleği 1 ve 2 bağıl şiddet grafiği b) AVS-PS ve referans foton eleği 1 normalize şiddet grafiği.	50
Şekil 3.15 CDS-PS modeli ile referans foton elekleri şiddet ve çözünürlük karşılaştırılması a) CDS-PS, Referans foton eleği 1 ve 2 bağıl şiddet grafiği b) CDS-PS ve referans foton eleği 1 normalize şiddet grafiği.	51

Şekil 3.16 SVS-PS modeli ile referans foton elekleri şiddet ve çözünürlük karşılaştırılması a) SVS-PS, Referans foton eleği 1 ve 2 bağıl şiddet grafiği b) SVS-PS ve referans foton eleği 1 normalize şiddet grafiği.	52
Şekil 3.17 AVS-PS, CDS-PS ve SVS-PS modelleri ile referans foton elekleri şiddet ve çözünürlük değerleri grafiği.	52
Şekil 3.18 Tasarlanan modeller (AVS-PS, CDS-PS ve SVS-PS) tasarım parametreleri, sonuçları ve kullanım alanları tablosu (AVS-PS FalconSat-7 nano uydu tasarımı [65], CDS-PS nanolitografi sistemi [67] ve SVS-PS plenoptik kameralar [16].	53
Şekil 4.1 Fotolitografi yöntemi işlem adımları (ıslak kimyasal aşındırma yöntemi).	56
Şekil 4.2 Döner kaplama sistemi ile fotoduyarlı malzeme kaplama işlemi a) döner kaplama hız ve hızlanma grafiği ($w_1 > 0$ durumunda dinamik damlatma) b) fotoduyarlı viskozitesinin kaplama kalınlığına etkisi [75].	59
Şekil 4.3 Kontak baskı, yakın baskı ve izdüşüm baskı teknikleri şematik gösterimi.	63
Şekil 4.4 Basit bir foton eleği yapısal görünümü.	64
Şekil 4.5'te Foton eleği üretim süreci düşürme ve ıslak kimyasal aşındırma yöntemleri işlem akış şeması.	66
Şekil 4.6 Fused silika ve B270 altaşlarının geçirgenlik grafiği	67
Şekil 4.7 Üretim süreci altaş hazırlık istasyonu a) taşmalı banyo 1 b) taşmalı banyo 2 c) taşmalı banyo 3 d) ultrasonik banyo e) azotlu banyo 1 f) azotlu banyo 2 g) altaş temizlik malzemeleri (aseton ve isopropil alkol).	68
Şekil 4.8 a) İnce film kaplama sistem donanımları şematik görüntüsü b) Leybold Syruspro 1110 vakum odası.	72
Şekil 4.9 İnce film kaplama sistemi donanımları a) elektron demeti buharlaştırma kaynağı b) Kuartz kristal ve optik monitör kalınlık ölçüm sistemleri.	74
Şekil 4.10 a) Pozitif fotoduyarlıya ait pozitif eğimli duvar modeli b) negatif fotoduyarlıya ait negatif eğimli duvar modeli.	77

Şekil 4.11 Negatif fotoduyarlı duvar profilleri a) yetersiz pozlanmış b) düzgün pozlanmış c) aşırı pozlanmış.	77
Şekil 4.12 Brewer Science 200 CBX dönel kaplama sistemi ve entegre sıcak tabla.	79
4.13 Tez kapsamında geliştirilmiş HMDS kaplama sistemi a) sistemin şematik gösterimi b) sistem fotoğrafı	80
4.14 Kloe Dilase 650 maskesiz yazıcı sistemi.	82
Şekil 4.15 Litografi işlemi desenlendirme objektifleri a) OLYMPUS UPLFLN 40X b) OLYMPUS UPLFLN 10X2.	85
Şekil 4.16 Kloe Dilase sisteminde desenlendirme işleminde kullanılan donanımlar a) optik sistem ve optik yollar b) hareketli tabla (x,y).	86
Şekil 4.17 Desenlendirme işleminde odak mesafesinin demet çapına etkisi.	87
Şekil 4.18 Odak uzaklığına bağlı çizgi genişlikleri a) çizgi genişliği optik mikroskop görüntüleri b) odak mesafesine karşı çizgi genişliği değişim grafiği.	88
Şekil 4.19 Litografi sistemi sistem parametreleri ile çizgi genişliği değişim grafikleri a) lazer güç modülasyonu, hız ve çizgi genişliği değişim grafiği b) lazer güç modülasyonu çizgi genişliği değişim grafiği.	88
Şekil 4.20 Litografi sistemi foton eleği delikleri desenlendirme teknikleri	89
Şekil 4.21 a) Düşürme ve b) Islak Kimyasal Aşındırma yöntemleri şematik gösterimi.	94
Şekil 4.22 Olympus BX53 optik mikroskop.	97
Şekil 4.23 Optik profilometre çalışma prensibi şematik gösterimi [96].	98
Şekil 4.24 Zygo Zegage Plus Optik Profilometre	99
Şekil 4.25 Perkin Elmer Lambda 950 Spektrofotometre a) cihaz görseli b) optik sistem şematik gösterimi.	100

Şekil 4.26 Üzeri Ni-Ag ince film kaplamasına sahip olan ve olmayan B270 test camının geçirgenlik grafiği.	102
Şekil 4.27 Üzeri Ti Prime kaplamasına sahip olan ve olmayan B270 test camının geçirgenlik grafiği.	103
Şekil 5.1 Foton eleği parçasının üretim parametrelerine göre gruplara ayrılmış üç bölgesi.	105
Şekil 5.2 Litografi işleminde desenlendirme sırasındaki hız değişimi ile oluşan fotoduyarlı malzeme yüksekliği değişimi (sabit enerji modülasyonu, a), c) ve e) hızları 1.5 mm/s, b), d) ve f) hızları 0.5 mm/s'dir).	107
Şekil 5.3 Litografi sistemi yazım hızı (hareketli tabla hızı) ile delik desenlerindeki geometrik değişimler.	108
Şekil 5.4 Litografi sistemi objektif odak mesafesi değişimi ile delik desenlerindeki değişimi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 10X, skala 50µm).	109
Şekil 5.5 Foton eleği delikleri optik mikroskop görüntüleri hız:0.005mm/s şiddet a) 75 (bağıl) b) 50 (bağıl) c) 25 (bağıl), optik profilometre görüntüleri hız:0.005mm/s şiddet d) 75 (bağıl) e) 50 (bağıl) f) 25 (bağıl), odak değişimi 0-15µm.	109
Şekil 5.6 Foton eleği delikleri desenlendirilmesinde 0-15µm'lik odak değişimi a) optik mikroskop görüntüleri b) optik profilometre görüntüleri.	110
Şekil 5.7 Farklı şiddet dağılımlarına sahip desenlendirme işlemi sonrasında oluşan delik yapıları optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 25X, skala 20µm). Büyük delikler (>100µm) a) yüksek şiddet ile desenlendirme örnekleri b) optimum şiddet ile desenlendirme örnekleri, küçük delikler (10-20µm) c) yüksek şiddet ile desenlendirme örnekleri d) optimum şiddet ile desenlendirme örnekleri, küçük delikler optik profilometre görüntüleri e) yüksek şiddet ile desenlendirme örnekleri f) optimum şiddet ile desenlendirme örnekleri.	111

Şekil 5.8 Foton eleği parçası optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) a) optimum sürede tab edilmiş desenlendirme örneği b) fazla tab edilmiş desenlendirme örneği, tutunamayan yapılar desenlendirme alanında kayarak yer değiştirmektedir. 112

Şekil 5.9 Odak derinliği ve minimum odak çapı sayısal açıklık ilişkisi. 114

Şekil 5.10 Foton eleği desenlendirmesi odak mesafesi değişiminin delik yapısına etkisi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 25X, skala 20µm, f_0 en iyi odak mesafesi) a) en iyi odak mesafesinde 8 µm’lik uzaklıktaki desenlendirme ($f=f_0+8\mu\text{m}$) b) en iyi odak mesafesinde 2 µm’lik uzaklıktaki desenlendirme ($f=f_0+2\mu\text{m}$) c) en iyi odak mesafesi desenlendirmesi ($f=f_0$). 115

Şekil 5.11 Kritik şiddette, odak mesafesi ($f=f_0$) dışında desenlendirilmiş fotoduyarlı tabaksı optik profilometre görüntüsü (büyük delikler ~100 µm). 116

Şekil 5.12 Optimum odak mesafesi ve şiddette desenlendirilmiş bir delik yapısının optik profilometre görüntüsü. 117

Şekil 5.13 Foton eleği delik desenlendirmesi çevresinde oluşan kirlenme bölgesi optik profilometre görüntüleri a) yüksekliği 20-25nm olan kalıntı tabakası b) pürüz seviyesi ~3nm olan kalıntı izine rastlanmayan delik bölgesi. 119

Şekil 5.14 Foton eleği üretim hata mekanizmaları optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) a) iyi pasive olmamış alttaş üzerinden kayan ve yer değiştiren delik yapıları (düşürme işlemi öncesi).b) tab etme süresince iyi tutunamayan fotoduyarlı desenlerinin silinmesi (düşürme işlemi sonrası). 120

Şekil 5.15 Yüksek sıcaklık ince film kapla işlemi sonrasında oluşan silinemeyen yapı problemi a) optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) b) optik profilometre görüntüsü. 122

Şekil 5.16 Düşük fotoduyarlı katman kalınlığı sebebiyle silinemeyen yapılar optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm). 123

Şekil 5.17 Pozitif duvar yapısı sebebiyle oluşan hata mekanizmaları optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) a)LOF21 örneği orta büyüklük

deliklerdeki silinemeyen yapılar b) LOF22 küçük delikler bölgesi ince film kırığı görülen yapılar.
124

Şekil 5.18 LOF1 örneğine ait yapısal kusurlar (kırık yapılar) a) optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) b) optik profilometre görüntüsü (büyütme faktörü 50X), LOF 6 örneğine ait c) optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) d) optik profilometre görüntüsü (büyütme faktörü 50X) (tüm görüntüler küçük delikler bölgesinden alınmıştır). 125

Şekil 5.19 LOF13 örneği genişleyen yapılar optik mikroskop görüntüsü (ince film kaplama öncesi küçük delikler bölgesi) a) büyütm faktörü 25X, skala 20µm b) büyütm faktörü 50X, skala 10µm. 126

Şekil 5.20 Foton Eleği desenlendirmede işleminde tab etme süreci sonunda meydana gelen duvar eğimleri a) LOF25 örneği optik profilometre görüntüsü b) LOF26 örneği optik profilometre görüntüsü, (büyük delikler bölgesi, büyütm faktörü 20X). 128

Şekil 5.21 LOF13 düşürme sonrası a) optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm), düşürme işlemi öncesi optik profilometre görüntüleri (büyütme faktörü 50X) b) büyük delikler bölgesi c) orta delikler bölgesi d) küçük delikler bölgesi, düşürme işlemi sonrası optik profilometre görüntüleri (büyütme faktörü 50X) e) büyük delikler bölgesi f) orta delikler bölgesi g) küçük delikler bölgesi. 130

Şekil 5.22 LOF1 örneği kirlilik mekanizması ile oluşan istenmeyen ışık alanları optik mikroskop görüntüsü (alttan aydınlatma altında, büyütm faktörü 20X skala 50µm). 131

Şekil 5.23 Üretim süreçleri optimize edilmiş foton eleği parçası a) düşürme işlemi öncesi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X skala 200µm) b) düşürme işlemi sonrası optik mikroskop görüntüsü (alttan aydınlatma altında, büyütm faktörü 2.5X skala 200µm) c) düşürme işlemi sonrası optik profilometre görüntüleri (büyük delikler bölgesi, orta delikler bölgesi ve küçük delikler bölgesi, büyütm faktörü 50X). 132

Şekil 5.24 B270 alttaş üzerine kaplanmış Ni/Ag ince film yansıtma grafiği. 134

Şekil 5.25 Farklı şiddet modülasyonları ile desenlendirilmiş ETC örnekleri mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) a) ETC21 örneği, b) ETC20 örneği. 135

Şekil 5.26 Farklı odak mesafelerinde desenlendirilen ETC örneklerinin optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 10X, skala 50µm) a) ETC 15 örneği b) ETC 16 örneği.	136
Şekil 5.27 ETC21 örneği ıslak kimyasal aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 10X, skala 50µm).	137
Şekil 5.28 ETC12 örneği küçük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüleri a) aşındırma öncesi desenlendirme görüntüleri (büyütme faktörü 25X, skala 20µm), b) ıslak kimyasal aşındırma işlemi sonrası (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) c) a şeklinde işaretlenen bölgenin dijital olarak büyütülmüş görüntüsü d) b şeklinde işaretlenen bölgenin dijital olarak büyütülmüş görüntüsü.	139
Şekil 5.29 ETC11 örneği küçük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüleri a) en küçük delik yapıları (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) b) a şeklinde verilmiş bölgenin optik olarak büyütülmüş görüntüsü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm).	140
Şekil 5.30 ETC4 örneği a) ıslak kimyasal aşındırma öncesi foton eleği parçası optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) b) ıslak kimyasal aşındırma sonrası küçük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) c) ıslak kimyasal aşındırma sonrası optik profilometre görüntüsü (büyütme faktörü 50X).	141
Şekil 5.31 ETC8 örneği ıslak kimyasal aşındırma süreci sonrası optik mikroskop görüntüleri a) büyük delikler bölgesi (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) b) a şeklinde işaretlenen bölgenin yüksek optik büyütme altına görünümü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) c) küçük delikler bölgesi (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) b) c şeklinde işaretlenen bölgenin yüksek optik büyütme altına görünümü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm).	142
Şekil 5.32 ETC örnekleri optik mikroskop (büyütme faktörü 50X, skala 10 µm) a)ETC17 örneği (aşındırma: 9.42 M 3 s) b) ETC18 örneği (aşındırma: 9.42 M 1s).	143
Şekil 5.33 ETC6 örneği büyük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 10X, skala 50µm) a)ıslak kimyasal aşındırma öncesi b) ıslak kimyasal aşındırma sonrası.	144

Şekil 5.34 Aşındırma süreçleri optimize edilmiş farklı ETC örneklerden alınan optik profilometre görüntüleri a) büyük delikler bölgesi (büyütme faktörü 20X) b) küçük delikler bölgesi (büyütme faktörü 50X) c) orta delikler bölgesi (büyütme faktörü 20X) d) küçük delikler bölgesi (büyütme faktörü 50X).

145

Şekil 5.35 Aşındırma süreci optimize edilmiş ETC örneği a) aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) b) orta delikler bölgesi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) c) büyük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) d) orta delikler bölgesi optik profilometre görüntüsü (büyütme faktörü 50X).

146

Şekil 5.36 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirme hızları a) 0.1 b) 0.05 c) 0.025 d) 0.01 e) 0.005 ve f) 0.0025 mm/s (şiddet 100 (bağıl) ve pozlama süresi tüm örneklerde eşit ve 0.05 s'dir, altta verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütm faktörü 10X, skala 50µm, üstte verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütm faktörü 50X, skala 10µm'dir).

148

Şekil 5.37 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirmede kullanılan pozlama süresi a) 0.05, b) 0.04, c) 0.03, d) 0.04, e) 0.01 ve f) 0.005 s, (şiddet 40 (bağıl) ve hız tüm örneklerde eşit ve 0.005 mm/s'dir, altta verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütm faktörü 10X, skala 50µm, üstte verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütm faktörü 50X, skala 10µm'dir).

149

Şekil 5.38 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirmede kullanılan ışık kaynağı şiddetleri a) 100, b) 90, c) 80, d) 70, e) 60 ve f) 50, (pozlama süresi tüm desenler için eşit ve 0.005s'dir. hız tüm örneklerde eşit ve 0.005mm/s'dir, altta verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütm faktörü 10X, skala 50µm, üstte verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütm faktörü 50X, skala 10µm'dir).

150

Şekil 5.39 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirmede kullanılan odak mesafeleri a) +5 µm, b) +4 µm, c) +3 µm, d) +2 µm, e) +1 µm ve f) en iyi odak ($f=0\mu\text{m}$), (pozlama süresi tüm desenler için eşit ve 0.005s'dir. Hız tüm örneklerde eşit ve 0.005mm/s'dir, şiddet 100, (bağıl) altta verilen mikroskop görüntülerinde büyütm faktörü 10X, skala 50µm, üstte verilen optik mikroskop

görüntülerinde büyütme faktörü 50X, skala 10 μ m'dir).	
151 Şekil 5.40 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirmede kullanılan hız 1mm's'dir, (pozlama süresi tüm desenler için eşit ve 0.003s'tür, kullanılan şiddet 100 (bağıl). (büyütme faktörü 25X, skala 20 μ m).	154
Şekil 5.41 a) Üretim etkilerini belirlemek amacıyla tasarlanan foton eleği parçası tasarım görüntüsü b) düşürme yöntemi ile üretilmiş foton eleği parçası optik mikroskop görüntüsü c) ıslak kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiş foton eleği parçası optik mikroskop görüntüsü, (büyütme faktörü 2.5X, skala 200 μ m).	156 Şekil
5.42 Tasarlanan ($d/w=1$) foton eleği delik çapları ile üretilen örneklerin delik çaplarını Fresnel bölge numarasına göre dağılım grafiği	157
Şekil 5.43 a) Tasarlanan ($d/w=1$) ve üretilen foton eleği parçalarındaki d/w oranlarının Fresnel bölgelerine dağılım grafiği b) d/w oranları için atanan polinom fonksiyonları grafiği.	158
Şekil 5.44 LOF18 örneği ölçülen d/w oranları ile polinom fonksiyon atama yöntemi d/w oranları karşılaştırması.	159
Şekil 5.45 LOF18 gerçek d/w oranları ile polinom atama yöntemi ile oluşturan d/w oranları simülasyon sonuçları a) bağıl şiddet grafiği b) normalize şiddet grafiği.	160
Şekil 5.46 a) kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilen foton eleği parçası ilk dört bölge optik mikroskop ölçüm sonuçları (büyütme faktörü 10X, skala 50 μ m) b) ölçülen d/w oranları ile atanan fonksiyon Fresnel bölge numarasına karşı d/w oranı grafiği.	161
Şekil 5.47 Üretim örneklerinden ölçülen d/w oranlarını ile oluşturulmuş fonksiyon atama grafikleri, (noktalı grafikler gerçek d/w oranlarını kırmızı çizgiler ise atanan ikinci derece polinom fonksiyonları göstermektedir). Islak kimyasal aşındırma örnekleri a)ETC6 b) ETC5 c) ETC16, düşürme örnekleri d)LOF3 e)LOF18 f)LOF24 örneklerini göstermektedir.	162
Şekil 5.48 Üretilen örneklerden alınan delik çapı ölçüm sonuçları ile atanan fonksiyonlar yardımıyla simüle edilen bağıl şiddet grafiği.	163

Şekil 5.49 ETC6 örneği tasarım ($d/w=1$) ve fonksiyon atama yöntemi ile oluşturulan a) normalize şiddet b) bağıl şiddet grafikleri.	164
5.50 LOF18 örneği tasarım ($d/w=1$) ve fonksiyon atama yöntemi ile oluşturulan a) normalize şiddet b) bağıl şiddet grafikleri	165
Şekil 6.1 Tez çalışmaları kapsamında üretilmiş foton eleği a) sağ bölge optik mikroskop görüntüsü b) sol bölge optik profilometre görüntüsü c) sol bölge optik mikroskop görüntüsü d) sağ bölge optik profilometre görüntüsü (optik mikroskop görüntüleri büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm, optik profilometre görüntüleri büyütme faktörü 2.75X).	169
Şekil 6.2 Tez çalışmaları kapsamında üretilmiş foton eleği a) üst bölge optik mikroskop görüntüsü b) üst bölge optik profilometre görüntüsü c) alt bölge optik mikroskop görüntüsü d) alt bölge optik profilometre görüntüsü e) orta bölge optik mikroskop görüntüsü f) orta bölge optik profilometre görüntüsü, (optik mikroskop görüntüleri büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm, optik profilometre görüntüleri büyütme faktörü 2.75X).	170
Şekil 6.3 Tez çalışmaları kapsamında üretilmiş foton eleği fotoğrafı.	171

SİMGELER VE KISALTAMALAR

Simgeler

e:	elektron
λ :	dalgaboyu
μm :	mikro metre
HNO_3 :	nitrik asit
F:	odak uzaklığı
R_n :	n. Fresnel bölge sınırı
δm :	Fresnel bölge plakası uzamsal çözünürlüğü

r_n :	n. Fresnel bölgesindeki deliğinin merkezi ile optik eksen arasındaki
mesafe	
w_n :	n. Fresnel bölge genişliği

Kısaltmalar

Ag:	Gümüş
APS:	Advanced Plasma Source
AVS-PS:	Tüm Değişken Boyutlu Foton Eleği (all variable sized photon sieve)
CDS-PS:	Sabit Çap Değerli Foton Eleği (constant diameter sized photon sieve)
DMD:	Digital Micromirror Device
DWL:	Direct Write Laser
ETC:	Kimyasal Aşındırma Örnekleri
EUV:	uç ultraviyole (extreme UV)
FWHM:	Full Width At Half Maximum
FZP:	Fresnel Zone Plate
LOF:	Lift Off Örnekleri
M:	molarite
N:	normalite
NA:	nümerik açıklık
Ni:	nikel
OMS:	Optical Monitoring System
PAC :	fotoaktif bileşik
PS:	Photon Sieve: Foton Eleği
QCM:	Quartz Crystal Measurement
SVS-PS:	Parçalı Değişken Boyutlu Foton Eleği (segmented variable sized photon sieve)

UV: Ultraviolett



1. GİRİŞ

Foton elekleri mikro kırınım optikleri olarak bilinen süper çözünürlük optikleridir. Bu optiklerin geliştirilmesindeki en büyük etken kırılma prensibi ile çalışan optiklerin kısa dalga boylarında (X ışını bölgesi) yeterli performansa ulaşamamasıdır. Kırılma optikleri kısa dalgaboyundaki alanı dışında görünür bölge optiklerinde de uzun süredir kullanılmaktadır. Bununla birlikte kırılma optiklerinde kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları kısa dalgaboylarında problem oluşturmaktadır. Fresnel bölge plakası gibi kırınım prensibi ile çalışan optikler ise kısa dalgaboylu elektromanyetik dalgaları odaklamak için etkili bir çözüm sunmaktadır [1]. Kısa dalgaboylarındaki odaklama özelliklerine ek olarak, kırınımlı optikler kırılma optiklerine göre ağırlık ve hacim yönünden daha avantajlıdır.

Bir foton eleği Fresnel bölge plakasındaki bölgelere dağıtılmış birçok delikten oluşan bir kırınım optiğidir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar ile bir foton eleğinin Fresnel bölge plakasında meydana gelen ikincil maksimumları ve daha yüksek dereceli kırınım etkilerini bastırarak daha net bir odaklama sağlayabildiğini göstermiştir [2]. Bu özellikleriyle birlikte kırınım optikleri dalgaboyuna sıkı bağlı bir karakter sergiler. Tasarımı yapılan bölge haricindeki bir dalgaboyu foton eleği ile odaklanmaya çalışıldığında renk sapması gözlemlenmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda bu renk sapmasını düzeltmek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır [3–5]. Deneysel çalışmaların hepsinde renksel kusurlar birden fazla mercek sistemi ile giderildiğinden tek kırınım optiği ile geniş bir aralıkta çalışan foton eleği üretilmemiştir. Dalgaboyu bağımlılığı konusunda yapılan güncel çalışmalarda hibrit yapılarla bağımlılığın azaltılması fikri geliştirilmeye devam etmektedir [6,7]. Foton eleklerinde geliştirilmesi gereken diğer önemli özellikler görüntüleme alanındaki darlık ve şiddet problemleridir. Görüntüleme alanındaki açısal darlık bu tip optiklerin güncel uygulamalardaki kullanımını kısıtlamaktadır. Bu problemin çözümü için güncel çalışmalar yapılmaktadır [8]. Öte yandan bu tip optiklerdeki temel problemlerin başında verimlilik gelmektedir. Özellikle Fresnel bölge plakaları ile karşılaştırıldıklarında verimlerinin düşük olduğu görülmektedir. Literatürde bu konu ile ilgili birçok çalışma bulunmakla birlikte foton eleklerinin doğası gereği kırılma optiklerine göre oldukça sınırlı bir verim değerine sahiptirler [9–11]. Geliştirilmeye açık birçok parametresi olan foton eleklerindeki en

önemli problemlerin başında verim gelmektedir. Günümüzde foton eleklerinin birçok kullanım alanı mevcuttur [12–16]. Bu sebeple verim çalışmaları genellikle uygulama alanına bağlı olarak geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır.

Verimin artırılması temel olarak tasarıma bağlı iken diğer taraftan kırınım prensiplerinin düzgün çalışabileceği üretimler de önem kazanmaktadır. Literatürde foton eleklerinin üretim yöntemi olarak farklı teknikler [17] önerilse de üretimlerin büyük bir çoğunluğu litografi tekniğinin özel bir uygulaması olan elektron demeti litografi tekniği ile yapılmaktadır [18–20]. Foton eleklerinin kırınım optiği olarak yüksek performansta çalışabilmesi hem tasarım sürecinin hem de üretim sürecinin detaylı bir şekilde çalışması ve optimum sonuçların elde edilmesine bağlıdır.

Bu çalışmada özellikle verim ve foton eleği şiddet dağılımı ile çözünürlük modülasyonları üzerinde durulmuştur. Özellikle çalışılan şiddet çözünürlük modülasyonları literatürde tek tek ele alınan ve özellikle şiddet üzerinde yoğun çalışmaların olduğu bir konudur. Tez kapsamında temel amaç olarak çalışılmayan çözünürlüğün de modülasyonlarının yapılabilmesi için tasarım çalışmaları yürütülmüştür. Foton eleklerinde yapılan tasarımların en temel halleri olan Fresnel bölge plakasına yerleştirilmiş delikler süper çözünürlük fenomenini sağlamaya yeterli performans göstermektedirler. Öte yandan foton eleklerinin teorisi incelendiğinde çözünürlük değerlerinin de şiddet ile bağlı olarak modüle edilebileceği görülmüştür. Bu temelden yola çıkarak kullanım alanına yönelik olan tasarımlar geliştirilmiş ve şiddet dağılımı yanında çözünürlük değerleri de teorik olarak modüle edilebilmiştir. Yapılan tasarımların yanı sıra tez çalışmaların büyük bir çoğunluğunu foton eleği üretimi çalışmaları oluşturmaktadır. Literatürde oldukça az örneği olan fotolitografi tekniği ile foton eleği üretimi bu çalışmanın temel konularından olmuş ve üretim süreçleri detaylı bir şekilde çalışılmıştır. Literatürde açık olarak görülmeyen şiddet çözünürlük modülasyon tasarımları ve fotolitografi tekniği ile üretimler bu çalışmanın temel konularıdır. Çalışma boyunca fotolitografi tekniği ile üretilebilecek çeşitli tasarımlar ve fotolitografi tekniğinin foton eleği üretimindeki iyileştirmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Foton eleklerine ait temel bilgiler Bölüm 2’de, çalışmalar kapsamında yapılan tasarımlar ve bu tasarımların çalışıldığı simülasyon programı detayları Bölüm 3’de verilmektedir. Üretime yönelik teknik bilgi ve üretim süreçleri Bölüm 4’de detaylı bir şekilde

anlatılmaktadır. Tez kapsamında yapılan tüm üretimler ve tekniklerinden elde edilen tüm ölçüm sonuçları ile süreçlerin gelişimi Bölüm 5’de Sonuç ve Yorum bölümünde tartışılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

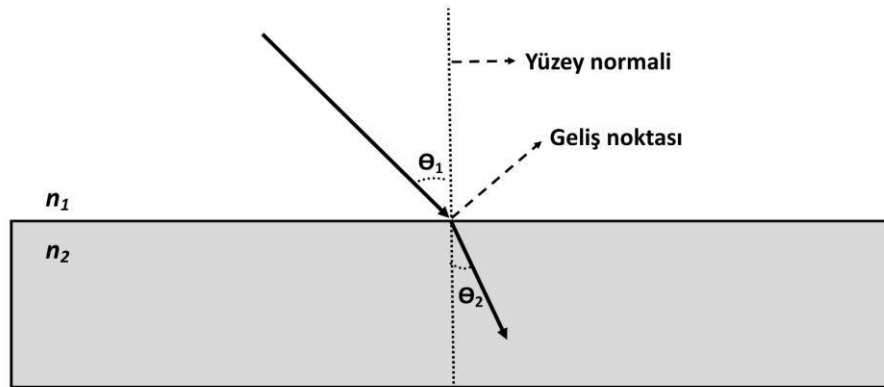
Bu tezde yapılan tüm çalışmalara ait teorik bilgiler bu bölümde yer almaktadır. Teorisi bu bölümde verilen bilgiler ile yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar Bölüm 3. ve Bölüm 4.’de verilmektedir.

2.1. Optik İlkeler

2.1.1. Kırılma ve Kırınım

Kırılma ve kırınım ışığın dalga özelliğinden dolayı ortaya çıkan iki özelliğidir. Kırılma ve kırınım prensipleri ortak özelliği kullanarak ortaya çıksa da iki fenomen farklı özellik göstermektedir. Kırılma olayı ışığın kırılma indisi farklı iki ortamdaki geçişini tasvir eder. Bu hareket basitçe anlatılırsa ışık dalgasının farklı kırılma indise sahip ortamlarda yön değiştirmesi olarak adlandırılabilir. Işık dalgası iki ortamın sınırında yön değiştirerek hareketine devam eder. Işığın sınır bölgeye geldiği noktaya geliş noktası, bu noktadan sınır yüzeyine çizilen dik doğruya yüzey normali adı verilir. Geliş açısı (θ_1) ve kırılma açısı (θ_2) Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Fermat ilkesine göre ışık en kısa zaman harcadığı yolu tercih etmektedir, buradan kırılma yasası türetilebilir. Bu yasa Snell yasası olarak da karşımıza çıkmaktadır [21]. Snell yasası,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad 2.1$$



Şekil 2.1 Farklı kırılma indislerine sahip ortamdaki ışık hareketi.

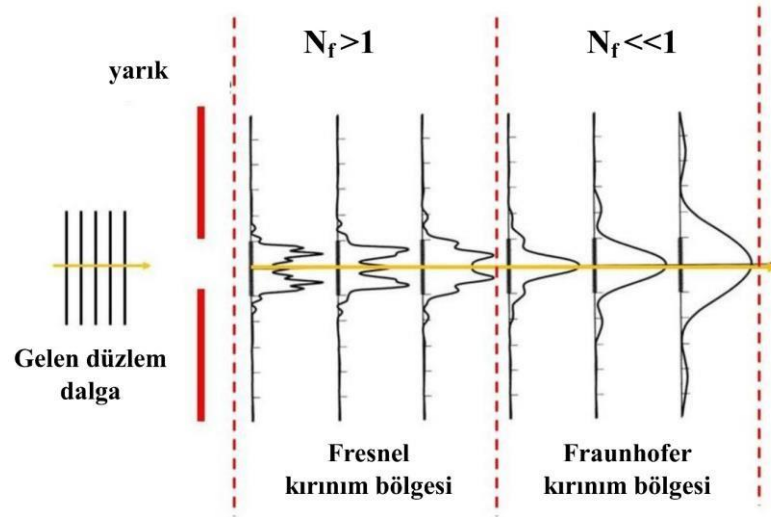
Kırınım olayı ise, kırılmadan farklı olarak, ışık dalgasının bir engel ile karşılaşması ile oluşur. Kırınım olayında ışık dalgası bir engel ile karşılaştığında bükülür ve yayılır. Işığın kırılıp bükülmesi ile girişim deseni ortaya çıkar. Işık dalgasının karşılaştığı engel opak veya geçirgen olabilir. Kırınım olayı dalganın genliğinin ve/veya fazının değişmesiyle olduğundan bu özellikleri sağlayan bir engelin varlığı yeterli olmaktadır. Bu olaya verilen en yaygın örnek tek yarıklı deneyidir. Kırınım olayı detayları ile birlikte sonraki bir bölümde anlatacağız.

2.1.2. Kırınım Teorileri

Kırınım olayı daha önce de anlatıldığı üzere ışığın dalga özelliğinden dolayı ortaya çıkan bir özelliktir. Kırınım olayının daha iyi anlaşılması için Huygens prensibinin tekrarlanması faydalı olmaktadır. Bu prensip dalganın nasıl yayıldığını, Huygens- Fresnel prensibi ise ilerleme sırasında geri yansımanın neden gerçekleşmediği açıklamaktadır. Bu iki prensip açıklandıktan sonra kırınım fenomeni tartışılacaktır. İki tip kırınım olayı vardır, bunlar; Fresnel kırınımı ve Fraunhofer kırınımıdır. Temel olarak anlatılmak istenirse, ışık kaynağı ve görüntüleme düzlemi arasındaki yol farkının fazla olduğu durumlarda Fraunhofer yani uzak alan kırınımı, mesafenin yakın olduğu durumlarda ise, birkaç dalgaboyu ve daha az mesafeler söz konusunu olduğunda, Fresnel kırınımı yani yakın alan kırınımı ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.2’de tek yarıktan kırınım durumunda oluşan kırınım deseni görülmektedir. Burada N_f Fresnel sayısıdır. Bu sayının birden büyük ve birden çok küçük olduğu durumlarda kırınım tipi değişmektedir.

$$N_f = \frac{(d)^2}{b\lambda} \quad 2.2$$

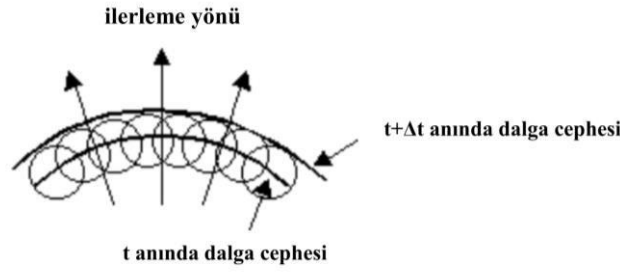
Burada d açıklık genişliği, λ dalga boyu ve b gözlem düzlemi ve yarıklı arasındaki mesafedir [22].



Şekil 2.2 Düzlem dalga yarık etkileşimi sonrasında oluşan yakın alan ve uzak alan şiddet dağılımı [23].

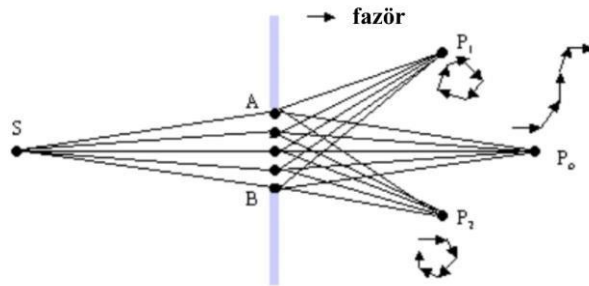
2.1.3. Huygens, Huygens Fresnel ve Eğim Faktörü

1678 yılında Hollandalı fizikçi Christiaan Huygens, Huygens prensibi olarak bilinen dalga yayılması konseptini tanıtmıştır [24]. Bu prensibe göre birincil dalga cephesindeki her bir nokta ikincil küresel bir dalga kaynağı olarak davrandığı ve sonraki bir zamanda birinci dalga cephesinin bu dalgacıkların birleşimi olacağı verilmektedir [21,25]. Işık ışınları serbest uzayda ışık hızında (c) ilerlerken düz çizgiler şeklinde tasvir edilebilirler. Bu yayılım Şekil 2.3’de verilmektedir. Huygens prensibi, dalga teorisinin geometrik optik yasalarını nasıl hesaba katabileceğini açıklamak için gerekli dalga yayılımının doğası hakkında fikir vermektedir. Fakat Huygens prensibi ışığın zaman içindeki yönelimi hakkında bilgi vermemektedir. Neden küresel bir dalga kaynağından dışarıya doğru hareket ettiğini ve neden tekrar içeriye dönük bir hareket sergilemediğinin cevabını vermemektedir. Fransız fizikçi Augustin Jean Fresnel bu problemi 1816 yılında yayınladığı çalışmasında Huygens prensibini modifiye ederek çözmüştür [24].



Şekil 2.3 Küresel dalgalar için Huygens prensibi temsili [3].

Bu ilkede engellenmemiş her bir noktanın yeni bir dalga kaynağı olarak davrandığını ve bu noktaların küresel ikincil dalga cephelerini oluşturduğu verilmektedir. Engel bölgesinin ötesinde optik alanın genliğinin ikincil dalga kaynaklarının üst üste binmesi olduğu da bu ilke ile verilmektedir [26]. Huygens Fresnel prensibine uyan ışınların dağılımı Şekil 2.4'te verilmektedir. Şekil 2.4'te verilen her bir küçük ok bir fazörü tanımlamaktadır. Fazörler dalgacığın genliğini ve fazını tanımlamak için kullanılmaktadır. Optik alanda herhangi bir bölgede gözlenen genlik P_0 , P_1 ve P_2 matematiksel olarak toplanan fazörlerdir. Gelen düzlem dalga için engel teşkil etmeyen her nokta (AB arasındaki siyah noktalar) ikincil koherent bir dalga kaynağı olarak davranmaktadır. Gelen dalga'nın dalgaboyu açıklıktan büyük olduğunda P_0 , P_1 ve P_2 noktalarında ışığın girişimi gözlenmektedir. Burada koherent kaynakların yapıcı girişimi gözlemlenir ve ilgili noktalar aydınlık bölge olarak adlandırılırlar. Gelen dalga'nın dalgaboyu büyüdükçe çıkan dalga genişlemektedir. Eğer P_0 noktasına bir foton sayacı yerleştirilirse bu sayaç fazla foton sayacaktır. Eğer yarık genişliği azaltılırsa veya daha uzun dalgaboylu ışık kullanılırsa P_1 ve P_2 bölgesindeki foton sayısı artacak fakat P_0 bölgesindeki sayı azalacaktır.



Şekil 2.4 Küçük bir yarık ile ışık etkileşimi sonrasında oluşan kırınım deseni optik alan dağılımının fazör yöntemi ile gösterimi [4].

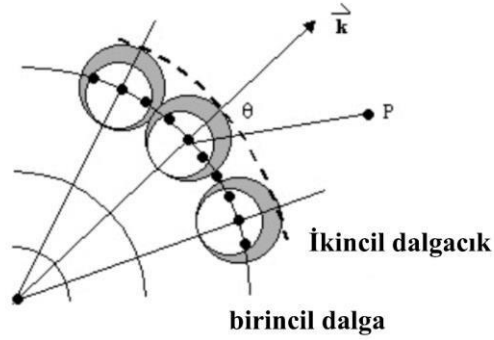
1883 yılında Rus teorik fizikçi Gustav Kirchhoff [27], Kirchhoff skaler diferansiyel dalga eşitliğinin çözümüne dayanan titiz bir model geliştirmiş [26] ve eğiklik faktörünü $K(\theta)$ tanıtmıştır.

$$K(\theta) = 1/2 (1 + \cos\theta) \quad 2.3$$

Burada θ açısı birincil dalga cephesine ait $\mathbf{k}$ vektörünün normal ile yaptığı açıdır. Eğim faktöründen etkilenen ikincil dalgacıkların şematik gösterimi Şekil 2.5'te verilmektedir. P noktasındaki genlik A ise [24],

$$A = K(\theta)A_0 \quad 2.4$$

Burada A_0 gelen dalganın genliğidir. $K(\theta)$ ise $\mathbf{k}$ vektörünün açısal bağımlılığını vermektedir. θ 'nın değişik değerlerine göre genlik değişim göstermektedir. Örneğin $\theta=0^\circ$ durumunda $K(\theta)=1$, $\theta=90^\circ$ durumunda $K(\theta)=0.5$ ve $\theta=180^\circ$ durumunda $K(\theta)=0$ olmaktadır. Bu sonuç ile teorik olarak geriye dönen dalganın olmadığı açıklanmaktadır.



Şekil 2.5 Eğim faktörü $K(\theta)$, $\mathbf{k}$ vektörünün büyüklüğü gri alanda θ 'nın fonksiyonu olarak değişmektedir. $\theta = \pi$, $K(\theta) = 0$ durumunda geriye doğru devam eden dalganın genliği 0 olduğu noktayı göstermektedir [4].

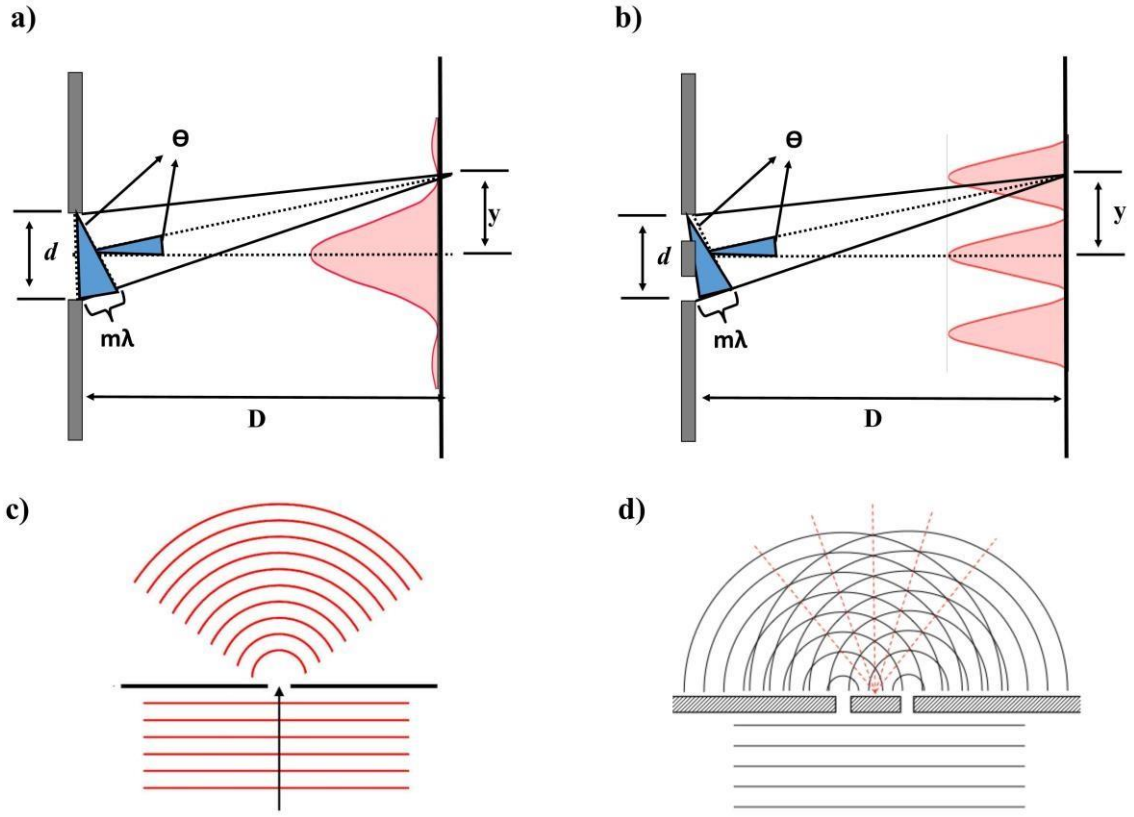
2.1.4. Fraunhofer Teorisi

Kırınım etkilerinin bir başka sınıflandırması, sonuçta ortaya çıkan alanları hesaplarken mümkün olan matematiksel yaklaşımlardan kaynaklanmaktadır. Hem ışık kaynağı hem de gözlem ekranının kırınım açıklığından yeterince uzak olması durumunda, açıklık ve

gözlem ekranına gelen dalga cephelerinin düzlem olarak kabul edilebilir, bu şekilde oluşan kırınım olayına Fraunhofer veya uzak alan kırınımı denmektedir [28]. Fraunhofer kırınımı ilk olarak 1823'te Joseph Fraunhofer tarafından önerilmiştir [26]. Fraunhofer kırınımının aksine gözlem ekranı ve kırınım açıklığı arasındaki alan azaldığında dalga cephesinin eğriliği hesaba katılmalıdır. Bu durumda kırınım olayı Fresnel kırınımı veya yakın alan kırınımı olarak adlandırılır. Uzak alan kırınımında, görüntüleme ekranı açıklığa göre hareket ettiğinden, kırınım deseninin boyutu eşit şekilde ölçeklenir, ancak kırınım deseninin şekli değişmez. Yakın alan yaklaşımında durum daha karmaşıktır. Kırınım deseninin hem şekli hem de boyutu, açıklık ve ekran arasındaki mesafeye bağlıdır. Ekran açıklıktan uzağa kaydırıldığında, açıklığın görüntüsü sırayla geometrik optikler, yakın alan kırınımı ve uzak alan kırınımı ile öngörülen formlardan geçer. Başlangıçta kırınım desenlerini hesaplamak için kullanacağımız Huygens-Fresnel ilkesinin yaklaşık bir değer olduğu belirtilmelidir. Işık, opak bir ekrana nüfuz ettiğinde, gelen radyasyonunun ekran içinde harekete geçen elektronik osilatörler ile etkileşiminin, ekranın ötesinde sıfır net alan üretecek şekilde olduğu anlamına gelir. Bu olay, osilatörlerin dağılımının kesintiye uğradığı, ekranda bir açıklığın kenarında, oluşmaz. Huygens-Fresnel prensibi elektronik osilatörlerin ekran malzemesinde açıklığın kenarındaki kırınım alanına katkısını içermemektedir. Bununla birlikte, bu kenar etkileri sadece gözlem noktası açıklığın kendisine çok yakın olduğunda önemlidir [28].

2.1.5. Tek Yarıktaki Kırınım ve Çift Yarıktaki Kırınım

Tek bir yarık açıklığından çok uzakta bir nokta kaynağı düşünüldüğünde bu yarığa gelen dalganın düzlem dalga olduğu düşünülebilir. Yarık genişliği d ve gözlem ekranı ile yarık arası mesafe D kadar olduğu durum için Şekil 2.6a'daki durum gözlenir.



Şekil 2.6 a) tek yarıktaki b) çift yarıktaki Fraunhofer kırınımı, c) tek yarıktaki kırınım dalga gösterimi d) çift yarıktaki kırınım ve girişimin dalga gösterimi [29].

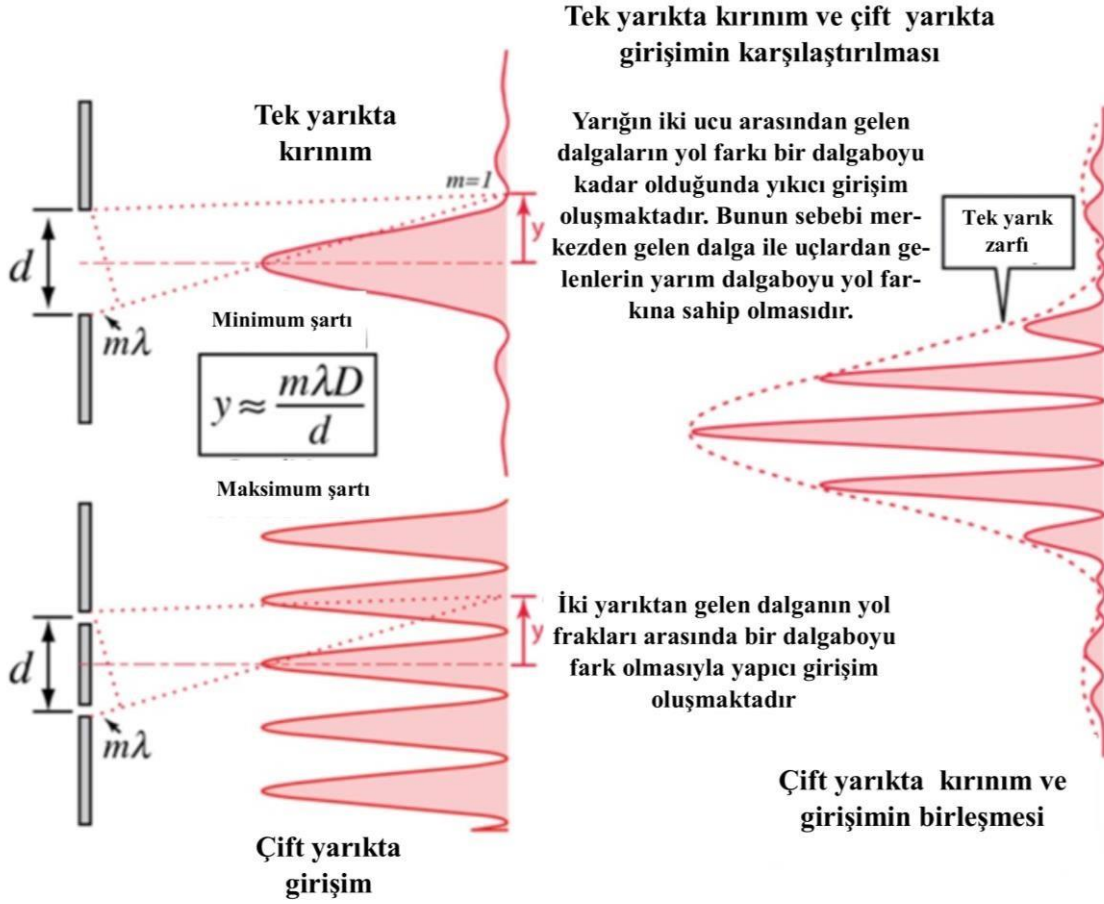
Üç ışık ışınının d yarığından geçtiği düşünülüğünde merkez eksenden y kadar uzaktaki noktaya varan ışıklardan üst ve orta noktalardan gelen ışınlar birbirleriyle zıt fazlı diğer bir değişle yarım dalgaboyu faz farkına sahip olmaları durumunda birbirlerini sönmüleyeceklerdir. Orta ve alt noktadan gelen ışınlar da aynı şekilde yarım dalgaboyuna karşılık gelen faz farkına sahip olmaları durumunda birbirlerini sönmüleyecekler. Sonuç olarak, üst ve alt ışınlar arasındaki yol farkı λ 'nın bir tam katı ise, gözlem düzlemindeki merkez eksenden y kadar uzaktaki noktada sıfır şiddet beklenir. Tek bir yarık ile Fraunhofer kırınımında minimum eşitliği şöyle yazılabilir [29].

$$d \sin \theta = m \lambda \quad m = \pm 1, \pm 2, 3 \quad 2.5$$

θ sıfır olduğunda, ışık dalgası kırılmadan yarıktan geçer ve sıfırıncı maksimum olarak adlandırılan merkez aydınlığın tepe noktasını oluşturur. Bu kırınımına uğramayan ışık arka

planda gürültü sinyaline neden olabilmektedir. Bununla birlikte, çift yarıkli bir açıklık için, iki yarığın yol uzunluğu arasındaki λ kadarlık yol farkı, yapıcı girişime neden olur.

Böylece maksimum şiddetler Eşitlik 2.5'te hesaplanan konumlarda gözlenir (Şekil 2.6b). Tek yarık kırınımı ve çift yarık girişimi birleştirildiğinde, çift yarık açıklığı üzerindeki Fraunhofer kırınımı için oluşan model Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Tek ve çift yarıkta kırınım olayının yarattığı girişim ve kırınım etkileri ile çift yarıkta, kırınım ve girişim alan dağılımı bileşke şiddet dağılımı gösterimi [30].

Fraunhofer tek yarık ve çift yarık kırınımalarında oluşan etki tek yarıktan kırınım ve çift yarıktan girişim etkisidir. Çift yarık kırınım olayında ilk olarak her bir yarıktan gelen dalganın girişimi (Bkz. Şekil 2.6b) gözlenirken ikinci etki ise her bir yarıktan gelen kırınım (Bkz Şekil 2.6a) etkisidir. Bu etkilerin bileşke alanı çift yarık kırınım desenini oluşturmaktadır.

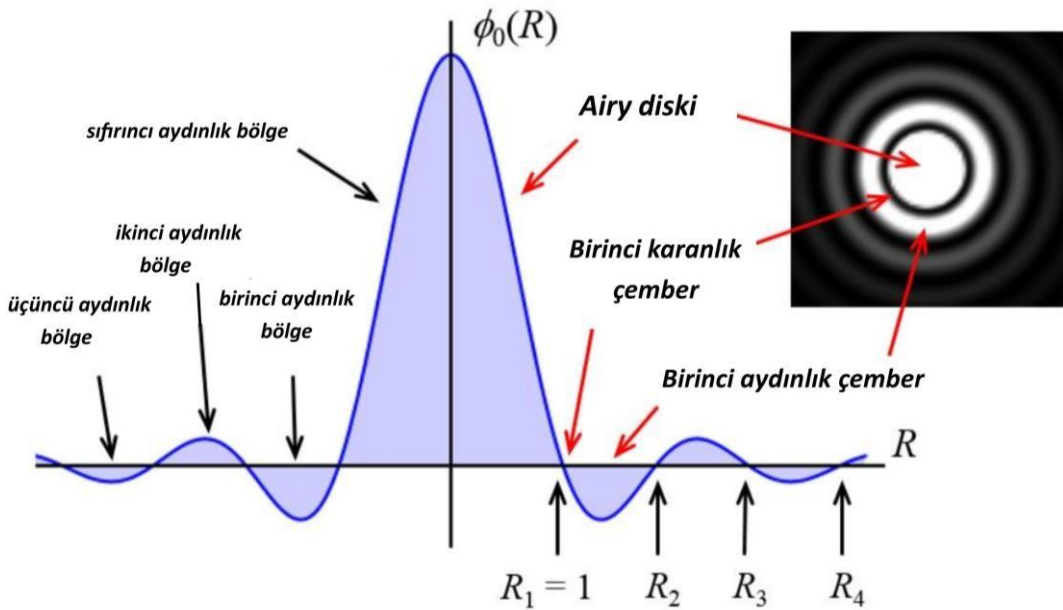
Fraunhofer ve Fresnel kırınımlarını birbirinden ayırmak için basit bir eşitlik kullanılabilir.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{d'} + \frac{1}{d} \right) \delta^2 \ll \lambda \quad 2.6$$

δ açıklığın karakteristik boyutu (dairesel açıklık söz konusu olduğunda bu çapa, dikdörtgen açıklık söz konusu olduğunda ise daha kısa uzunluğuna karşılık gelir), d' kaynaktan açıklığa olan mesafe, d açıklıktan gözlem noktasına olan mesafe ve λ gelen ve kırılan ışığın dalga boyudur. Eşitlik 2.6 ile belirtilen kriterlerin karşılanması durumunda, Fraunhofer kırınımının koşulları sağlanmış olur. Öte yandan, Eşitlik 2.6'da ifade edilen kriterlerin karşılanmaması durumunda, kaynak veya gözlem noktası açıklığa yeterince yakındır, öyle ki, dalga cephesinin eğriliği dikkate alınmalıdır, yani kırınımın analiz edilmesi gerekir. Bu durumda geçerli olan kırınım tipi Fresnel kırınımıdır.

2.1.6. Dairesel Açıklıktan Fraunhofer Kırınımı ve Airy Deseni

Tek yarıktaki kırınım olayındaki yarık daireSEL bir açıklık ile değiştirildiğinde ortaya çıkan kırınım deseni Airy deseni olarak adlandırılmaktadır. Bu desen ismini George B. Airy'den almaktadır [26]. Şekil 2.8'de gösterilen Airy deseni, çok daha soluk merkezli daireSEL halkalarla çevrili daireSEL bir noktadan, Airy diskinden oluşur. Airy diskisi veya parlak merkez noktaya "birincil maksimum", etrafındaki halkaların geri kalanına ise "ikincil maksimum" denir [26].



Şekil 2.8 İdeal bir Airy deseninin iki boyutlu görünümü ile aynı alan dağılımını detektörde oluşturduğu şiddet deseni görüntüsü. Burada R normalize koordinat ve $\emptyset_0(R)$ alan dağılımıdır [31].

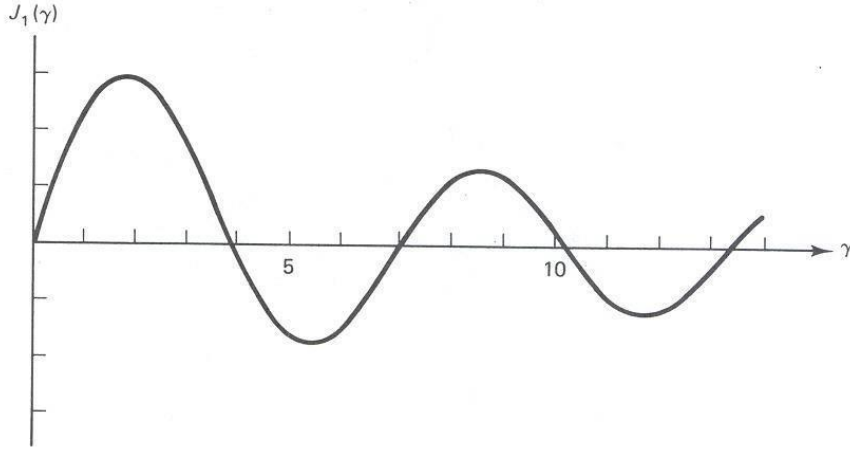
Airy diski deseninin şiddet değişimi Eşitlik 2.7 ile verilmektedir.

$$I = I_0 \left[\frac{J_1(\gamma)}{\gamma} \right]^2 \quad 2.7$$

Burada I_0 kırınım deseni merkez noktasının şiddeti, 0. mertebe maksimum, birinci tip 0. mertebe Bessel fonksiyonu olarak verilir.

$$\gamma = \left(\frac{k}{2} \right) D \sin \theta \quad 2.8$$

Eşitlik 2.8’de verilen D açıklığın çapı, k dalga vektörü (θ) ve açıklık normali ile yapılan açıdır. Birinci tip 0. mertebe Bessel fonksiyonunun grafiği, Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Bu fonksiyon sinüs fonksiyonuna benzer salınım davranışı sergiler. Bununla birlikte, fonksiyon argümanı arttıkça salınımların genliği azalır.



Şekil 2.9 Birinci tip sıfırncı mertebe Bessel fonksiyonu grafiği.

Birinci tip 0. mertebe Bessel fonksiyonu, $\gamma=3.832$ olduğunda ilk kez sıfıra gitmektedir. Bu, Şekil 2.8’de gösterilen kırınım düzenindeki ilk koyu halkaya karşılık gelir. İlk koyu halkanın konumu, Eşitlik 2.9’da açıklandığı gibi, kaynak aydınlatmasının dalga boyu ve açıklığın çapı ile belirlenir.

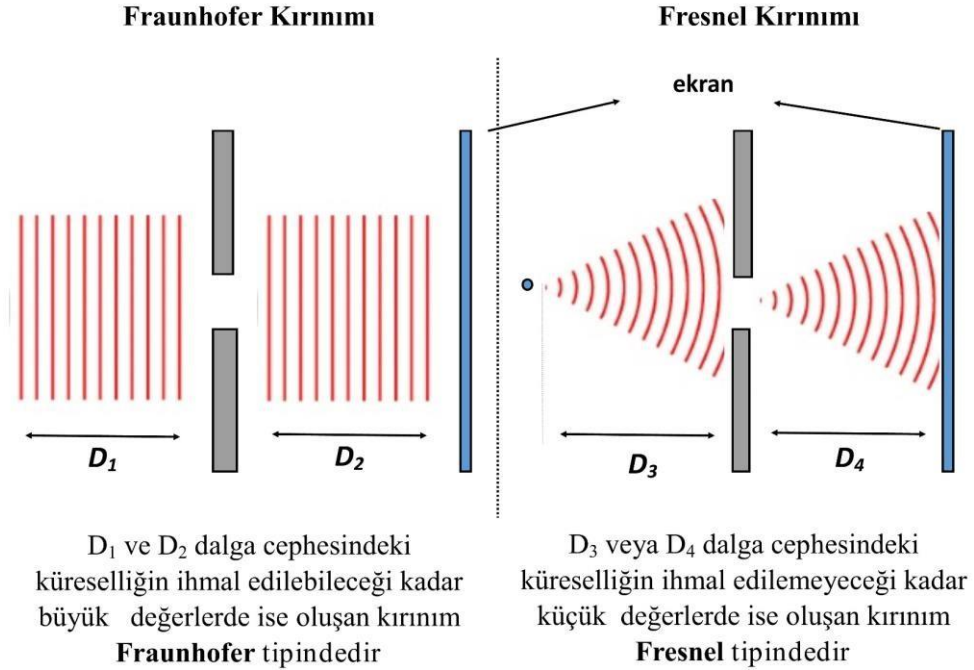
$$\gamma = 3.832 = \left(\frac{k}{2}\right) D \sin \theta, D \sin \theta = 1.22 \lambda \quad 2.9$$

Airy deseni, bir nokta kaynağından gelen görüntülerin bulanık olmasına neden olur. Açıklığı olan bir optik sistem için bulanıklaştırma, sistemin kusurları (küresel, kromatik, astigmatizm, vb.) tarafından üretilenlerden daha büyükse, görüntüleme işleminin kırınım sınırlı (diffraction limited) olduğu söylenir ve görüntünün en iyi bu şekilde elde edilebilir olduğu söylenebilir.

Kırınım limitli, kırınımın etkisi diğer tüm optik kusurların önüne geçtiğinde, optik sisteme verilen isimdir. Diğer bir deyişle optik kusurlar yeterince düşük ise sistemin kusurunda baskın olan fenomen kırınım fenomeni olmuş olur.

2.1.7. Fresnel Kırınım Teorisi

Daha önce de belirtildiği gibi, ışık kaynağı veya gözlem düzlemi kırıcı açıklığa yeterince yakın olduğunda kırılma olayı, Fresnel kırınımı olarak tanımlanır. Bu durumda gelen ışık artık düzlemsel olarak kabul edilemez duruma gelir. Fraunhofer ve Fresnel kırınımının şematik gösterimi Şekil 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.10 Tek yarıktan a) Fraunhofer kırınımı b) Fresnel kırınımı dalga dağılımı.

Tek bir yarık durumunda, kırınım modelinin şiddet dağılımı Eşitlik 2.10'daki gibi tarif edilebilir,

$$I = \frac{1}{2} \left(\frac{ab\lambda}{a+b} \right) \left[\left(\int \cos \frac{1}{2} \pi v^2 dv \right)^2 + \left(\int \sin \frac{1}{2} \pi v^2 dv \right)^2 \right] \quad 2.10$$

Eşitlik 2.10'da a kaynak ile yarık arası mesafe, b yarık ile gözlem düzlemi arası mesafe, λ dalgaboyu ve v farklı dalgacıkların fazları arasındaki farkı veren ikame değişkendir ve Eşitlik 2.11'deki gibi ifade edilir.

$$v = h \sqrt{\frac{2(a+b)}{ab\lambda}} \quad 2.11$$

Burada h yarığın yarı genişliğidir. Eşitlik 2.10'da verilen iki integral ifadesi ise Fresnel integralleri olarak bilinirler. Bu ifadeler x ve y olarak adlandırılıp eşitliğe yerleştirildiğinde,

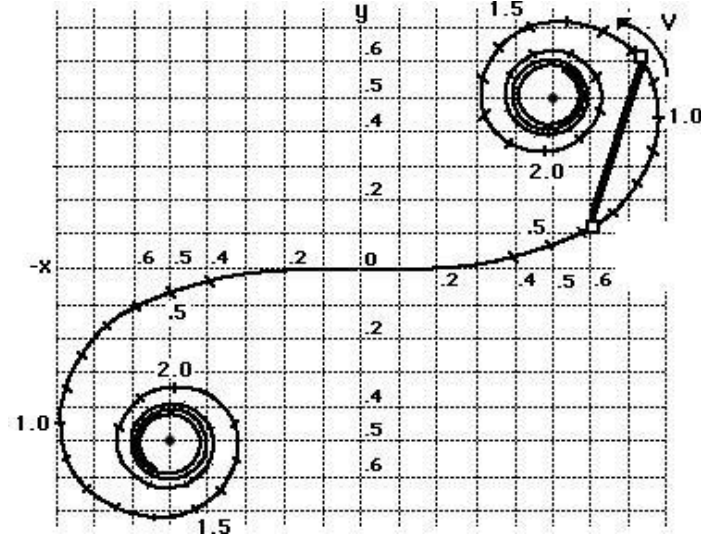
$$x = \int \cos \frac{1}{2} \pi v^2 dv \quad 2.12$$

$$y = \int \sin \frac{1}{2} \pi v^2 dv \quad 2.13$$

Şiddet dağılımının genel formu Eşitlik 2.14'teki halini alır.

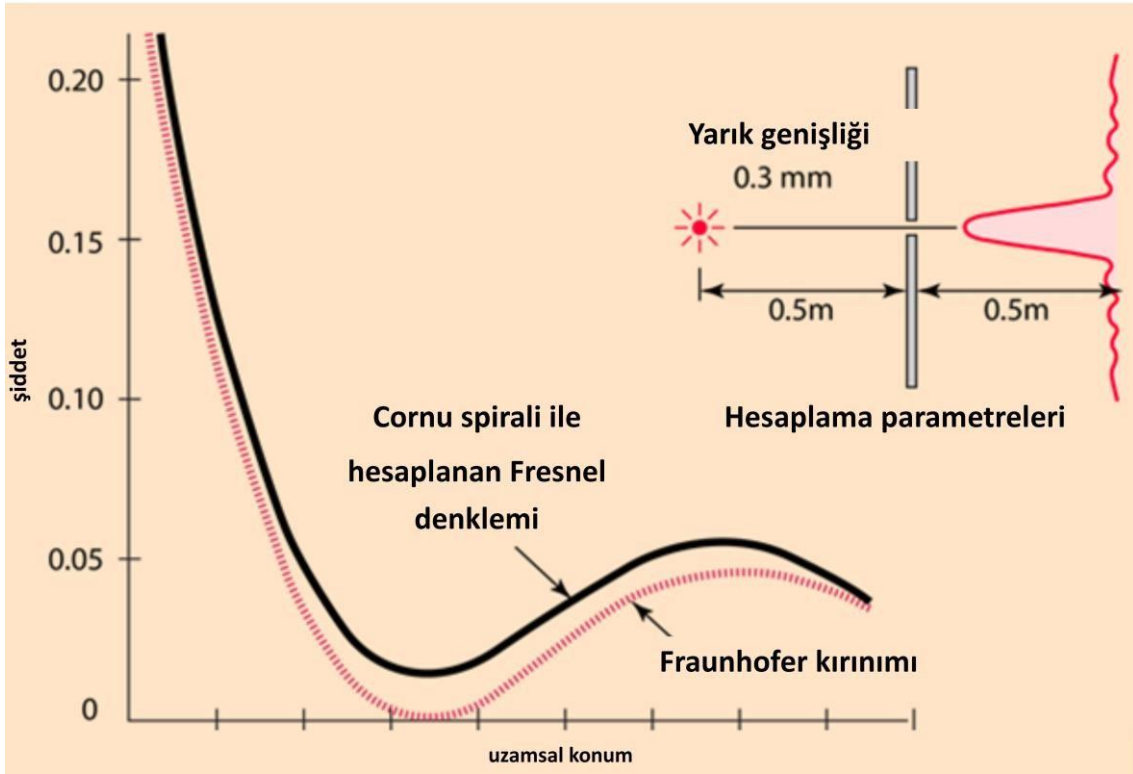
$$I = \frac{1}{2} \left(\frac{ab\lambda}{a+b} \right) [(x)^2 + (y)^2] \quad 2.14$$

Fresnel integralleri limit değerlerinde hesaplanıp, alt limit $v_1=0$ ve üst limit $v_2=\infty$, birbirine göre bir grafik halinde çizildiğinde ortaya bilinen bir şekil olan Cornu spirali çıkmaktadır. Cornu spirali Şekil 2.11'de verilmektedir.



Şekil 2.11 Cornu spirali grafiği. x ve y eksenleri Fresnel kırınımı için Fresnel integrallerinin sonuçlarını vermektedir (Eşitlik 2.11 ve 2.12) [24].

Şekil 2.11'de gösterilen bu spiral, kırınım problemlerine grafiksel bir çözüm belirlemek için kullanılmaktadır. Belirli bir dalga cephesi elemanına bağlı genlik, eğri boyunca bir uzunluk elemanına karşılık gelir. Ancak, toplam genlik, bu uzunluk elemanının uç noktaları arasındaki en kısa mesafeye karşılık gelir. Bu mesafenin karesi şiddet olarak ortaya çıkmaktadır [24]. Tek yarıktaki Fresnel kırınımı şematik gösterimi Şekil 2.10'da verilmektedir. Kırınım deseninin görünümü, minimumdaki yoğunluğun sıfır olmaması dışında bir Fraunhofer tek yarık kırınım desenine benzemektedir. Tek yarıktaki Fresnel kırınımı ve Fraunhofer kırınım şiddet deseni dağılımı Şekil 2.12'de verilmiştir.



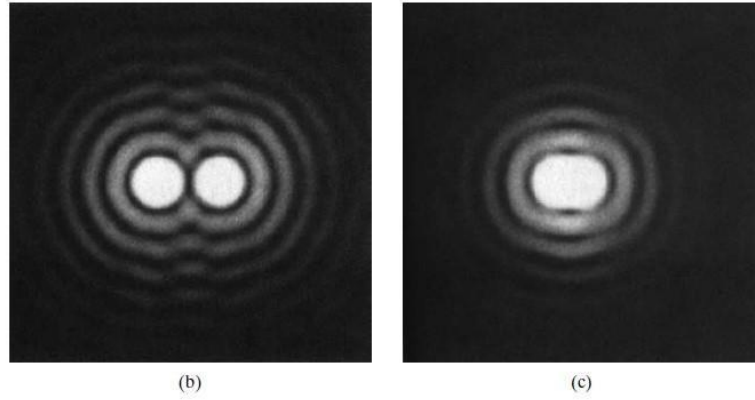
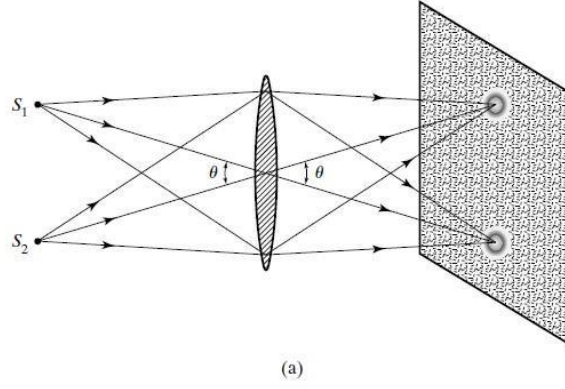
Şekil 2.12 Tek yarıktan Fresnel ve Fraunhofer kırınımı karşılaştırması. Fresnel kırınım desenindeki minimum, Fraunhofer kırınımındaki minimumun aksine sıfır değildir [32].

Önceki bölümde Eşitlik 2.6 ile verilen eşitliğin yanı sıra kırınım rejimleri Fresnel sayısı denilen boyutsuz bir sayı ile de belirlenebilmektedir. Boyutsuz bir parametre olan Fresnel sayısı (F), kırınım türlerini kategorilere ayırmak için kullanılır. Fresnel sayısını Eşitlik 2.2’de verilmektedir. $N_f \ll 1$ olduğunda, kırınım Fraunhofer türünde; $N_f \geq 1$ olduğunda ise kırınım türü Fresnel olur [22].

Literatür genelinde kırınım optiklerinin geliştirilmesindeki temel sebeplerden en önemlisi çözünürlük değerlerinin geleneksel tip merceklerde, kırılma ilkeli mercekler, elde edilen değerlerin ötesine geçmesidir.

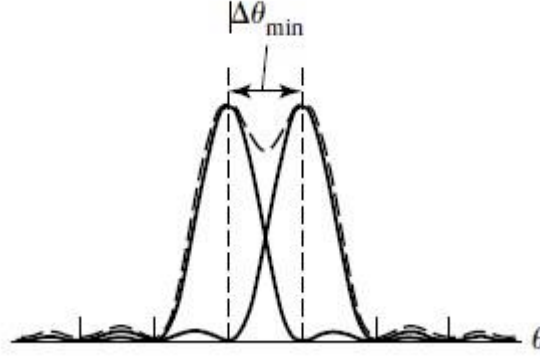
2.1.8. Çözünürlük

Çözünürlük, fiziksel olarak birbirine yakın mesafelerde (mikroskopta olduğu gibi) veya objektifte (teleskopta olduğu gibi) küçük bir açıyla ayrılan farklı kaynaklar için farklı görüntüler sağlama yeteneğidir [28].



Şekil 2.13 a) Kırınım limitli bir mercek tarafından oluşturulan ve Airy diskleri tamamen ayrılmış iki noktaya ait görüntü b) çözülebilir iki noktanın kırınım desenleri, c) iki inkohorent kaynağın çözünürlük limitinde oluşturduğu kırınım deseni [28] .

Şekil 2.13a, oluşturulan iki nokta kaynağın, S_1 ve S_2 kırınımını göstermektedir. Nokta nesneleri ve Airy disklerinin merkezlerinin her ikisi de θ açısı ile ayrılmıştır. Açı yeterince büyükse, Şekil 2.13b'deki fotoğrafta gösterildiği gibi iki farklı görüntü net bir şekilde görülecektir. Nesnelerin birbirine yaklaştığı durumda görüntü kalıpları büyük ölçüde üst üste gelmeye başlayacaktır. Desenlerin ayrı olarak ayırt etmek, yani farklı nesne noktalarına ait olarak çözmek zorlaşmaktadır. İki görüntünün çözünürlük sınırındaki bir fotoğrafı Şekil 2.13c'de gösterilmektedir. Rayleigh'nin tamamen çözülebilir noktasal kaynaklar için kriteri, görüntü desenlerinin merkezlerinin açısal olarak uzaklığının Airy diskinin uzamsal yarıçapına karşılık gelen açısal değerden daha az olmamasını gerektirir. Bu durum Şekil 2.14'te verilmektedir.



Şekil 2.14 Çözünürlük sınırı, Rayleigh kriteri. Kesikli çizgiler her iki Airy diskinin (kırınım tepesinin) bileşkesini vermektedir [28].

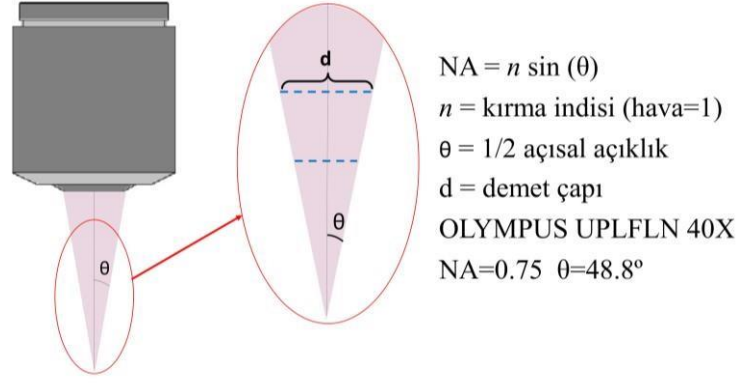
Bir noktanın Airy diski maksimumu doğrudan diğerinin minimumunun üzerine düşer. Bu durumdaki çözünürlük sınırı için Eşitlik 2.15 kullanılabilir.

$$(\Delta\theta)_{minimum} = \frac{1.22\lambda}{D} \quad 2.15$$

Burada D görüntüyü oluşturan merceğin çapıdır. Bu sonuca göre, iki nesne noktasının asgari çözülebilir açısal ayrılması, mercek çapını arttırarak ve dalga boyunu azaltarak azaltılabilir. Çözünme sınırında olan iki nesne arasındaki minimum uzaklık Eşitlik 2.16 ile verilebilir. Burada uzak alan kırınımı ve paralel dalga cephesi yaklaşımları yapılmıştır [28].

$$x_{min} = f(\Delta\theta)_{minimum} = f\left(\frac{1.22\lambda}{D}\right) \quad 2.16$$

Burada D/f oranı sayısal açıklığı ifade etmektedir, f odak mesafesi D ise optiğin, açıklığın, çapıdır. Nümerik açıklık (NA), $n\sin\theta$ 'ya eşit olarak tanımlanır. Burada n objektif mercek ve nesne arasındaki ortamın kırma indisidir (hava için $n \cong 1$). θ açısal açıklığın yarısıdır. Açısal açıklık, yada kabul açısı, ise objektif merceğin görüntü oluşturabildiği toplam açı olarak tanımlanır [33].



Şekil 2.15 Nümerik açıklık şematik gösterimi.

2.1.9. Süper Çözünürlük

1873 yılında Alman fizikçi Ernst Abbe, teleskoplar ve mikroskoplar dahil olmak üzere optik görüntüleme cihazlarının çözünürlüğünün temel olarak ışığın kırınımı ile sınırlı olduğunu fark etti. Bulguları, sonuçta, bir görüntüleme cihazının çözünürlüğünün, cihazın kalitesi ile değil, kullanılan ışığın dalga boyu ve optiklerin açıklığı ile sınırlı olduğunu göstermiştir. Bu, bir mikroskobun $\lambda/2NA$ 'dan daha yakın bulunan iki nesneyi çözemediği anlamına gelir; burada λ , ışığın dalga boyu ve NA, görüntüleme merceğinin sayısal açıklığıdır. Bu kırınım limitli fenomen, bir yüzyıldan fazla bir süredir optik mikroskopinin performansını engellemiştir ve temel, kırılmaz bir kural olarak kabul edilmekteydi. Ancak son zamanlarda, görüntülemede, bazı durumlarda bu kuralı “kırabilecek” yeni ve heyecan verici yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Şimdi uzamsal çözünürlüğü elde etmenin temel bir sınırı olmadığı görülmekte ve görünür ışık dahi kullanarak, birkaç nanometreye kadar çözünürlük yakalamak mümkün hale gelmektedir [34]. Bu oranda çözünürlük sağlayan optiklere süper çözünürlük optikleri adı verilmektedir. Çözünürlükte Airy diskinin çapı temel bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır (Bkz. Rayleigh kriteri). Öte yandan kırınım optiklerindeki Airy diski çapı göz önüne alındığında bu kriterin kırılma optikleri ile kırınım optiklerinde farklı sonuçlar vermeye başladığı görülmektedir. Buradaki temel faktör kırınım optiği ve kırılma optiği Airy diski çapındaki farklılıktır.

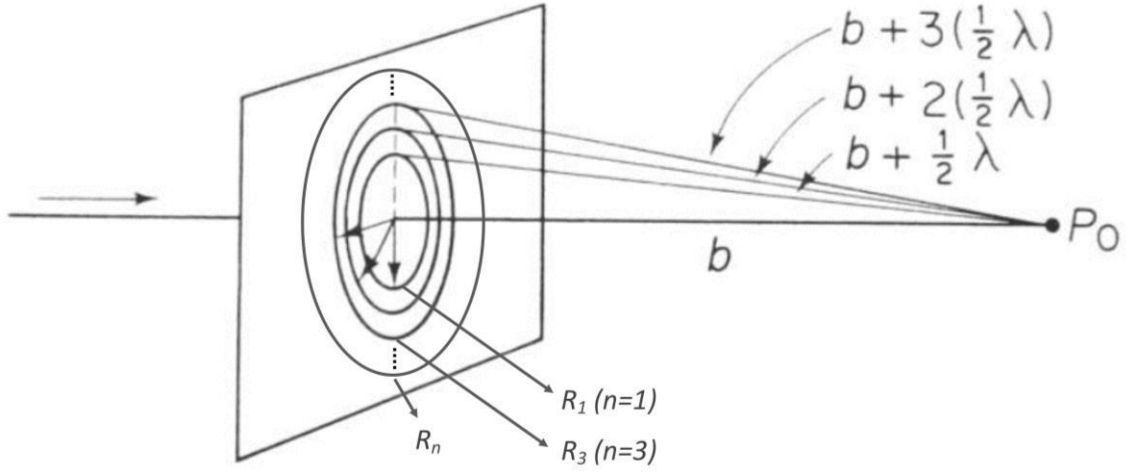
2.2. Kırınım Optikleri

Işığın uzayda yayılmasını modellemek üzere geliştirilen birkaç yöntem vardır. Bu yöntemlerden bir tanesi geometrik optiktir. Geometrik optik elektromanyetik dalganın yayılmasını modellemek için temel olarak ışınları kullanmaktadır. Geometrik optikteki yansıma ve kırılma yasası ışığın yansıtıcı yüzeylerdeki davranışını veya farklı kırılma indisine sahip malzemeler ile etkileşimini ve hareketini modellemeyi amaçlamaktadır. Geometrik optik ile ışığın ışın olarak kullanılmasında bazı sınırlandırmalar ortaya çıkmaktadır. Özellikle ışığın etkileştiği yapı boyutları ışığın dalgaboyu mertebesine yaklaştığı durumlarda, geometrik optikteki sonuçların keskinliği azalmaya başlamaktadır. Bu tür yapılar için ışığın diğer bir özelliği olan dalga özelliği göz önünde bulundurulmalıdır. Işığın dalga yorumunu gerektiren olaylardan bir tanesi de kırınımdır. En basit haliyle kırınım, bir ışık dalgasının bir engelle karşılaştığındaki davranışının geometrik optikten sapması olarak tanımlanabilir [35]. Daha kesin bir tanımlamaya göre kırınım ışığın engel yapının köşelerindeki bükülme davranışdır [36]. Huygens prensibi olarak bilinen yaklaşımda, Bkz. Bölüm 2.1.3, kırınım bölgesindeki dalga cephesinin her bir noktasının yeni bir küresel dalga kaynağı olarak kabul edilmesi ile kırınım olayı daha kolay anlaşılmaktadır [37].

Birçok optik eleman kırılma ve yansıma prensibi ile çalışmaktadır. Diğer yandan bu prensip ile çalışan optikler çoğu zaman daha yüksek enerjiye sahip ışığın kullanıldığı uygulamalarda bazı problemler ile karşılaşmaktadırlar [2]. Bu problemlerin en temel sebebi yüksek soğurma katsayılarıdır. Diğer yandan kırınım prensibi ile çalışan optiklerde yüksek enerjili ışık ile de kırınım sınırında çalışabilmekte ve daha yüksek performans elde edilebilmektedir.

2.2.1. Fresnel Bölge Plakası (FZP), Geometrisi ve Çalışma Prensibi

Fresnel Bölge Plakası (FZP) kırınım olayını kullanarak çalışan optik bir elemandır. Çalışma prensibi Fresnel kırınımı prensibidir. FZP basitçe dairesel bir açıklıktaki Fresnel kırınımı olarak anlaşılabilir. Dairesel açılığa gelen dalgaların düzlemsel, yani kaynağın sonsuz uzaklıkta olduğu düşünülebilir. Bu tip bir yaklaşım Şekil 2.16'da verilmektedir.



Şekil 2.16 Düzlem dalga ile aydınlatılan ve her bir açıklığın sınırı birbirinden yarım dalga boyu kadar uzak olan FZP şematik gösterimi [24].

Açıklık alanı bölgelere ayrılır ve belirli şartları sağladığı durumda P_0 noktasında yapıcı girişim koşulu sağlanabilmektedir. Girişim şartını sağlayabilmek için her bir Fresnel bölgesinin merkezi ile P_0 noktası arasındaki yol farkının yarım dalgaboyu kadar olması gereklidir. Pisagor teoremi kullanıldığında görüntüleme düzlemi ve FZP arasındaki mesafeden yararlanarak her bir alanın sınır yarıçapları hesaplanabilmektedir. Sınır yarıçapı değeri Eşitlik 2.17’de verilmiştir.

$$R_n = \sqrt{\left(b + \frac{1}{2}n\lambda\right)^2 - b^2} \quad 2.17$$

Burada R_n bölgenin sınır yarıçapı, n bölge sayısı, λ gelen dalganın dalgaboyu ve b FZP ile P_0 arasındaki optik eksenindeki mesafedir. Ek olarak, dikkatli incelendiğinde, her bir bölgenin alanının temelde birbirine eşit olduğunu ve bu nedenle her bir bölgenin katkılarının yaklaşık olarak eşit olduğunu ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, her bir bölgeden olan mesafe dalga boyunun yarısı kadar değiştiğinden, her bir bölgeye olan katkı P_0 noktasında yıkıcı girişim oluşturacak ve sonuç olarak bu bölgede şiddet sıfır olacaktır. Tek sayılı bölgelerin engellenmesi, P_0 noktasına gelen geri kalan bölgeden yapılan katkıların sonuç olarak yapıcı girişim oluşturmaya imkan vermektedir. Bu şekilde P_0 noktası FZP’nin odağı olacaktır. FZP odak uzaklığı kırınım optiğinin değişkenleri cinsinden Eşitlik 2.18’de verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

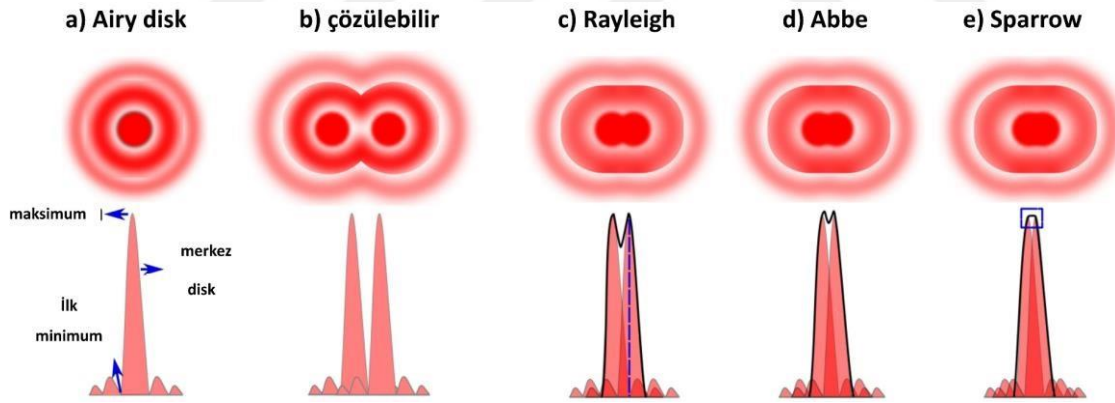
$$f = b = \frac{R_n^2}{n\lambda}$$

2.18

Burada n bölge sayısıdır. Eşitlik 2.18’de verildiği üzere odak mesafesi ve dalga boyu ters orantılıdır. Sonuç olarak, farklı dalga boylarının kullanımında uzunlamasına kromatik sapma olarak adlandırılan bir kusur ortaya çıkmakta ve bu farklı dalga boyları farklı mesafelere odaklanmaktadır. Basit bir FZP yapısı Şekil 2.19a’da gösterilmektedir.

2.2.2. Optik sistemler ve Fresnel Bölge Plakalarında Çözünürlük

Bir merceğin uzamsal çözünürlüğü, nesnelerin hala çözülebildiği iki nesne arasındaki minimum ayırım olarak tanımlanır ve genellikle Rayleigh kriteri ile belirlenir. Rayleigh kriteri, hala çözülebilen iki nokta kaynağı arasındaki minimum mesafeyi tanımlar ve bu minimum mesafenin, deliklerden birinin Airy diskindeki merkezi maksimum değerinin diğer nokta kaynağın oluşturduğu Airy deseninin ilk minimum değerinin üstüne gelmeye başladığı nokta ile tanımlandığını belirtir. Şekil 2.17 Rayleigh kriterini şematik olarak anlatmaktadır.



Şekil 2.17 a) Airy disk 2b gösterimi ve şiddet deseni b) çözülebilir iki noktasal kaynağın kırınım deseni ve şiddet deseni c) Rayleigh kriteri 2b gösterimi ve şiddet dağılımı gösterimi d) Abbe kriteri 2b gösterimi ve şiddet dağılım grafikleri e) Sparrow kriteri 2b gösterimi ve şiddet dağılım kriteri [38].

Geleneksel merceklerdeki Rayleigh kriterinden farklı olarak FZP’nin çözünürlüğü en dış bölgenin genişliği ile orantılıdır [2,39][40]. Bir FZP’nin çözünürlüğü Eşitlik 2.19’da verilen eşitlik ile hesaplanabilir [39].

$$\delta m = \frac{1.22 \Delta r_N}{m} \quad 2.19$$

Burada δm uzamsal çözünürlük Δr_N en dış Fresnel bölgesinin genişliği, m ise kırınım mertebesidir.

2.2.3. Fresnel Bölge Plakalarında İkincil Maksimumlar

Önceki bölümlerde tarif edildiği gibi, dairesel bir açıklıktan meydana gelen Fraunhofer kırınımından bir Airy deseni gözlenir. Bir FZP için, her bir Fresnel bölgesinin genlik katkısı odakta eşittir. Bu katkı en dıştaki halkanın ötesinde aniden sıfıra düştüğünde, tıpkı Airy düzeninde gösterildiği gibi bir ışık şiddeti salınımı meydana gelir. Bu olay ikincil maksimumları oluşturur, Şekil 2.8’de bu ikincil maksimumlar merkez aydınlık diskin etrafında çemberler şeklinde görünmektedirler. İkincil maksimumlar, bir FZP’nin birçok eş merkezli dairesel bölgesindeki difraksiyonlardan kaynaklanan ve Airy düzeninde birinci, ikinci ve daha yüksek dereceli parlak halkaların toplanmasıdır. İkincil maksimumlar görüntünün bulanıklaşmasına neden olur. Ayrıca arka plandaki gürültü seviyesini artırır ve görüntünün kontrastını azaltır. İkincil maksimumlar bastırılması için çeşitli delik dağılım (apodizasyon) teknikleri uygulanabilir.

2.2.4. Faz Özellikli Fresnel Bölge Plakası

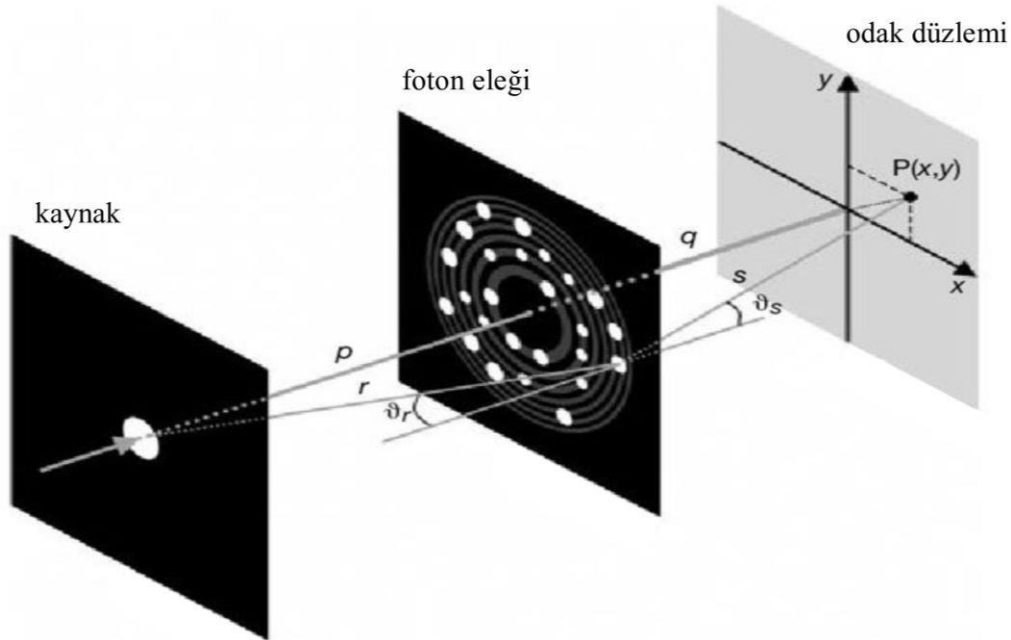
Yukarıda tarif edilen FZP’ye genlik FZP plakası denir. Bu tip bölge plakalarında tüm tek veya çift bölgelerden geçen ışık engellenir, bu da ışığın yarısının iletilmediği anlamına gelir. İletimi artırmak için Kirz ve arkadaşları [41], şeffaf bir malzemenin uygun kalınlığını kullanarak FZP’nin opak bölgeleri boyunca iletilen ışığın fazını kaydırmaya yönelik bir yöntem önermiştir. Bu özel tasarıma faz bölgesi plakası (PZP) denir. Genlik FZP’nin kırınım verimliliği sadece % 10’dur. Başlangıçta opak bölgeyi şeffaf yaparsak, π faz kayması ile kırınım verimliliği % 41’e (faz kaymalı FZP) yükseltilebilir. Fakat bu tür bir FZP’nin geliştirilmesi üretim işlemi basamakları açısından daha zorlu bir süreçtir [42].

2.2.5. Foton Eleği

Foton eleği, Fresnel bölgelerinde dağılmış olan deliklerden oluşan bir tür kırınım optiğidir. Bu optik yapı ilk olarak 2001’de Kipp ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [2]. Kipp ve arkadaşlarının önerisinden sonra teorik olarak Cao [40,43,44],[45,46] ve Lin [47] tarafından modellenmiş ve Menon [20] ve Andersen [48] tarafından deneysel olarak test edilmiştir. Foton elekleri, çok sayıda yarık veya delikten oluşur, bunlar istenen bir odak noktasında yapıcı girişim gereksinimlerini karşılayacak şekilde yerleştirilir, yani Fresnel bölgelerinde merkezlenecek şekilde dağıtılırlar. Işık kaynağından çıkan ve delikten geçip odak düzlemine giden ışığın toplam aldığı yol dalgaboyunun tam katı olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu gerekliliğin eşitliği Eşitlik 2.20’de verilmiştir [2].

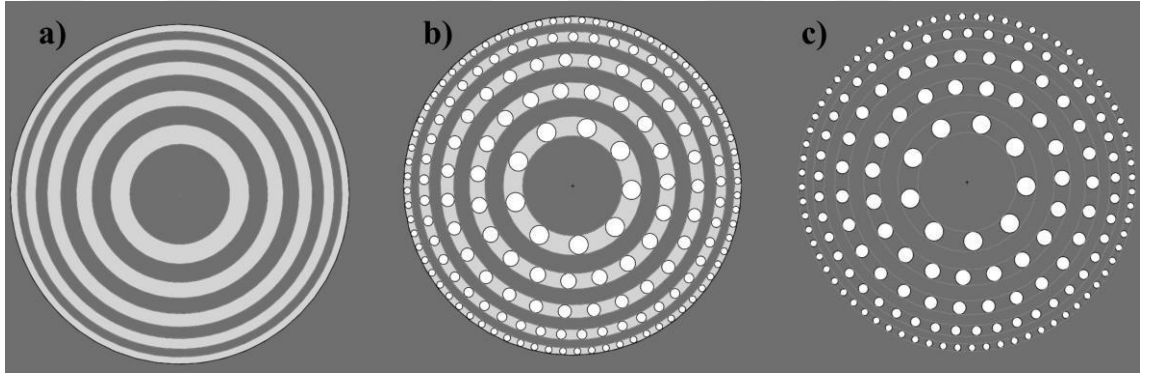
$$\sqrt{r_n^2 + p^2} + \sqrt{r_n^2 + q^2} = p + q + n\lambda \quad 2.20$$

burada r_n n. Fresnel bölgesindeki deliğinin merkezi ile optik eksen arasındaki mesafe, p foton eleği düzlemi ile kaynak arasındaki mesafe ve q foton eleği ve odak düzlemi arasındaki mesafedir. Foton eleği, kaynak ve odak düzlemini içeren şematik gösterim Şekil 2.18’de verilmektedir.



Şekil 2.18 Işık kaynağı, foton eleği ve odak düzlemini konumsal ve açısal dağılımının şematik gösterimi [2].

Uzak alandaki [43] ve paraksial olmayan modlardaki [40] foton eleklere odaklanmanın teorik analizi sırasıyla 2002 ve 2003'te Qing Cao ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır. Paraksial olmayan modda, ışık ışınları ile optik eksen arasındaki açı, θ , büyüktür. Paraksial yaklaşımdaki ($\sin(\theta) \approx \tan(\theta) \approx \theta$) [49] kabullenmesi artık optik yolun hesaplanmasında geçerli değildir. FZP'nin tamamen saydam olan bölgelerini, bir foton eleğine çevirerek kısmen tıkalı bölgelere dönüştürmenin ne gibi bir avantaj sağladığı ilk bakışta belli olmamaktadır. Aslında, FZP bölgeleri tamamen şeffaf ve tamamen opak arasında değiştiğinden, iletim alanındaki azalma doğrudan odak noktasındaki azaltılmış şiddet olarak görülmektedir. Bununla birlikte, Fresnel bölgesi üzerine dağıtılmış deliklerin kullanılması, çeşitli nedenlerden dolayı avantajlı hale gelmektedir. Basit bir foton eleği şematik gösterimi Şekil 2.19c'de verilmektedir.



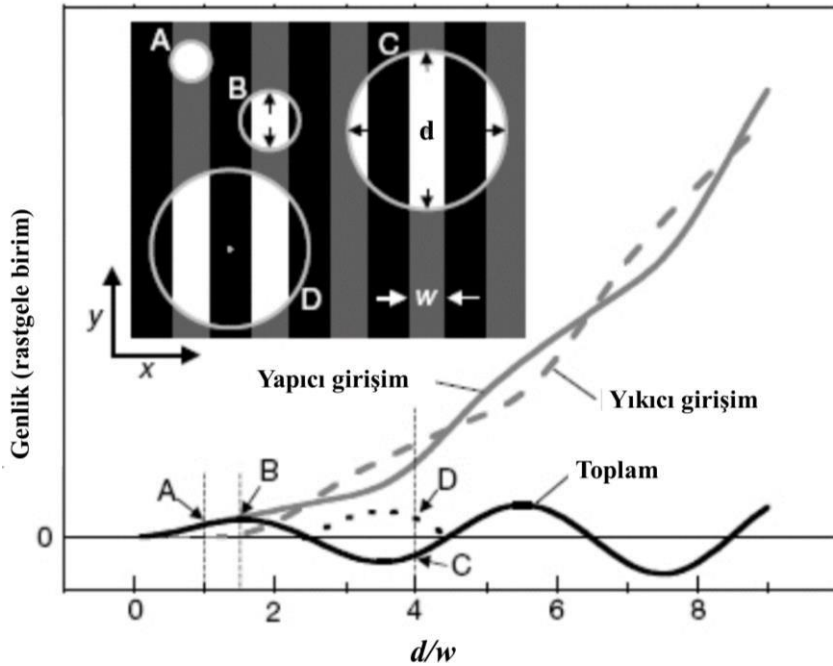
Şekil 2.19 a) FZP b) Fresnel bölgelerine yerleştirilmiş delikler ve c) foton eleği yapısı gösterimi.

2.2.6. Foton Eleğinin Fresnel Bölge Plakasına Göre Avantajları ve Dezavantajları

Fresnel bölge plakaları, X-ışınlarını odaklamak için uzun yıllardır kullanılmaktadır [1,50], [51,52]. Bununla birlikte, halka şeklinde ikincil maksimumlar genellikle odak düzleminde gözlenmesi görüntülerin bulanıklaşmasına neden olur. Ek olarak, Fresnel bölge plakalarının çözünürlüğü, en dış bölgenin genişliği ile kontrol edilir. Yüksek çözünürlüklü bölge plakalarına yaklaşırken üretimde sınırlamalarda artmaktadır. Foton elekleri, görüntülerin daha net odaklanması için ikincil maksimumları bastırma ve Fresnel bölge plakalarının çözünürlüğünün üretim işlemi ile sınırlamasının üstesinden gelme fırsatı sunar [2]. Verilen bu avantajlar aşağıda daha detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Işık, dikdörtgen tip bir yarıktan geçerse yan bantların ya da ikincil maksimumların oluştuğu iyi bilinmektedir [2,53]. İkili bir genlik bölgesi plakasında (binary FZP), en dış bölgede ışığı aniden durduran iletim bölgeleri dairesel bir iletim penceresini temsil eder. Halka biçimli ikincil maksimum oluşur ve görüntülerde bulanıklığa neden olur.

Bulanıklık, şiddet dağılımının standart sapması ile tanımlanır. Örneğin, dağılım tipi Gaussian ise, bulanıklık derecesi Gauss bulanıklığı olarak bilinen Gauss dağılımının (normal dağılım) standart sapması (σ) ile belirlenir [54,55]. Standart sapma büyüdükçe, bulanıklık derecesi yükselir ve çözünürlük kaybı artar. Kipp ve arkadaşları [2] tarafından önerilen foton elekleri, yumuşak bir iletim penceresi oluşturmak için foton eleğinin her halkası üzerindeki delik konumu ve sayısını modüle ederek ikincil maksimum ve daha yüksek kırınım düzenlerini bastırmışlardır. Bu tekniğe apodizasyon adı verilir. İkincil maksimumun bastırılmasına ek olarak, foton elekleri ayrıca bölge plakası sınırlı çözünürlüğünün üstesinden gelmek için bir fırsat sağlar. Gözlem düzlemindeki şiddet, girişimin net katkısı ile belirlenir. Kipp ve arkadaşları [2] 2001 yılında ilk foton eleklerini üretmiş ve kırınım genliği ile d/w oranı arasındaki ilişkinin teorisini önermiştir, burada d delik çapı ve w deliğin yerleştirildiği Fresnel bölgesinin genişliğidir. Bu ilişki Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Şekil 2.20'de, siyah ve beyaz şeritler sırasıyla yıkıcı ve yapıcı girişim etkisine sahip bölgeleri temsil eder.



Şekil 2.20 Odak noktası şiddet değerinin delik çapının Fresnel bölge genişliğine oranı (d/w) ile değişim grafiği. Delik çapı Fresnel bölge genişliğinden büyük olduğu durumda oluşan yapıcı girişim bölgeleri [15].

Çeşitli çaplara sahip dört delik, A, B, C ve D ve bu dört delik için d/w oranları sırasıyla 1, 1.5, 4 ve 4 olarak Şekil 2.20’de verilmiştir. Hesaplanmış eğriler yapıcı (sürekli gri eğri) ve yıkıcı (kesikli gri eğri) girişimler iki etkinin toplam katkısı (koyu siyah eğri) Şekil 2.20’de gösterilmektedir. C ve D aynı delik çapına ve d/w oranına sahiptir, ancak delik C beyaz bir bölgeye ortalandığından delik içindeki siyah alan beyaz bir alandan daha büyüktür. Bu durum net bir yıkıcı girişime neden olur ve şiddet azalır. Deliğinin merkezi siyah bir bölgeye geçtiğinde (delik D), delik içindeki beyaz alan girişime hakim olur ve odak düzleminde net bir pozitif girişim gözlenir.

Yukarıda belirtildiği gibi, foton eleklerin bölge plakalarına göre birkaç avantajı vardır. Bununla birlikte, daha düşük iletim foton eleklerin en kritik sınırlamasıdır. Bir FZP tipik olarak %50’lik bir geçirme oranına sahiptir, bir foton eleği ise yalnızca %15-20 geçirgenliğe sahiptir [2]. FZP ve foton elekleri arasındaki iletim farkı, bölgelerin ve deliklerin açıklık alanı ile orantılıdır. Düşük iletim foton eleklerin, X-ışını mikroskopisi için kullanılan hızlandırıcı gibi yüksek şiddetli kaynaklar kullanan uygulamalarda kullanılmasını engellemez [2]. Işık kaynağının daha az yoğun olduğu yaygın uygulamalar için, düşük geçirgenlikte olan foton eleklerinin kullanımları sınırlanabilir. Düşük geçirgenlik, sinyal şiddetini ve sinyaller ve arka plan arasındaki kontrastı azaltarak görüntü kalitesinin düşmesine neden olur. Bir resmin kontrastı [26] Eşitlik 2.21’de verilen eşitlik ile hesaplanabilir.

$$kontrast = \frac{(I_{maks} - I_{min})}{(I_{maks} + I_{min})} \quad 2.21$$

Burada I_{maks} ve I_{min} görüntünün maksimum ve minimum şiddetleridir. Sıklıkla üretilen foton elekleri, ışığın geçebileceği ve görüntüleri oluşturmak için dağılabileceği deliklere sahip opak metallere kaplanmış bir cam alttaştan oluşur. Cam alt tabakanın her iki yanına yansıma önleyici kaplamalar kaplanarak foton eleğinin geçirgenliği en fazla %8 (her taraftan % 4) artırılabilir [24]. 2005’te Menon v.d. [20], Bölüm 2.2.4.’te anlatıldığı üzere faz Fresnel bölge plakası ile aynı şekilde çalışan faz kaymalı bir foton eleği önermiştir. Faz kaymalı foton eleğinde, tüm foton eleği ışık kaynağına karşı saydamdır. Ardışık bölgelerdeki delikler bir önceki bölgeye göre bir faz kaymasına sahiptir, bu nedenle iletim

önemli ölçüde arttırılabilir. Bununla birlikte, ne ayrıntılı tasarım ne de gerçek bir cihaz bu çalışmalarda rapor edilmemiştir.

2.2.7. Foton Eleklere ve Çözünürlük

Geleneksel bir bölge plakasının uzamsal çözünürlüğüne (δm) en dış bölge genişliği (w) ile karar verilir. Bununla birlikte, bir foton eleği için, uzamsal çözünürlük, maksimum d/w oranı ile orantılıdır. Çözünürlük en küçük etkili genişlikle (w_{min}^{eff}) sınırlanır [2].

$$\delta m = w_{min}^{eff} = \frac{d_{min}}{(d/w)_{max}} \quad 2.22$$

Eşitlik 2.21 kullanılarak yapılan hesaplamalarda, d/w oranı 1.5 olacak şekilde tasarlanan ve 45 nm'lik en küçük delik çapına sahip bir foton eleğinin, 30 nm'lik en dış bölge genişliğine sahip bir FZP ile aynı uzamsal çözünürlüğe sahip olduğunu belirtir. d/w oranı arttıkça, aynı uzaysal çözünürlüğü korurken bir foton eleğinin en küçük deliklerinin çapı da arttırılabilir. Menon ve ark. [20] maskesiz bir fotolitografi sisteminde bir foton eleği dizisi kullanıldığında, tek pozlamada odak noktasının boyutunun en dış d/w oranı tarafından kontrol edildiğini bildirmişlerdir. d/w oranı büyüdükçe, Kipp'in önerdiği teoriyle tutarlı olarak odak noktası küçülmektedir. Hesaplamalar ile birlikte, dış deliklerdeki d/w büyüdükçe odak noktası FWHM'nin küçüldüğü görülmüştür. Ancak, odak noktası şiddeti d/w oranının 1,5'ten 2'ye yükseldiğinde dramatik bir şekilde azaldığı da görülmektedir. Bu, d/w oranının yeterince büyütüldüğünde odak noktasının şiddetinin gözlemlenemeyecek kadar düşük şiddette olması nedeniyle odaklamanın anlamsız olacağını göstermektedir [2].

2.2.8. Foton Eleği Uygulama Alanları

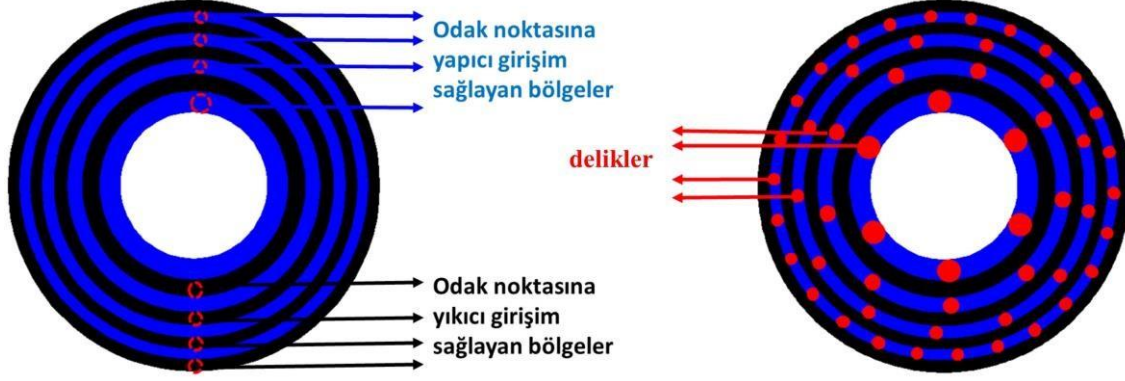
Foton eleklere, ince bir alt tabaka üzerindeki metal bir ince filminden veya serbest duran bir opak film şeklinde üretilirler. X-ışınlarını odaklanmak için geleneksel kullanımlarına ek olarak, küçük ve hafif mercekler gerektiren herhangi bir uygulamada da kullanım alanı bulurlar. Foton eleklere nispeten yeni bir tür kırınım özellikli mercek olduğu için [2] bu cihazın bildirilen uygulamaları sınırlıdır. 2003 ve 2005 yıllarında Gil ve Menon [20,50], maskesiz litografi bölge plaka dizisi litografi tekniğine dayanan “taramalı-optik-

ışınlitografi” sistemindeki bölge plakaları yerine foton elekleri kullandıklarını bildirmişlerdir. Bu teknik (ZPAL, zone-plate-array lithography) Smith tarafından 1996’da icat edilen tekniktir [56]. Foton eleklerinin diğer kullanım alanları deneysel olarak hala test edilmektedir. Bunlar içinde uydu kameralarında kullanılan teleskoplar [12,13] gibi sistemlerden taşınabilir kameralara [16] kadar birçok sistem mevcuttur.

3. FOTON ELEĞİ TASARIMI

Foton eleklerinin tasarımı için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan tüm çalışmalarda aynı yaklaşım kullanılmıştır. Kullanılan yaklaşım detaylı olarak bu bölümde anlatılacaktır. Foton eleklerinin yapılarına bakıldığında kırınım optiği olmalarının getirdiği keskin sınırlandırmalar vardır. Bu sınırlandırmaların birkaçı üzerinde günümüzde çalışmalar devam etmektedir. Bunlara örnek vermek gerekirse, ilk sınırlandırma dalgaboyu bağılılığıdır. Foton elekleri belirli bir dalgaboyuna göre tasarlanırsa da günümüzde dalga boyu bağımlılığını azaltacak çalışmalar sürmektedir [57–59][60][6]. Bunun yanında foton eleklerinin dalga boyunun geliş açısına da bağlı olması problemleri bir durumdur. Bu problemi aşmak için yapılan çalışmalar arasında geliş açısını artırmak amacıyla yapılan çalışmalar da bulunmaktadır [8]. Bu özelliklerin yanı sıra geliştirilmesi gereken en önemli özellik foton eleklerinin şiddet verimi konusudur. Şiddet verimi oldukça düşük olan foton eleklerinde tasarım aşamasında bu dezavantajın giderilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Tasarımda yapılan çalışmalar ve şiddet değişimleri sonraki bölümlerde daha detaylı anlatılacaktır. Tasarım haricinde yapılan şiddet artırma çalışmalarının başında faz özellikli foton elekleri gelmektedir. Bu tip optiklerin çalışma prensibi önceki bölümlerde verilmiştir. Öte yandan bu tip çalışmalar literatürde de mevcuttur [9,61]. Şiddet artırmak için yapılan diğer çalışmalar [39] arasında tasarım değişikliği barındıran tipler de mevcuttur. Tüm tasarım parametreleri göz önüne alındığında teorik hesaplamalar yanında üretim gibi sınırlandırıcı faktörlerin de göz önüne alınması gerekmektedir. Tez çalışması sırasında yapılan tüm tasarımlarda üretim teknikleri ve bu tekniklerin sınırları da göz önünde bulundurulmuştur. Foton eleği tasarımındaki belirleyici faktörler arasında gelen çalışma alanı dalgaboyu ve üretim tekniği gibi parametreler Bölüm 3.1.’de detaylandırılacaktır. Foton eleği tasarımında kullanılan temel başlangıç noktası daha öncede bahsedildiği gibi Fresnel bölge plakasıdır.

Her iki kırınım optiğindeki temel tasarım parametreleri olan dalgaboyu ve odak mesafesi kırınım optiği tasarımının ilk parametreleridir. Diğer geliştirme parametreleri bu iki parametreye bağlılık gösterir. Şekil 3.1’de her iki kırınım optiğinde aynı şekilde tasarlandığı gösterilmektedir



Şekil 3.1 Yapıcı ve yıkıcı girişim sağlayan Fresnel bölgeleri ve bu bölgelere yerleştirilmiş deliklerin dağılımı.

3.1. Foton Eleği Tasarım Parametreleri

Foton eleği tasarımında en önemli parametre çalışma alanını belirleyen dalgaboyudur. Kırınım optikleri tek dalgaboyu ile çalışan sistemlerdir ve diğer dalga boyları için aynı kırınım etkisini sağlamazlar. Bu kırınım etkisi genellikle odak uzaklığı olarak ortaya çıkmaktadır. Bölüm 2.2.1.’de dalgaboyu ve odak mesafesinin arasındaki ilişki verilmektedir. Bu ilişkiye bakıldığında aynı odak mesafesinde ikinci bir dalgaboyu ile çalışmanın olanaksız olduğu görülmektedir. Seçilen dalgaboyu ile birlikte seçilen diğer bir parametre odak uzaklığıdır. Foton eleğinin çalışması istenilen odak uzaklığında tasarım yapılırken dikkat edilmesi gereken farklı parametreler ortaya çıkmaktadır. Genel bir bakışla bu farklı parametreler alan büyüklükleri (dolaylı olarak delik çapları) ve dolayısıyla üretim etkileridir. Teorik olarak oluşturulan geometride odak uzaklığı ve dalgaboyu ile beraber FZP’ler için bölge genişlikleri, foton elekleri için de delik çapları sınırlandırılmış olur. Bu sınırların ötesinde değişken çapların getirdiği sonuçlar modeller bölümünde (Bölüm 3.3.) detaylı olarak anlatılacaktır. Bölüm 2.2.1.’de her bir Fresnel bölgesinin sınırının hesaplama tekniği verilmiştir. Bu eşitliklerden yola çıkarak bölge genişlikleri hesaplanabilir. Aynı şekilde bu bölgelerin merkezine yerleştirilen deliklerin

de temel çapları ($d/w=1$) bu şekilde hesaplanabilir. Eşitlik 3.1 kullanılarak foton eleği deliklerinin temel çapı hesaplanabilmektedir [6].

$$w_n = \frac{\lambda f}{2r_n} \quad 3.1$$

Burada w_n FZP'nin n . bölgesinin genişliğidir ve foton elekleri için de temel çap olarak alınır. Eşitlik 3.1'den görüldüğü üzere genişlik Fresnel bölgesinin merkez eksenenden uzaklığı olan r_n 'ye bağlıdır. Bölüm 2.2.1'de verilen Eşitlik 2.17 açıldığında sonuç Eşitlik 3.2'deki gibi olmaktadır.

$$r_n^2 = 2nf\lambda + n^2\lambda^2 \quad 3.2$$

Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2 birleştirildiğinde deliklerin çapının hangi parametrelerle belirleneceği görülmektedir.

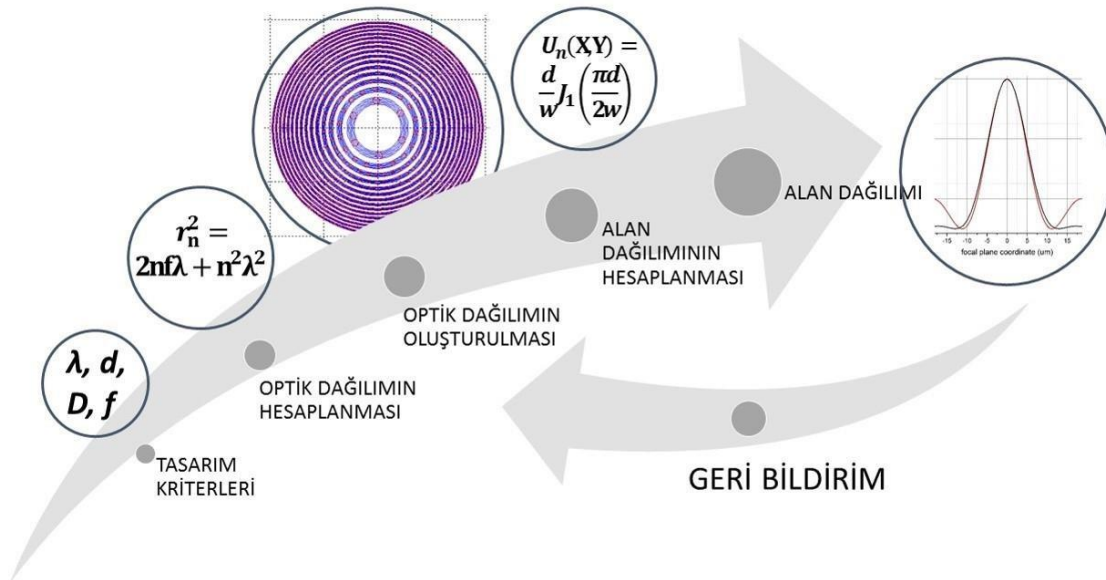
$$w_n = \frac{\lambda f}{2\sqrt{2nf\lambda + n^2\lambda^2}} \quad 3.3$$

Minimum delik çapını sınırlandıran diğer bir nokta ise sayısal açıklıktır. Sayısal açıklık Bölüm 2.1.8.'de verilmiştir. Buradan yola çıkarak foton eleği çapının diğer birincil parametreler ile birlikte delik sayısını etkilediği anlaşılmaktadır. Öte yandan optiğin boyutlarına sınırlamaya gidilmez ise foton eleklerindeki çözünürlüğün giderek artacağı düşünülebilir. Optiğin çapı arttıkça çözünürlük değerleri artsa da önemli iki parametre daha sınırlayıcı faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bunların birincisi üretim yöntemi ve toleranslardır. Foton eleklerini üretmek için birden fazla yöntem olsa da her yöntemin çeşitli zorlukları vardır. Foton eleği üretimi bölümünde seçilen yöntemler için sınırlandırıcı özellikler anlatılacaktır. İkinci önemli parametre ise foton eleğinin çapının büyümesi ile giderek küçülen delik alanlarıdır. Bu delik alanlarından gelen katkıların da oldukça küçüldüğü düşünüldüğünde bu bölgelerdeki şiddetin çözünürlüğe katkı vermek yerine üretimi zorlaştıran bir durum olduğu anlaşılmaktadır. Foton eleklerinin temel parametreleri olan dalgaboyu ve odak mesafesinden sonra diğer bir önemli parametre olan alan özelliği tasarlanmalıdır. Toplam alan dağılımının odak düzleminde yapıcı girişim oluşturabilmesi ve çözünürlük ile şiddet gibi sonuçların hesaplanabilmesi için alan teorisi kullanılır. Bu tez çalışması kapsamında tüm simülasyonlarda aynı alan yaklaşımları kullanılmıştır. Alan dağılımının hesaplanmasında tez çalışması kapsamında geliştirilmiş

olan bir MATLAB programı kullanılmıştır. Bu programda hesaplanan alan dağılımları ve yaklaşımlar Bölüm 3.2’de verilmektedir.

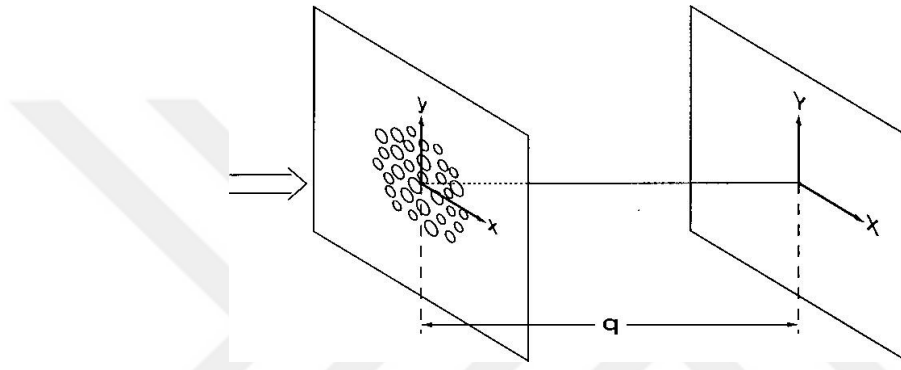
3.2. Foton Eleği Tasarım Simülasyonları

Tez çalışması sırasında geliştirilen modeller ve bu modellere ait geometrik çizimler tez kapsamında geliştirilen bir MATLAB kodu ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kodun temelde iki bölümü vardır. Bu bölümler sırasıyla, alan dağılımlarının hesaplandığı bölüm ve ikinci olarak da bu alan dağılımlarının sonuçlarının çizdirildiği ve geometrik verilerin alındığı bölümdür. Temelde MATLAB kodunda kullanılan alan dağılım yaklaşımı literatürde birçok çalışmaya referans olan ve Qing Cao ve Jürgen Jahns’ın 2002 yılında yayınladıkları çalışmadan [43] alınmıştır. İlk foton eleği hesaplamalarını yayınlayan Kipp [2] ve arkadaşlarından sonra yapılan ilk teorik çalışmalardan biri olan çalışmada yeni bir model tanıtılmış ve bu modelin sonuçları kırınım optiklerinde kullanılan ve yaklaşım yapılmadan çözülen matematiksel fonksiyonlar ile karşılaştırılmıştır. Odak düzlemindeki şiddet dağılımı veren fonksiyonların hesaplanmasında yapılan yaklaşım ve basitleştirmeler ile çalışma birçok yeni çalışmaya referans olmuştur. Geliştirilen MATLAB programında yapılan işlemlerin basit bir gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir. Tasarımlar ve alan dağılımları hesaplanırken geliştirilen programa sınırlandırmalar yerleştirilmiş bu sayede belirlenen üretim tekniğinin sınırları aşılmadan tasarımlar yapılmıştır.



Şekil 3.2 MATLAB tabanlı programın geliştirmesi ve işlem adımları şematik gösterimi.

Geliştirilen programda kullanılan model “Individual Far Field Model” [43], alan dağılımı hesaplanmasında bir dizi eşitlik kullanmaktadır. Bu eşitlikler kırınım optiklerinin hesaplama yöntemlerinden geliştirilip basitleştirilmiş yöntemlerdir. Temelde foton eleklerinde şiddet, genlik, faz ve alan dağılımların hesaplanmasında kullanılan eşitlikler aşağıda verilmektedir. Tez kapsamında kullanılan MATLAB kodu ayrıca EK-2’de verilmektedir.



Şekil 3.3 Foton eleği yapısındaki genel dağılım ve odak mesafesi şematik gösterimi [43].

Şekil 3.3’te kullanılan modeldeki geometrik yerleşim planı verilmektedir. Bu modelde gözlem düzlemi (X, Y) koordinatları ile ve foton eleği (x, y) koordinatları ile verilmektedir. İki düzlem arası mesafe q kadardır. Paraksiyel aydınlatma altında karmaşık genlik dağılımı Eşitlik 3.4’te verilmektedir.

$$V(x, y) = A(x, y) \exp[jkL(x, y)] \quad 3.4$$

Burada k dalga vektörünün büyüklüğüdür ve değeri $k=2\pi/\lambda$ ’dır. λ gelen dalganın dalgaboyu ve j ise $\sqrt{-1}$ ’dir. $L(x, y)$ eikonal ve $A(x, y)$ reel genlik olarak adlandırılmaktadır. Lineer süperpozisyon prensibine göre toplam kırınımına uğrayan alan, $U(X, Y)$, farklı deliklerden kırınımına uğrayan alanların, $U_n(X, Y)$, toplamına eşit olmalıdır. Bu eşitlik Eşitlik 3.5’te verilmektedir. Eşitlikteki n delik numarasıdır ve kırınım optiğindeki toplam delik sayısı, N , kadar kırınımına uğrayan alan toplanarak toplam alanı oluşturmaktadır.

$$U(X, Y) = \sum_{n=1}^N U_n(X, Y) \quad 3.5 \text{ n.ci deliğin merkez noktası } x_n, y_n$$

ve yarıçapı a_n olarak alındığında her bir delikten kırınıma uğrayan alan Eşitlik 3.6'daki gibi hesaplanabilir.

$$U_n(X, Y) = \frac{1}{q\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} V_n(x, y) \exp \left[jk \frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{2q} \right] dx dy \quad 3.6$$

Burada $V_n(x, y)$ delik içinde $V(x, y)$ delik dışında ise 0 olarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.6'daki üstel terim ($-j \exp(jkq)$) ihmal edilmiştir. Bunun temel sebebi deliğin içindeki karmaşık genlik değişiminin ihmal edilebilecek kadar küçük olmasıdır. Bunun yerine delik için yerel bir düzlem dalga olduğu varsayılmaktadır. Referans [43]'de detaylı bir şekilde bahsedilen bir dizi koordinat dönüşümü kullanarak matematiksel ifadeler basitleştirilmiştir. Bu ifadelerin basit formları başlangıç eşitliğine yerleştirildiğinde toplam alan dağılımı Eşitlik 3.7'deki halini almaktadır.

$$U_n(X, Y) = 2A_n \exp \left[jk \left(L_n \frac{R'^2}{2q} \right) \right] F(\rho) \quad 3.7$$

Eşitlik 3.7'de belirtilen $F(\rho)$ Eşitlik 3.8'de verilmektedir. Burada r' koordinatları foton eleği düzlemindeki koordinatları tanımlamak için kullanılırken R' koordinatları görüntüleme düzlemindeki koordinatları belirlemek için kullanılmaktadır.

$$F(\rho) = \frac{\pi}{\lambda q} \int_0^{a_n} \exp \left(jk \frac{r'^2}{2q} \right) J_0 \left(\frac{k\rho}{q} r' \right) r' dr' \quad 3.8$$

Daha önceki bölümde bahsedilen Fresnel sayısına bağlı bir belirleme ile bu model daha basit hale getirilmiştir. Yukardaki eşitlik setinde belirtilen $F(\rho)$ fonksiyonu içinde J_{inc} fonksiyonu barındırır. $J_{inc}(\cdot) = J_1(\cdot)/(\cdot)$, burada $J_n(\cdot)$ fonksiyonu n. mertebe Bessel fonksiyonudur. Fresnel sayısı olarak bilinen sayının, $N_f = \pi a n^2 / (\lambda q)$, belli bir değerden küçük değerleri için J_{inc} fonksiyonun bir kısmı önemsiz denecek kadar küçülür ve ihmal edilir. Bu sınır değeri buradaki yaklaşımlar altında 0.05'dir.

$$F(\rho) = F_0(\rho) \quad (N_f < 0.05) \quad 3.9$$

n 'ninci delikten kırınıma uğrayan alan Eşitlik 3.10'da gösterilmektedir.

$$U_n(X, Y) = 2N_f A_n \exp \left[jk \left(L_n \frac{R'^2}{2q} \right) \right] J_{inc} \left(\frac{ka_n}{q} \rho \right) \quad 3.10$$

Her bir delikten kırınımına uğrayan alana bakıldığında sistem uzak alan kırınımına sahip olsa da toplam kırınımına uğrayan alan göz önüne alındığında kırınım hala Fresnel kırınımı bölgesindedir. Young deneyindeki yarıklardan ayrı ayrı kırınan alanlar her zaman uzak alan bölgesindedir, çünkü delikler çok küçüktür. Bununla birlikte, toplam kırınımına uğrayan alan, eğer açıklık ve gözlem düzlemi arasındaki mesafe yeterince uzak değilse, Fresnel kırınım bölgesinde olabilir [62]. Modelde daha önceki bölümlerde verilen deliklerin merkez noktalarını bulmak ve deliklerin yarıçaplarını hesaplamak için yapıcı girişim şartından yola çıkılmaktadır. Bu durumda ($X=0, Y=0$) noktasında odaklanacak kırınım etkisi için belirli faz şartları vardır. Bu faz şartı basit olarak $2m\pi$ şeklinde verilebilir. Eşitlik 3.11’de bu şartı sağlayan eşitlikler yazılmış ve bu eşitlikler yardımıyla deliklerin merkez noktaları r_n ve yarıçaplarının a_n hesaplanması amaçlanmıştır.

$$k \left(L_n + \frac{r_n^2}{2q} \right) = 2m\pi, \quad J_{inc} \left(\frac{ka_n}{q} R_n \right) > 0 \quad 3.11$$

$$k \left(L_n + \frac{r_n^2}{2q} \right) = (2m + 1)\pi, \quad J_{inc} \left(\frac{ka_n}{q} R_n \right) < 0 \quad 3.12$$

İşlemlere ait tüm ara basamaklar referans [43]’te verilmektedir. Kırınımına uğrayan alanlar ile oluşan alan şiddeti ifadesi Eşitlik 3.13’te verilmektedir. Bu ifade ile oluşturulan fonksiyon yardımıyla görsel arayüzde foton eleğinden hesaplanan kırınım deseni gösterilir.

$$I(X, Y) = |U(X, Y)|^2 = \left| \sum_{n=1}^N U_n(X, Y) \right|^2 \quad 3.13$$

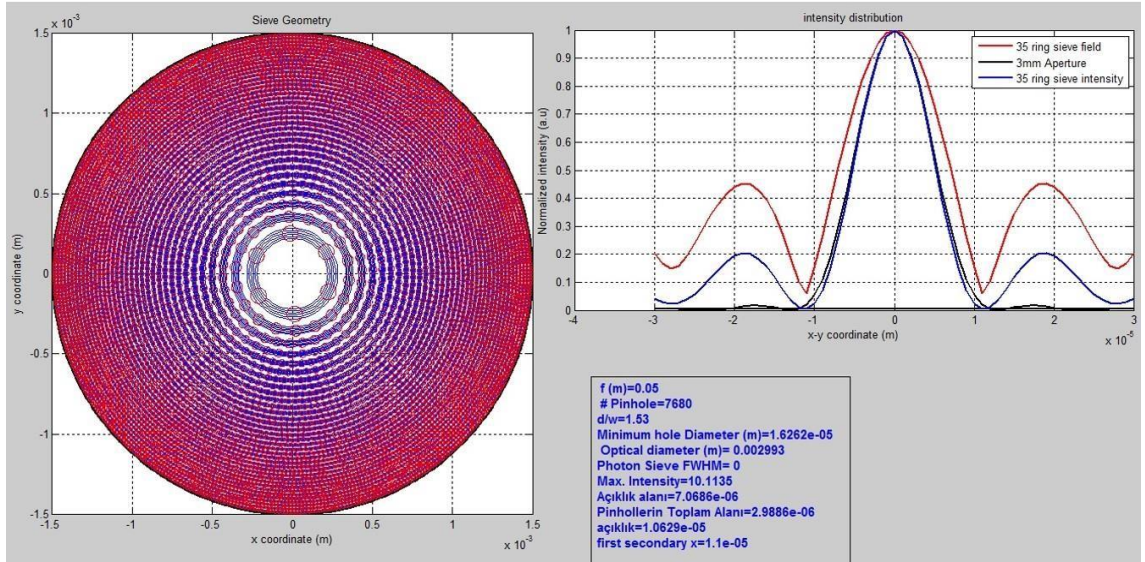
Öte yandan merkez noktada oluşan şiddet önem taşımaktadır. Foton eleklerindeki maksimum şiddet olarak karşımıza çıkan merkez ($X=0, Y=0$) şiddet Eşitlik 3.14 ile hesaplanır.

$$U_n(0,0) \propto \frac{d}{w} J_1 \left(\frac{\pi d}{2w} \right) \quad 3.14$$

Modelde ayrıca çeşitli düzeltmeler de yapılmaktadır. Bu düzeltmeler ile modelin geçerli olduğu boyutlar geliştirilebilmektedirler. Çok büyük delikler için düzeltme faktörleri daha önceki hesaplamalarda göz ardı edilen $F(\rho)$ fonksiyonunun açılımı ile yapılmaktadır. İlk hesaplamalarda kullanılan Fresnel sayısı $N_f = 0.05$ 'ten büyük olduğu durumlarda $F(\rho)$ 'daki diğer terimlerin baskınlığı artmaktadır. Bu sebeple yeni terimler eklenerek model daha keskin hale getirebilir. Yapılan eklemeler ile N_f sayısının 0.2 olduğu duruma kadar modelin doğruluğu hesaplanmıştır.

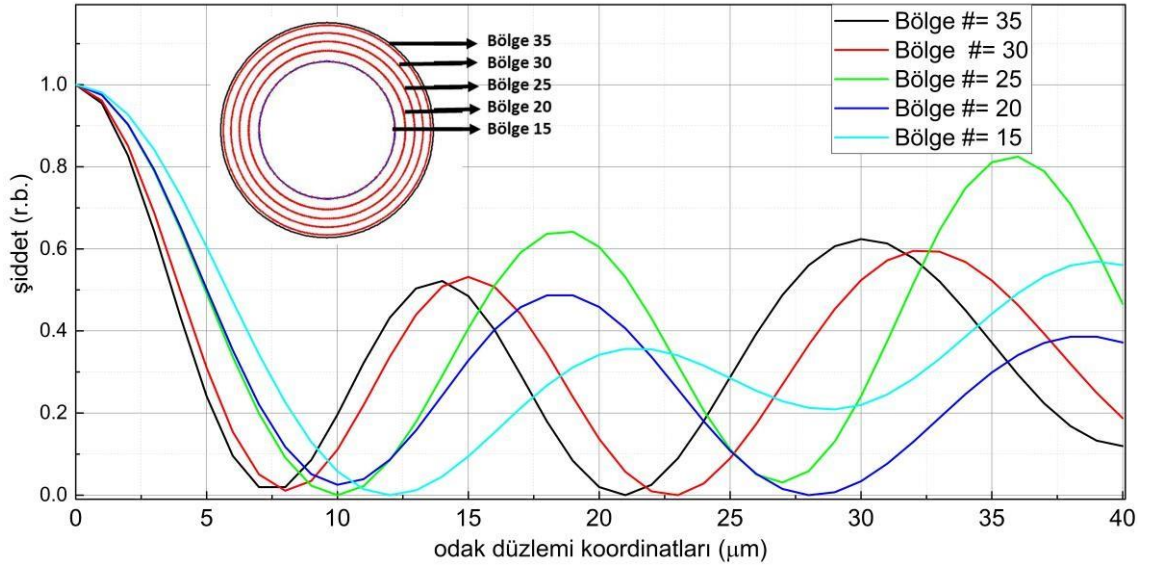
Hesaplamaların ve boyutların daha net anlaşılması için yapılan bir çalışmadan örnek verilmesi uygun olmaktadır. 2001 yılında yapılan bir foton eleği çalışmasında [2], dalgaboyu $\lambda = 632.8$ nm ve $q = 1$ m seçilmiştir. $N_f = 0.05$ boyutlarından maksimum delik çapının $200 \mu\text{m}$ olduğu görülmüştür. Bu çap değerine kadar model ilk haliyle iyi çalışmaktadır. Daha büyük çaplar için modele düzeltmeler yapıldığı durumda $N_f = 0.2$ durumunda en büyük delik çapının $400 \mu\text{m}$ kadar büyüdüğü görülmektedir. Yapılan tasarım çalışmalarında modele uygunluğun sürekli denetlenmesi için yazılan MATLAB programına bir Fresnel Sayısı, N_f , hesaplayıcı fonksiyon yerleştirilmiş ve bu modele uygun boyutlarda hesaplamalar ile foton elekleri geliştirilmiştir. Geliştirilen programın kullanıcı arayüzü Şekil 3.4'te verilmektedir. Bu arayüzde sol tarafta geliştirilen optiğin geometrik dağılımı gözlenirken sağ tarafta ise alan dağılımları ve bu dağılımların sonucunda oluşan şiddet dağılımı verilmektedir. Diğer yandan program arayüzünde maksimum şiddet, delik sayısı, delik çapı ve Fresnel bölge genişliği oranın yanında açıklıkların toplam alanı da görülmektedir. Açıklıkların toplam alanı doğrudan şiddeti etkilemektedir. Bu sebeple geometrik dağılımlarda ışık geçiren alanların oldukça fazla olması istenir. Diğer bir yandan alan dağılımlarının yapıcı girişim şartını sağlamak gibi özel bir duruma tabi olmaları ile geometrik dağılım açısal olarak sürekli değişir.

Geometrik dağılımda dikkat edilen diğer bir durum ise foton eleklerinin üretilebilirliğidir. Bu durum hem minimum delik çapını hem de birbirlerine olan mesafelerini oldukça etkilemektedir. Program içine ayrıca bir de delik sınırlarının yakınlığını sınırlandıran fonksiyon eklenmiştir.



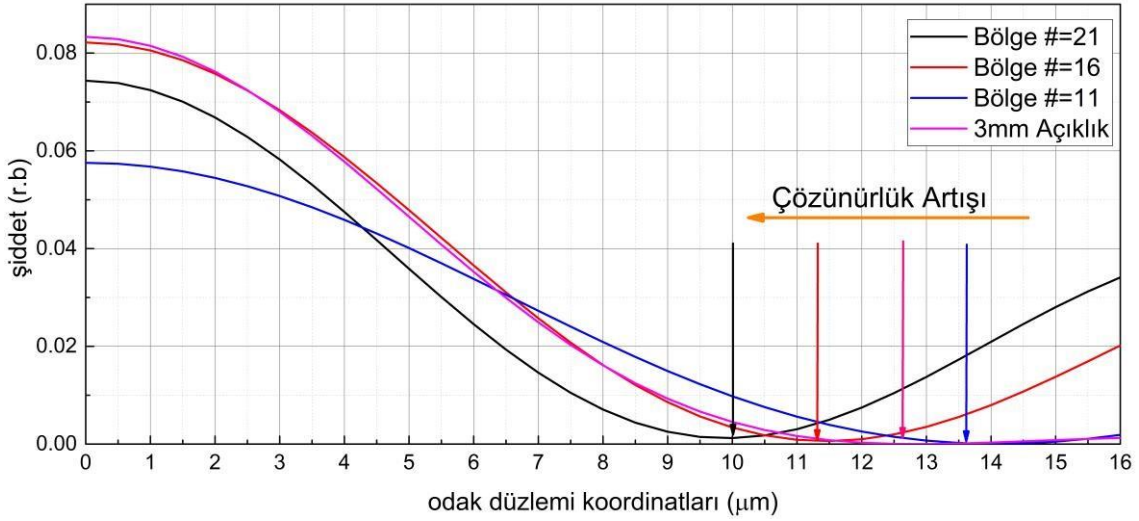
Şekil 3.4 Foton eleği tasarım programı kullanıcı arayüzü görünümü.

Program akışına bakıldığında, ilk olarak literatür değerleri testlerin yapılması için her bölgenin getirdiği alan dağılım testleri yapılmıştır. Literatüre uygun sonuçlar elde edilmeye başladıktan sonra her bölgenin alan şiddeti hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 3.5'te çeşitli bölgelerden gelen katkıların program ile oluşturulmuş şiddet dağılımları verilmektedir.



Şekil 3.5 Foton eleği Fresnel bölgelerinin ayrık alan dağılımları.

Programlama ve geliştirme sırasında önemli olan iki parametre, şiddet ve çözünürlük değişimi, göz önüne alınmıştır. Yapılan tasarım çalışmaları ile üretilebilir, hem çözünürlüğü hem de şiddeti modüle edilebilecek tasarımlar üzerine yoğunlaşmıştır. Temel olarak çözünürlüğün en dış deliklerden gelen katkı ile belirlendiği bilinse de [2,40], her bölgenin katkılarını incelemek için bölge katkıları teker teker incelenmiştir. Şekil 3.6'da bölgelerin getirdiği çözünürlük değerine birkaç örnek verilmiştir. Toplam kırıma uğrayan alana bakıldığında bu bölgelerdeki alanların katkısı daha iyi anlaşılmaktadır. Çeşitli bölgelerden katkıların toplamına bakılarak şiddet ve çözünürlük için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların temel amacı çözünürlük ve şiddeti modifiye ederken üretilebilir foton elekleri tasarlamaktır. Tasarımlardaki bağ koşullarının temel hedefi hem çalışır hem de üretilebilir tasarımların elde edilmesidir.

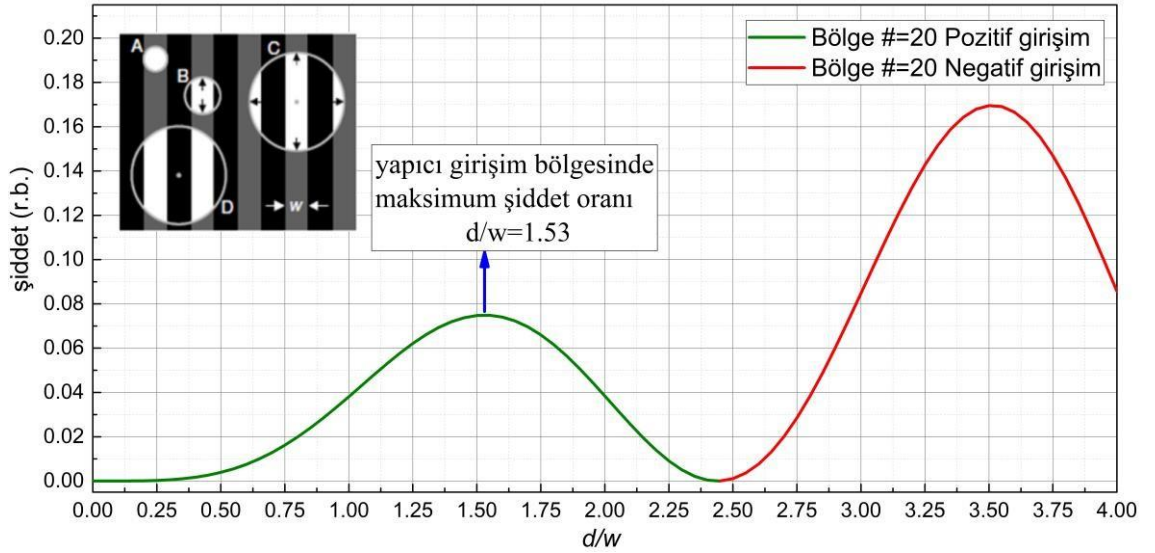


Şekil 3.6 Foton eleği Fresnel bölgelerinin çözünürlüğe katkıları.

3.3. Foton Eleği Modelleri ve Uygulanan Geliştirmeler

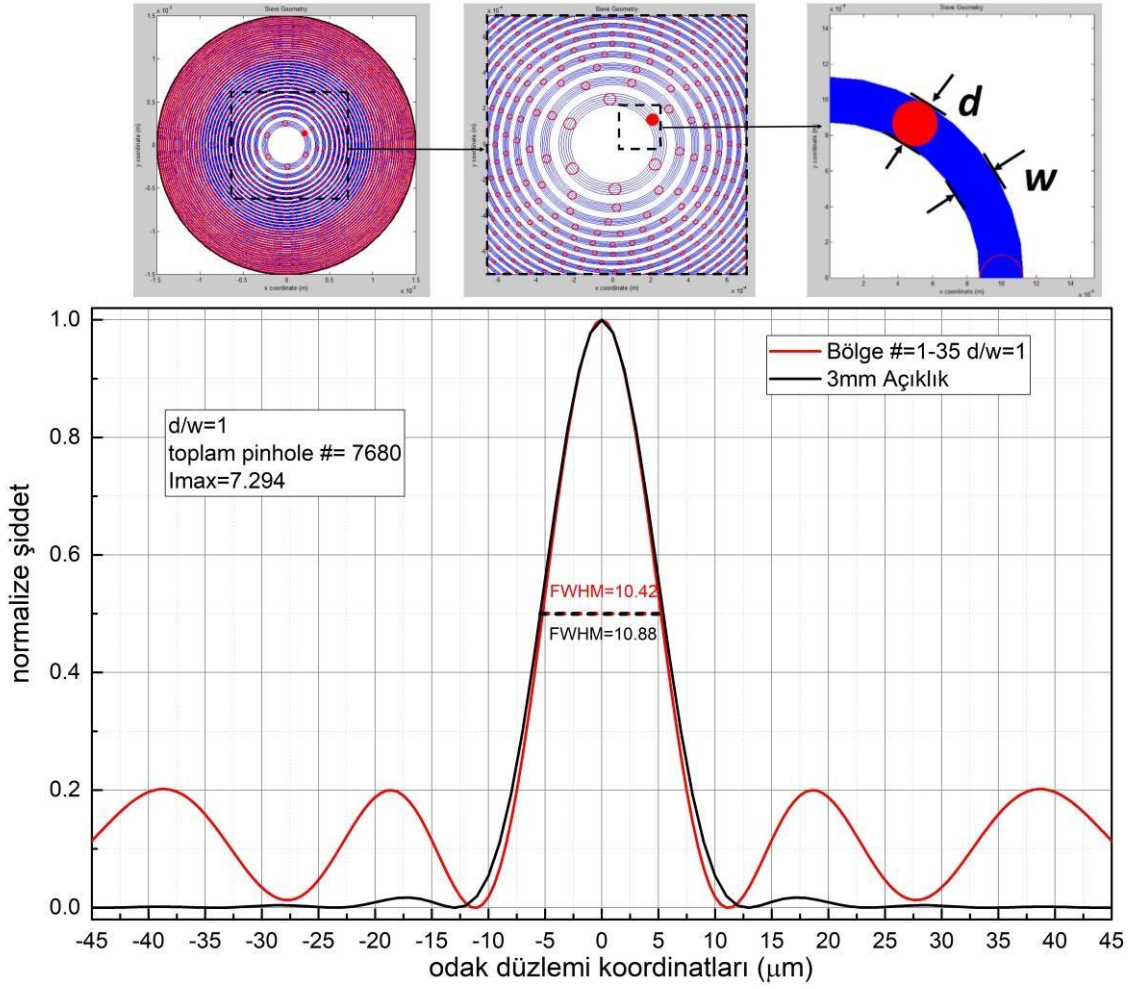
Bu bölümde anlatılan model geliştirilmelerinde temel amaç literatürden derlenmiş özellikler ile foton eleklerinin performansının ve özellikle şiddet-çözünürlük modülasyonlarının geliştirilmesidir. Tez kapsamında yapılan çalışmalar ile toplamda üç farklı model foton eleği yapısı ortaya konmuştur. Bu modellerin her biri için farklı bir kullanım alanı iyileştirmesi yapılmıştır. Geliştirilen modeller ileriki bölümlerde tanıtılacaktır. İlk olarak bu modelleri geliştirirken kullanılan tasarım adımları ve göz önüne alınan özellikler tanıtılacaktır.

Şiddet geliştirme çalışmalarında literatürde oldukça sıklıkla kullanılan yöntem d/w oranlarını değişimi prensibidir. Oranlardaki değişimin merkez şiddet deseni üzerine etkisi birçok çalışmada konu edilmektedir [2,43], [20], [63]. Literatürdeki çalışmaların genelinde kullanılan oran 1.53'tür. Bunun çeşitli sebepleri vardır. Geliştirilen modellerde kullanmak üzere yapılan hesaplamalarda, kullanılan modeli analiz etmek adına bir dizi d/w oranı çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalar ile hem merkez şiddet değerleri hem de geometrik dağılım analiz edilmeye çalışılmıştır. Modelin gelişimine bakıldığında şiddet desenin nasıl değişeceği bilinmesine rağmen her bir bölgeye yerleştirilen deliklerin birbirine yakınlığı ve ardışık bölgeler ile oluşacak konumlandırma problemlerinin önüne geçilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ile hem ardışık bölgelerdeki hem de aynı bölge üzerindeki örtüşmeler incelenmiştir. Bu incelemeler yanında şiddet dağılımlarının literatürle ne kadar uyum içinde olduğu test edilmiş ve program basamakları doğrulanmıştır. Şekil 3.7'de verilen grafik yardımıyla hem delik büyüklükleri hem de bu deliklerin kırınım etkileri incelenebilmektedir.



Şekil 3.7 Delik çapı Fresnel ve bölge genişliği (d/w) oranlarının odak düzlemindeki şiddet dağılımına etkisi (yeşil eğri 20. Fresnel bölgesi için yapıcı girişimleri meydana getiren d/w oranlarını, kırmızı eğri ise aynı Fresnel bölgesi için yıkıcı girişim meydana getiren d/w onaranlarını göstermektedir).

Modellerde de kullanılan bilgilerin yardımıyla bir dizi simülasyon testi yapılmıştır. Bu testlerde geometrik dağılımın ve konumlandırmanın sonuçları incelenmiştir. Bu bilgiler ile birçok deneme yapılarak her d/w oranı için dağılımlar incelenmiştir. Tek tek her bölgeden gelen katkılar haricinde istenilen alan dağılımları toplam kırınıma uğrayan alan dağılımlarıdır. Toplam kırınıma uğrayan alan dağılımlarının d/w oransal dağılım incelendiğinde de aynı tür davranışın görüldüğü saptanmıştır. Buradan yola çıkarak sabit, her bölgede aynı oranla değişen, d/w oranlarının bir şiddet çözünürlük seti oluşturulmuştur. Literatürde pek rastlanmayan bir özellik olan değişken d/w oranlarına sahip foton elekleri ile şiddet çözünürlük modülasyonu yapabilmek için modellerin geliştirilmesi bu aşamada önerilmektedir. Yaygın olarak kullanılan oranlar yerine değişken oranlar ile elde edilen davranışları incelemek için birçok simülasyon testi yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda değiştirilebilen şiddet ve çözünürlük değerleri saptanmıştır. Şekil 3.8’de sabit değişim ile verilen bir foton eleğine ilişkin tasarlanan geometri ve şiddet deseni gösterilmiştir. Sıklıkla kullanılan 1.53 değerine bakıldığında sabit değişime sahip, her bölgede d/w aynı, modellerin hiçbirinde çözünürlük ile ilgili bir gelişme rapor edilmemiştir. Bunun temel sebebi tüm alanlardan gelen katkının aynı oranda değişmesidir.



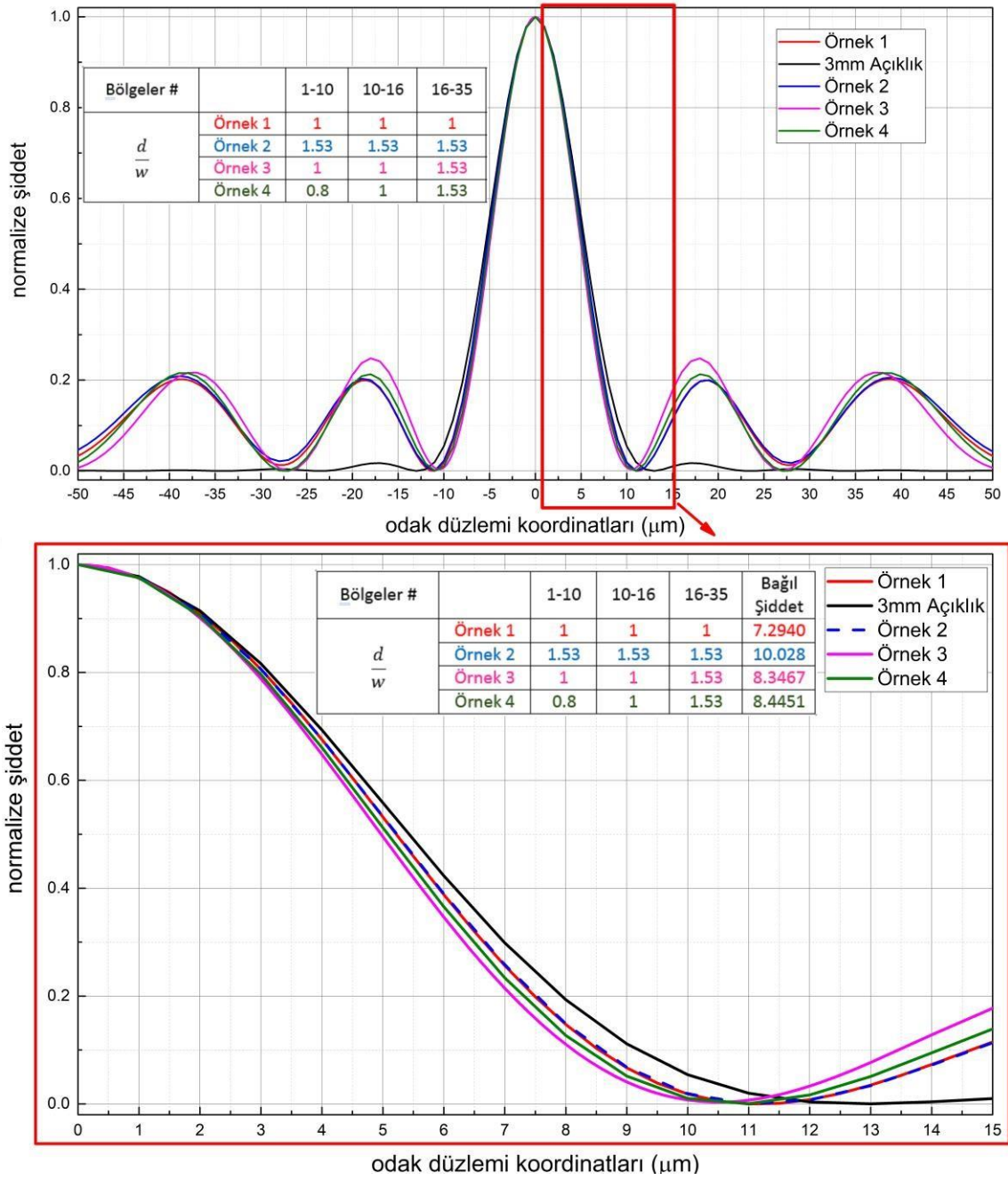
Şekil 3.8 Foton eleği delik dağılımı ve odak düzlemi şiddet dağılımı.

Öte yandan bu çalışmada elde edilen ve literatürle desteklenen testlerde her bir bölgenin çözünürlüğe farklı katkı yaptığı gösterilmiştir (Bkz. Şekil 3.6). FZP’lerde en dış bölgenin ve dolayısıyla foton eleklerin de en dıştaki deliklerin çözünürlüğe katkısı büyüktür [44,46]. Bölüm 3.3.1, 3.3.2 ve 3.3.3’te verilen modellerde bu etkinin iyileştirmesi ile ilgili bilgi verilecektir. Temel olarak oransal değişimin katkı sağlayacak hale getirilmesi için bir dizi testin yapılması gerekir. Modeller geliştirilmeden önce yapılan örnek çalışmalarda bir dizi oran denenmiş ve bunların sonuçları Şekil 3.9’da verilmiştir. Literatürdeki bilgilere ek olarak değişken oransal değişim ile şiddet dışında çözünürlüğün de modüle edilebileceği ve bazı durumlarda artırılabilir olduğu görülmektedir. Modülasyon sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli faktör kazanç kaybı ilişkisidir. Bu ilişkinin bir tarafında çözünürlük yatarken diğer tarafında şiddet yatmaktadır. Bunun altındaki temel

sebep foton eleklerinin doğasından gelir. Yapılan simülasyon testleri de bunu göstermektedir. Modellerin tanıtılmasından önce tüm modellerde geçerli olan ve tez kapsamında birkaç kez değinilmiş olan özellikleri maddeler halinde sıralayabiliriz.

- Şiddet açıklık alanı ile orantılı olarak değişir fakat alan dağılımlarının birbirini destekler nitelikte olmasına dikkat edilmelidir.
- Çözünürlükte etkili faktör dış bölgelerdir fakat şiddet bakımından zayıf olduğundan şiddet dengesinin korunmasında merkeze yakın delikler kilit rol oynamaktadır.





Şekil 3.9 Değişken oranlı (d/w) bölgelerin yarattığı şiddet dağılımları.

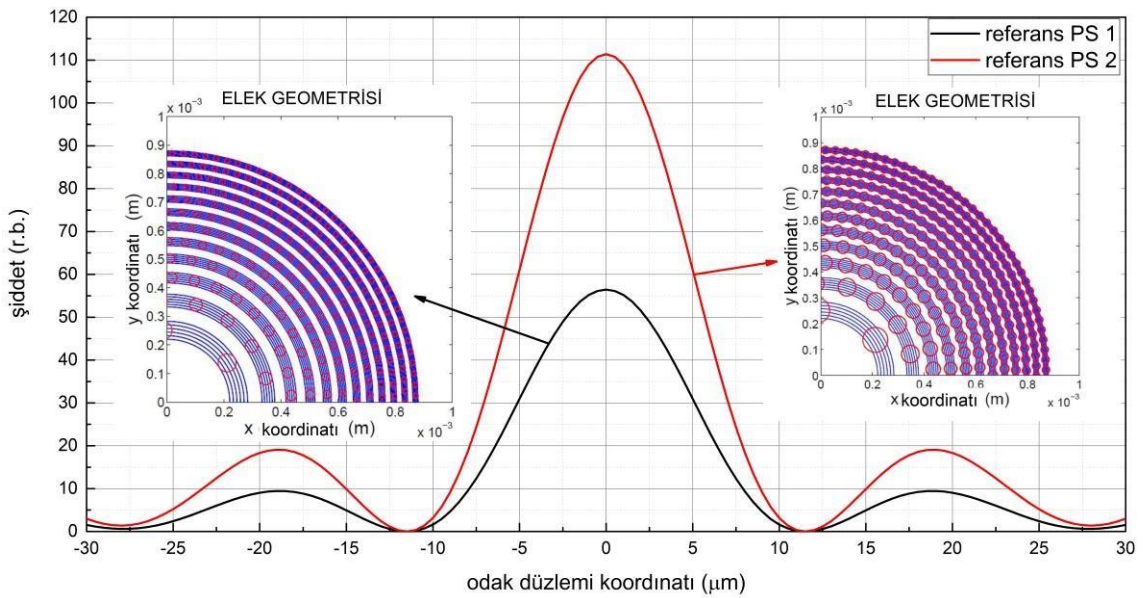
Şekil 3.9’da verilen bölgelerin iyileştirmesi ile detaylı çözünürlük ve şiddet analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları 3.2.1., 3.2.2. ve 3.2.3. bölümlerinde verilmektedir. Geliştirilen modellerin kullanım alanlarına göre sınıflandırılması ile şiddet çözünürlük modülasyonu daha kolay yapılabilir. Değişik uygulamaların değişik öncelikteki gerekliliklerini çözmek amacıyla şiddet çözünürlük modülasyonu yapılabilir. Geliştirilen tüm modeller üretim tekniği olan UV litografi tekniğine göre seçilmiş ve

görünür ışık bölgesinde çalıştırılmaları düşünülmüştür. Diğer uygulama alanları olan x ışınları [39,64] ve kızılötesi [65,66] bölgelerinde de çalışmalar mevcuttur. Ancak x ışını bölgesindeki foton eleklerinin üretilmesi zorlu bir süreçtir. Kızılötesi bölgesine bakıldığında ise yapılar giderek büyümekte ve mikron mertebesinin üzerine çıkmaktadır. Görünür bölgede yapılan çalışmalar hem UV litografi tekniğine uyum sağlamakta hem de mikro kırınım optiği olarak çalışmaya uygun olmaktadır.

Şiddet çözünürlük modülasyonunun yapıldığı ve kullanım alanlarına göre sınıflandırılan üç model üzerinde çalışılmıştır. Bu modeller aşağıda listelenmekte ve detayları 3.3.1., 3.3.2. ve 3.3.3. bölümlerinde verilmektedir.

- Tüm Değişken Boyutlu Foton Eleği (AVS-PS)
- Sabit Çap Değerli Foton Eleği (CDS-PS)
- Parçalı Değişken Boyutlu Foton Eleği (SVS-PS)

Geliştirilen tüm modellerin testi için aynı tasarıma sahip olan ve d/w oranı 1 ve 1.53 olan iki adet foton eleği tasarımı yapılmıştır. Bu foton elekleri, çözünürlük bakımından birbirine tamamen eşit şiddet bakımından ise, literatürde olduğu gibi, farklıdır. Bu foton eleklerine referans foton eleği 1 ve referans foton eleği 2 isimleri verilmiştir. Referans foton elekleri Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Tasarlanan diğer tüm foton eleklerindeki açısal dağılım referans foton elekleri ile tamamen aynıdır. Tasarlanan foton eleklerinin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.10 d/w oranı 1 ve 1.53 olan foton eleklerinin geliştirilen program ile alan analizi (referans PS 1 $d/w=1$, referans PS 2 $d/w=1.53$).

Aşağıda verilen Çizelge 3.1’de foton elekleri tasarlanırken kullanılan tüm teknik özellikler verilmiştir. Modellerde değişken olarak verilen tek özellik d/w oranları yani deliklerin çaplarıdır.

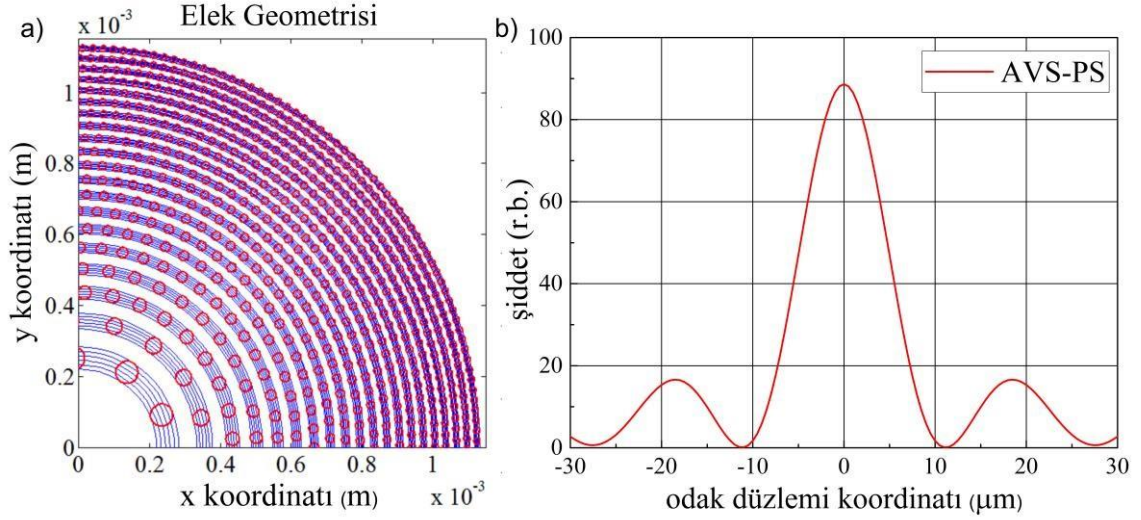
Çizelge 3.1 Foton eleği tasarım parametreleri.

Özellik	Değer
Dalgaboyu	632.8 nm
Odak Uzaklığı (f)	0.05 m
Delik Sayısı	7684
Bölge Sayısı	35
Minimum Delik Çapı	10.62 μm
Foton eleği çapı	3 mm

3.3.1. Tüm Değişken Boyutlu Foton Eleği (AVS-PS)

AVS-PS modelinde temel ister yüksek şiddet ve referans foton eleğine göre daha yüksek çözünürlüktür. Bu tip foton elekleri uydu teleskopları gibi yapılarda kullanım için geliştirilebilir. Teleskoplar gibi sistemlerde en önemli faktör şiddet faktörüdür. Işık toplamak amacıyla genellikle daha büyük çaplarda geliştirilen teleskopların çözünürlük kaygıları ikinci planda olmasına rağmen önemli bir parametredir. Bu gerekliliklerden yola çıkarak hem geleneksel foton eleklerinden yüksek çözünürlük hem de şiddet artırımı için AVS-PS modeli geliştirilmiştir. Geleneksel foton eleklerindeki d/w oranı 1 ve 1.53’tür. 1.53 oranı genel olarak şiddet gerekliliğini gidermekle birlikte çözünürlüğe bir katkı sağlamamaktadır. AVS-PS geliştirilirken temelde bilinen özelliklerden yola çıkılmıştır. Bu özellik şiddetin ilk Fresnel bölgeleri, çözünürlüğün ise daha dıştaki Fresnel bölgeleri tarafından kontrol edilmesidir. Tasarımın ilk adımı olarak kullanılan bu özellikler

yardımıyla en içteki bölgelerdeki deliklerin çapı çok küçültülmeden tasarıma başlanmıştır. Bilinen diğer bir özellik olan ve teorik bölümde anlatılan Bessel fonksiyonu davranışı göz önüne alınmıştır. Şekil 3.7'den görüleceği üzere ilk maksimum değeri d/w oranının 1.53 olduğu bölgedir. Bununla birlikte daha büyük oranlarda da maksimumlar yakalanabilmektedir. Tez çalışmasında yapılan tüm tasarımlarda yapıldığı gibi AVS-PS tasarımında da üretim sınırlandırmaları göz önünde bulundurulmuştur. En dıştaki deliklerin d/w oranlarının 1.53 değeri yerine 3.5 ve daha büyük değerleri seçilmiş, fakat bu boyutlardaki deliklerin kendilerinden önceki Fresnel bölgesindeki deliklerle çakışmaları söz konusu olmuştur. Bu modelin doğası gereği sürekli bir oransal artış çözünürlüğü de iyileştirirken şiddeti de yüksek tutmaya yaramaktadır. En dış delik çapının Fresnel bölgesine oranının 1.53'te sabitlenip ulaşılacak en iyi çözünürlük ve şiddet modülasyonun bu değerle sağlandığı saptanmıştır. Foton eleklerindeki geleneksel olarak seçilen değerler olan 1 ve 1.53'teki şiddet ve çözünürlük değerleri Şekil 3.10'dan görülmektedir. Çözünürlüğün ikinci planda olduğu bu uygulamada şiddetin referans foton elekleri ile kıyaslanacak şekilde elde edilmesi için 1. Fresnel bölgesi d/w oranı 1 olarak alınmıştır. Oran değişimleri Çizelge 3.2'de verilmektedir. Oranların değişimleri hem şiddeti hem de çözünürlüğü optimum değerde tutmak için sabit tutulmuştur. Programa yerleştirilen bir fonksiyon ile hem geometrik yapı incelenmiş hem de alan dağılımından şiddet ve çözünürlük değerleri saptanmıştır. Geometrik olarak incelenen optimum foton eleğinde üretime engel bir durum saptanmamıştır. Deliklerin yakınlığı program yoluyla ayrıca kontrol edildiğinden aynı eleğin farklı bir üretim tekniği ile üretimi için yeni foton eleği geometrik dağılımları bulunabilmektedir. Şekil 3.11'de AVS-PS geometrik şekillenimi ve şiddet dağılımı verilmektedir.



Şekil 3.11 Tüm Değişken Boyutlu Foton Eleği (AVS-PS) modeli. (d/w oranları değişimi 1'den 1.53'e kadar) a) AVS-PS modeli 0-90°lik alandaki delik dağılımı b) AVS-PS odak düzlemi şiddet dağılımı.

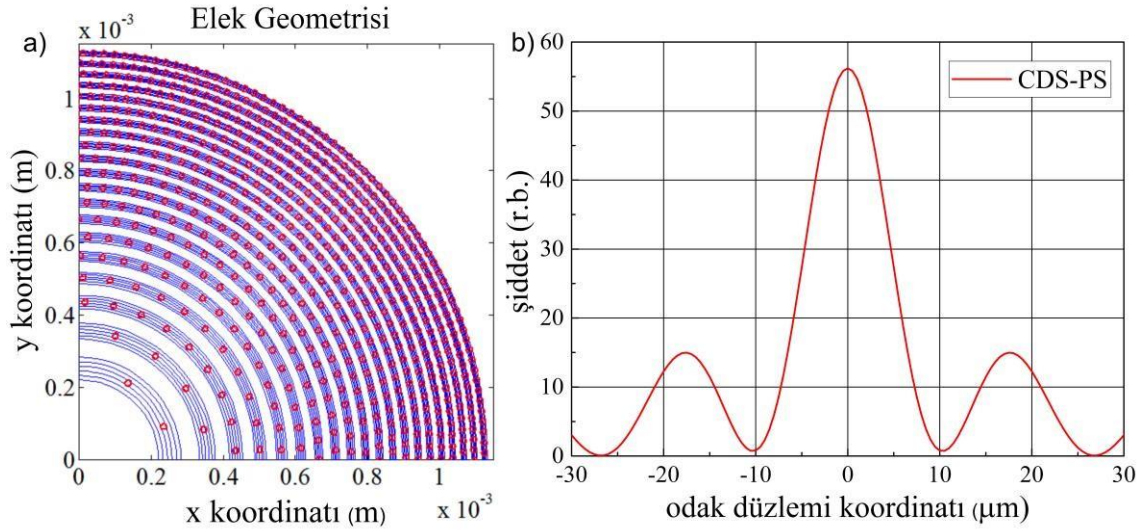
AVS-PS modelinin genel şiddet değerleri ve çözünürlük değerleri ile grafikleri Bölüm 3.3.4.'te verilmektedir. Bu tip foton elekleri literatürde olan uydu teleskoplarına takılabilecek olan foton elekleri [13], [65] arasında kullanım alanı bulma konusunda adaydır.

3.3.2. Sabit Çap Değerli Foton Eleği (CDS-PS)

CDS-PS tasarımı çözünürlüğün en yüksek ve şiddet değerinin en düşük olarak elde edildiği modülasyon tasarımlarından bir tanesidir. Bu tasarımda kullanım alanı olarak ışık kaynağı şiddeti ayarlanabilir ve yüksek çözünürlük gerektiren sistemler olarak düşünülmüştür. Bu sistemlerde kullanılan foton eleklerinden beklenen özellik çözünürlüğün yüksek olmasıdır. Literatürde bu sistemlere örnek olarak başta gelen sistemler litografi sistemleridir [14,50]. Bu uygulama alanının diğerlerinden bir farkı vardır. Bu fark foton eleği üretim yönteminden gelmektedir. Foton elekleri geleneksel olarak litografi yöntemleri ile üretilirler ve boyut kaygıları sebebiyle yapılar küçüldükçe UV litografiden elektron ışını litografi tekniğine kaymalar olmaktadır. Bu tip sistemlerde kullanılan foton elekleri ile çözünürlük artırılabilir ve daha küçük boyutlu desenler UV litografi ile ulaşılabilir duruma gelebilir. Diğer bir taraftan x-ray içinde söz konusu durum

geçerli olabilmektedir. Kullanım alanına bakıldığında en baskın gerekliliğin çözünürlük olduğu görülmektedir. Diğer taraftan şiddetin de geleneksel foton elekleri ile karşılaştırılabilir ölçüde olması bir tasarım kriteri olarak düşünülmüştür. AVS-PS modeli gibi bu modelde de birçok iterasyon yapılmıştır. Yapılan iterasyonlar sonucunda giderek küçülen iç Fresnel bölgesi çapları saptanmıştır. Özellikle referans foton eleğinin sağladığı kadar bir şiddet elde edilmeye çalışıldığından birkaç sınırlayıcı parametre üzerinde özellikle durulmuştur. Bu parametrelerin başında en iyi yapıcı girişimi sağlayan en dış bölgedeki delik çapları gelmektedir. Diğer tasarımlardaki oranlara benzer olarak bu tasarımda da en dış delik çapının maksimum değerli şiddet kuralına uyması amacıyla oran yaklaşık olarak 1.5 değerine sabitlenmiştir. Yine tüm bölgelerde değişken oran tanımına uyularak şiddet ve çözünürlük için iterasyonlar yapılmıştır. Yapılan iterasyonlardaki bir diğer sınırlayıcı parametre şiddetin referans foton eleğine ($d/w=1$) yakın bir şiddet olmasıdır. Şiddet dağılımlarının verildiği çizelge Bölüm 3.3.4'te verilmektedir. Öte yandan üretim içindeki sınırlandırıcı parametrelere bu iterasyonlarda da yer verilmiştir.

Yapılan iyileştirme çalışmaları sonucunda en içteki Fresnel bölgesindeki çapların neredeyse en dıştaki Fresnel bölgesi delik çaplarına eşit olduğu saptanmıştır. Bu özellik şiddet minimumunda referans foton eleğinin yakalanması amacıyla yapılan iyileştirme çalışmaları ile yakalanmıştır. Tasarımın temelinde yatan üretim parametreler haricinde yakalanmak istenen özelliklerden biri de sürekli değişken d/w oranı ve bunun yanında üretim kolaylığıdır. Üretim kolaylığı açısından düşünüldüğünde birbirine yakın boyutlardaki delik çaplarında aranan bir özellik ortaya çıkmaktadır. Bu bilgidен yola çıkarak tasarıma yeni bir yol verilerek birbirine yaklaşan en dış ve en iç bölgedeki delik çapları eşitlenerek tasarıma yön verilmiştir. Yeni tasarım parametresinde her bölgede eşit delik çapı kullanarak yapılan iyileştirmede hem çok yüksek çözünürlük hem de referans foton eleği kadar şiddet değeri yakalanmıştır. Yakalanan bu özelliklerin yanı sıra hem üretim kolaylığı hem de tasarım geliştirme adımı olarak kullanılan değişken oranlı foton eleği yapısı sağlanmıştır. Optimize edilen tasarımdaki geometrik şekillenim ve şiddet dağılımı Şekil 3.12'de verilmektedir.



Şekil 3.12 Sabit Çap Değerli Foton Eleği (CDS-PS) modeli. (d/w oranları değişimi 0.262’den 1.552’ye kadar, sabit çap değeri $16.5 \mu\text{m}$) a) CDS-PS modeli 0-90°lik alandaki delik dağılımı b) CDS-PS odak düzlemi şiddet dağılımı.

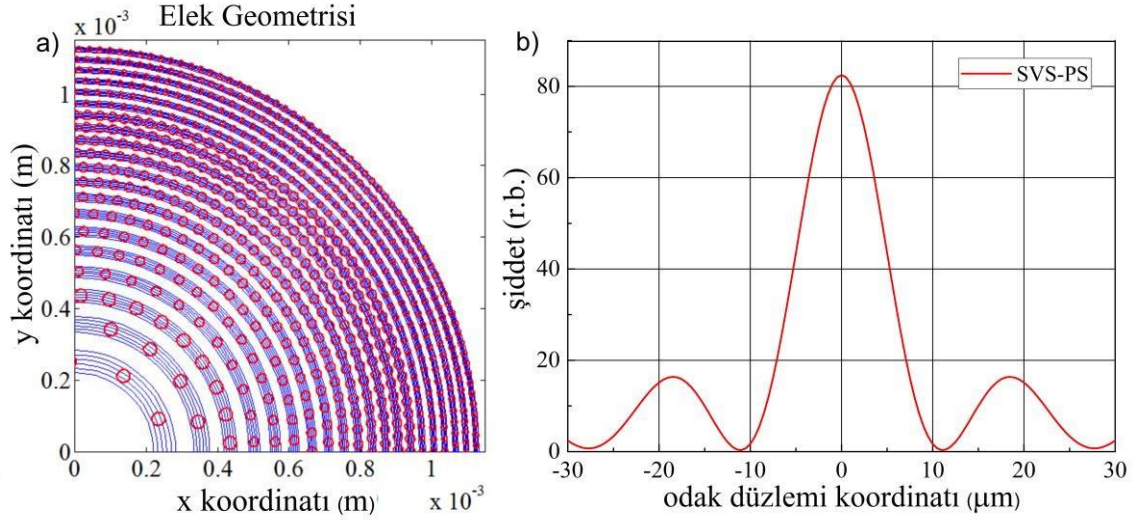
Şekil 3.12’de verilen geometrik şekillenimdeki delik çapları ve ilgili bölgelerin d/w oranları Çizelge 3.2’de verilmektedir. Yapılan iyileştirme sonrası yakalan çözünürlük ve şiddet değerleri de ayrıca Çizelge 3.3’te verilmiş ve Bölüm 3.3.4’te tartışılmıştır.

3.3.3. Parçalı Değişken Boyutlu Foton Eleği (SVS-PS)

SVS-PS modeli tez kapsamında geliştirilen son modeldir ve temel kullanım alanı görünür bölge kameraları olarak belirlenmiştir. Bu kullanım alanında diğer iki modelin hibrit bir bileşimi olan optimize çözünürlük ve şiddet aranmaktadır. Tüm modellerin kullanım alanlarının ve birincil-ikincil parametrelerinin listelendiği görsel Şekil 3.18’de verilmiştir. Bu model diğer iki model olan AVS-PS ve CDS-PS’nin ortak özelliklerini, hem geometrik hem de optik özellik bakımından, taşıyan bir modeldir. Literatürde kullanım alanı olarak fotoğraf makineleri ve kameralar olarak yer almaktadır [16]. Bu modelde her iki modelin avantajlı taraflarından yararlanmak istenilmiştir. Sürekli değişen bir d/w oranı, kolay üretilebilirlik ve şiddet çözünürlük iyileştirmesi bu modelde aranan özelliklerdir. İlk modelden (AVS-PS) alınan maksimum çözünürlük ve geometrik dağılımdaki sınırlandırmalar ile bu modelde de en dış delik oranları 1.53 olarak belirlenmiş ve tasarıma bu değere yakın değerler ile yön verilmiştir (bkz. Çizelge 3.2). Çözünürlük için

yapılan bu sınırlama parametresinden sonra şiddet için referans foton eleğinden daha iyi kırınım etkisine sahip foton eleği tasarlamak amacıyla 2. model'deki (CDS-PS) bilgilerden yararlanarak en içteki deliklerin oranı 0.262'den başlanarak iterasyonlar yapılmıştır. 0.262 oran değeri foton eleğinin şiddetini yaklaşık olarak referans foton eleği 1'e yaklaştırmaktadır. Diğer yandan bu değerin üzerine çıkabilmek için d/w oran değerini artırmak gerekir. Oran değerlerinin artırılması ile iç bölgelerin şiddete katkısı artarken çözünürlüğe olan negatif katkıları da artmaktadır. Bu sebeple çözünürlüğe olan katkının en iyi geldiği dış bölgelerin kendi içlerinde gruplanması ve bu bölgede yüksek oran kullanılarak çözünürlüğün yüksek kalması sağlanmıştır. İlk tasarım çalışmaları sırasında saptanan her bölgenin getirdiği çözünürlük ve şiddet değerleri (bkz. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6) göz önüne alınarak tasarıma foton eleğini gruplara bölerek optimize etme fikriyle devam edilmiştir. İlk olarak hangi bölgelerin süper çözünürlüğe katkı verdiği ile ilgili çalışma yapılmıştır. Burada Rayleigh limitini aşan dağılımın hangi bölgelerden geldiği saptanmaya çalışılmıştır. 35 bölgeli foton eleği tasarımımızda bu limit yaklaşık 15. Fresnel bölgesinden sonra aşılmaktadır. Buradan yola çıkarak en sondaki 20 Fresnel bölgesi ayrı bir parça olarak hesaplamaya katılmıştır. Yapılan diğer iterasyon çalışmalarında ilk üç bölgenin çözünürlüğü düşürdüğü fakat şiddetinin çoğunun bu bölgeden sağlandığı görülmüştür. Bu bölge de ayrı bir parça olarak alınmıştır. Alınan bu ikinci parçada daha önce de söz edildiği üzere şiddeti referans foton eleğinden fazla olacak şekilde ayarlamak adına ilk oran değeri 0.262'den daha büyük bir değere ayarlanmıştır. Geriye kalan bölgeler de ayrı bir parça olarak kullanılmıştır. Üretim kolaylığı açısından modeli öne çıkarmak amacıyla ikinci modelde (CDS-PS) kullanılan sabit çap özelliği bu modele de uygulanmıştır. Her parça kendi içinde sabit çapa ve sürekli değişken olan d/w oranına sahip olmuştur. En dış parçadaki sabit çap en yüksek çözünürlüğün yakalanması için Bessel fonksiyon oranındaki maksimumdan gelmektedir. İlk parçada yapılan iyileştirme sonucu şiddeti ortalama olarak ayarlayan çap da bu parçaya sabit çap olarak belirlenmiştir. Öte yandan foton eleğinin orta bölümünde yer alan parça 2 için belirlenen çap, bu parçadaki en son bölge olan 14. bölge Rayleigh sınırında olduğundan buranın çözünürlüğü katkı sağlayan bir çözünürlük olacaktır. Bu varsayımdan yola çıkarak katkı sağlayan bölgenin oranı 1.53 olacak ve daha küçük bölgelerde bu oran azalacak şekilde bir sabit değer seçilmiştir. Seçilen tüm sabit çaplar

ile tasarım tamamlanmış ve tasarımın geometrik şekillenimi ve şiddet dağılımı Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 Parçalı Değişken Boyutlu Foton Eleği (SVS-PS) modeli. (1, 2 ve 3. parçalardaki sabit değerleri sırasıyla 36.30, 25.67 ve 16.23μm). a) SVS-PS modeli 090°lik alandaki delik dağılımı b) SVS-PS odak düzlemi şiddet dağılımı

Tasarıma ait şiddet ve çözünürlük sonuçları Bölüm 3.3.4.'te ve geometrik özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

3.3.4. Model sonuçları

Tasarlanan modellerin d/w oranları ve deliklerin çapları Çizelge 3.2'de görülmektedir. Her model için bu çizelgenin nasıl oluşturulduğu önceki bölümlerde (3.3.1, 3.3.2, 3.3.3) anlatılmıştır.

Çizelge 3.2 Tasarlanan foton eleği modellerinin delik çapları ve d/w oranları.

MODEL	AVS-PS		CDS-PS		SVS-PS		Parça 1
Bölge numarası	d/w	Gerçek Çap (μm)	d/w	Gerçek Çap (μm)	d/w	Gerçek Çap (μm)	
1	1.000	62.89	0.262	16.50	0.577	36.30	
2	1.016	45.16	0.371	16.50	0.816	36.30	
3	1.031	37.44	0.454	16.50	1.000	36.30	
4	1.047	32.91	0.525	16.50	0.816	25.67	

⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	Parça 2
14	1.203	20.21	0.982	16.50	1.528	25.67	
15	1.218	19.78	1.016	16.50	1.000	16.23	Parça 3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
34	1.514	16.33	1.530	16.50	1.506	16.23	
35	1.53	16.26	1.552	16.50	1.528	16.23	

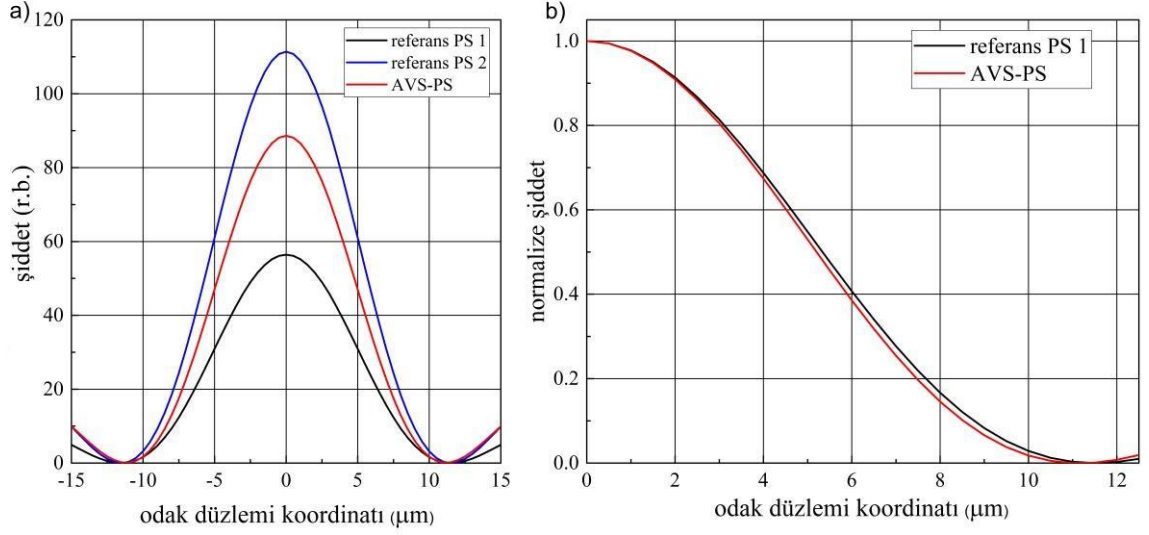
Yapılan bu modelleme çalışmaları ve oranların simülasyon sistemine girişi ile oluşturulan üç modelin ve bu modellerin başlangıç özelliklerine sahip referans foton eleklerinin merkez şiddet değerleri ve çözünürlük değerleri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3 Tasarlanan modellerin odak merkezi şiddet dağılımları ve Airy diski yarıçap değerleri.

Model	Referans PS 1	Referans PS 2	AVS-PS	CDS-PS	SVS-PS
Şiddet seviyesi (r.b.)	56.439	111.38	88.628	56.194	82.469
Airy yarıçapı (μm)	11.50	11.50	11.20	10.30	11.09

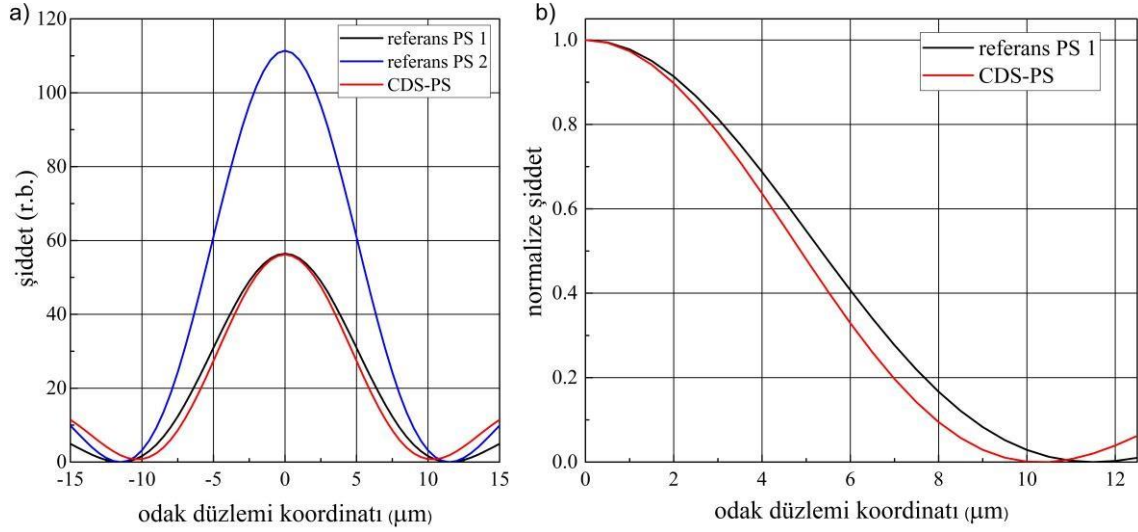
İlk olarak model AVS-PS'ye bakıldığında şiddetin yüksek ve çözünürlüğünde referans foton eleklerine göre yüksek olduğu hem Çizelge 3.3'ten hem de Şekil 3.14'ten görülmektedir. Şekil 3.14'de sol tarafta bağıl şiddet ile geliştirilen modelin referans foton eleklerine göre şiddet deseni tartışılmış sağ tarafta ise normalize şiddet grafiği ile çözünürlük üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Elde edilen değerlere bakıldığında AVS-PS

Çözünürlük değerinin referans foton eleği 1'e göre % 2.7 arttığı, şiddet değerinin ise referans foton eleği 1'e göre % 57 arttığı görölmektedir. Merkez iddet değerinde referans foton eleği 2'ye göre % 20.5'lik bir azalma söz konusudur. Bu azalma yerini çözünürlükteki artışa bırakmıştır.



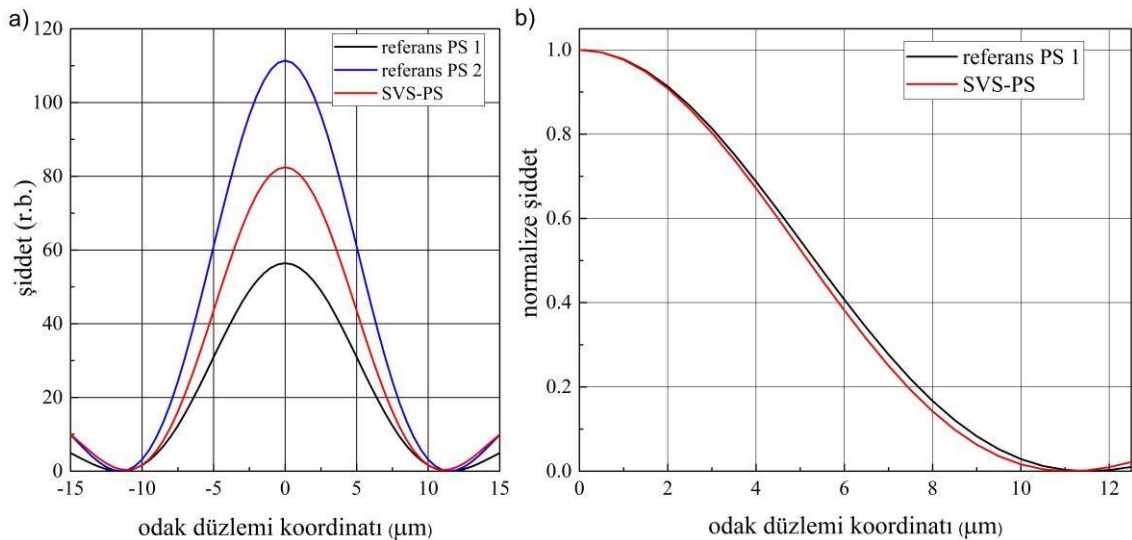
şekil 3.14 AVS-PS modeli ile referans foton elekleri şiddet ve çözünürlük karşılaştırılması a)AVS-PS, Referans foton eleği 1 ve 2 bağlı şiddet grafiği b) AVS-PS ve referans foton eleği 1 normalize şiddet grafiği.

Model 2 (CDS-PS) için bağlı şiddet ve normalize şiddet grafikleri şekil 3.15'te verilmiştir. Elde edilen simölasyon sonuçları ile hesaplamalar yapılmış ve çözünürlük değerinin referans foton eleklerine göre % 10.5'lik bir artış gösterdiği saptanmıştır. Öte yandan şiddet değerinin neredeyse referans foton eleği 1 ile aynı olduğu görölmektedir. Buradaki iddet farkı referans foton eleği 1'e göre % 0.44 düştüğü foton eleği 2'ye göre ise yaklaşık % 50'lik düşüşte olduğu görölmektedir.



Şekil 3.15 CDS-PS modeli ile referans foton elekları şiddet ve çözünürlük karşılaştırılması a) CDS-PS, Referans foton eleği 1 ve 2 bağıl şiddet grafiği b) CDS-PS ve referans foton eleği 1 normalize şiddet grafiği.

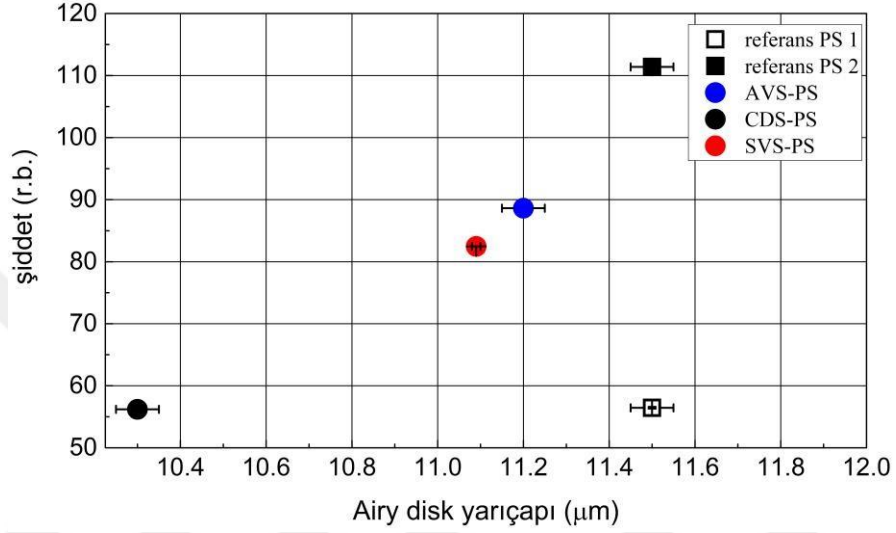
Geliştirilen son model olan SVS-PS modelin sonuçları Şekil 3.16’da verilmiştir. Bu model diğer iki modelin hibrit bir çalışmasıdır ve sonuçlarında benzer özellik göstermesi beklenmektedir. Çizelge 3.3 yardımıyla yapılan hesaplamalar sonucunda çözünürlük değerinin referans foton eleklarıne göre % 3.6 oranında arttığı, merkez şiddet değerinin referans foton eleği 1’e göre %46 oranında arttığı fakat referans foton eleği 2’den de % 26 oranında az olduğu satanmıştır. Bu değerler göz önüne alındığında bu tasarımın diğer iki tasarımın arasında hibrit bir tasarım olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.16 SVS-PS modeli ile referans foton elekleri şiddet ve çözünürlük karşılaştırılması

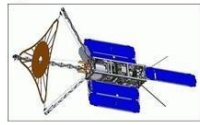
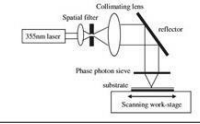
a) SVS-PS, Referans foton eleği 1 ve 2 bağıl şiddet grafiği b) SVS-PS ve referans foton eleği 1 normalize şiddet grafiği.

Tüm tasarımları çözünürlük ve şiddet değerlerinin birlikte incelenmesi için Şekil 3.17'deki grafik verilmiştir. Bu grafik yardımı ile geliştirilen foton elekleri kullanım alanına göre sınıflandırılabilirler.



Şekil 3.17 AVS-PS, CDS-PS ve SVS-PS modelleri ile referans foton elekleri şiddet ve çözünürlük değerleri grafiği.

Kullanılan uygulama alanları ve bu alanlarda kullanılan özelliklerin önem sırası Şekil 3.18'de verilmektedir. Şekil 3.18'den de görüldüğü üzere her alanın kendine özgü birincil ve ikincil önem sırasında geliştirme parametreleri vardır. Ayrıca bu foton eleklerinin kullanıldığı bölgelerin fotoğrafları şekil 3.18'de verilmektedir.

Modeller	Birincil Tasarım Parametresi	İkincil Tasarım Parametresi	Kullanım Alanı
AVS-PS	Şiddet 	Çözünürlük 	Uydu Kameraları 
CDS-PS	Çözünürlük 	Şiddet 	Litografi 
SVS-PS	Hibrit 	Hibrit 	Kameralar 

Şekil 3.18 Tasarlanan modeller (AVS-PS, CDS-PS ve SVS-PS) tasarım parametreleri, sonuçları ve kullanım alanları tablosu (AVS-PS FalconSat-7 nano uydu tasarımı [65], CDS-PS nanolitografi sistemi [67] ve SVS-PS plenoptik kameralar [16]).

Tasarlanan modellerde çözünürlük ve şiddet iyileştirmesi dışındaki diğer bir önemli özellik tüm tasarımların farklı foton eleklerine uygulanabilmesidir. Bunun temel sebebi foton eleğinin tasarımında ve açısal dağılımda hiçbir değişiklik yapılmadan geliştirilen modeller olmasıdır. Tasarımlardaki tüm parametreler, açısal dağılım, odak uzaklığı delik sayısı ve Fresnel bölgesi, sabit tutularak sadece d/w oranı değiştirilmiştir. İzlenilen bu yol sayesinde herhangi bir foton eleğine rahatlıkla uygulanabilecek olan modeller geliştirilmiştir. Bu konuda dikkate alınması gereken tek parametre bu üç modele yerleştirtilecek olan foton eleklerindeki deliklerin sıklığıdır. Genellikle kullanılan bir oran olan 1.53'ü kabul eden her tasarım bu üç modele uygun bir şekilde dönüştürülebilmekte ve şiddet çözünürlük ayarlaması sağlanabilmektedir.

4. FOTON ELEĞİ ÜRETİMİ

Bu bölümde tez kapsamında üretilen foton eleklerinin üretimi ve yapısal ölçüm adımları verilmektedir. Kullanılan tüm donanım ve sarf malzemeler, bu malzemelerin kullanımı ve işlem basamakları şematik gösterimler ve açıklamalarla anlatılmıştır.

Foton eleği üretimde en sık kullanılan yöntem litografi yöntemidir. Litografi yöntemi temel olarak bir desenin bir alttaş üzerine aktarılması olarak adlandırılabilir. Litografide kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemler özetle Bölüm 4.1.'de verilmektedir. Ayrıca litografi yöntemiyle foton eleği üretimi için gerekli diğer adımlarda Bölüm 4.2.'de anlatılmaktadır.

4.1. Litografi Yöntemi İle Foton Eleği Üretimi

Litografi yöntemi genellikle mikroelettronik alanda oldukça sık kullanılan bir üretim tekniğidir. Bu tez kapsamında yapılan tüm üretimler için mikro litografi tekniği kullanılmıştır. Mikro litografi genellikle boyutları 100 µm civarı ve daha küçük olan yapılar için nanolitografi ise yapıları mikron mertebesinden küçük yapılar için kullanılmaktadır. Her ne kadar yaklaşık sınırlar verilse de arada boyutsal olarak temel bir ayırım yapılmamaktadır. Foton elekleri genellikle kullanım alanı ve özelliklerine göre birçok boyutta üretilebilirler. Foton eleklerindeki delik çaplarının boyutsal olarak üretimi için x ışını litografiden UV litografiye kadar birçok yöntem vardır. Bunun temel sebebi deliklerin çaplarının geniş bir aralıkla değişmesidir. Teleskoplar gibi [12,13] sistemlerde oldukça büyük delikler gerekirken mikro aygıtlar [56] için kullanılan foton eleklerindeki çaplar oldukça küçüktür. Litografide kullanılan teknikler Bölüm 4.1.1'de özetle anlatılmıştır.

4.1.1. Litografi Yöntemleri

Litografi yöntemleri genellikle desen yazımında kullanılan ışık veya parçacık kaynağı ile adlandırılır. Işığın doğası gereği kopyası oluşturulacak desenin boyutlarına uygun bir kaynak ile çalışılması gerekmektedir. Boyutların mikron mertebesinden nanometre mertebesine kaymasıyla kullanılan litografi tekniği de değişerek gerekliliği sağlayabilen bir tekniğe geçiş yapılmalıdır. Bu teknikler genellikle üç ana başlık altında incelenebilir.

Bunlar,

- X-ışını litografi tekniği
- Elektron/iyon demeti litografi tekniği

- Optik litografi tekniği olarak ayrılmaktadır. İsimlerinden de anlaşılacağı üzere bu yöntemlerin her birinde desenlendirme işlemi için farklı bir kaynak kullanılmaktadır.

X-ışını litografi tekniğinde kaynak X ışınlarıdır ve çözünürlük veya minimum yapı boyutunun en iyi değerlere ulaştığı teknik bu tekniktir. Bu teknik ile üretilen foton eleklerinin minimum çözünürlük 25 nm olarak rapor edilmiştir [56]. Günümüzde x-ray litografide bu değerin altına inilmiştir.

Elektron demeti litografi desenlendirme için elektronları kullanılır. Bu yöntem ile üretilen birçok mikroelettronik vardır. Bu yöntemde oluşturulan yapı boyutları da x-ışını yapı boyutlarına benzer şekilde mikron mertebesi ve altındadır. Bu yöntemle üretilen birçok foton eleği çalışması da mevcuttur [19], [20]. Yapılan elektron demeti çalışmalarının minimum delik çapı olarak 314 nm rapor edilmiştir [20]. Elektron demeti litografi gibi iyon demeti litografi teknikleri de kullanılan diğer tekniklerdendir. Bu tekniğe ait çalışmalar olsa da foton eleği üretimi için kullanılan teknikler arasında rapor edilen bir sonuç bulunmamaktadır.

UV litografi diğer bir adıyla fotolitografi tekniği farklı dalgalıboylarındaki ultraviyole ışığı kullanarak desenleri alttaşılara aktaran bir tekniktir. Bu teknik içinde kullanılan birkaç dalgalıboyu 405 nm, 375 nm ve EUV'dir. EUV olarak (extreme UV) olarak adlandırılan bölgede ışığın dalgalıboyu 200 nm'den 13.5 nm'ye kadar değişmektedir [68]. Kullanılan ultraviyole ışığa göre adlandırmalar, ultraviyole (UV, $\lambda < 400$ nm), derin ultraviyole (DUV, $\lambda = 248$ nm, 193 nm) veya aşırı ultraviyole (EUV, $124 \text{ nm} < \lambda < 10$ nm) şeklinde yapılmaktadır [69]. UV litografi tekniği ile üretilen foton eleklerinde boyut sınırlandırmaları mikron mertebesinde dir. Literatür genelindeki çalışmaların çoğunda elektron demeti litografi kullanılması na rağmen UV litografi kullanan çalışmalar da mevcuttur [58], [70]. Bu tez çalışmasında kullanılan üretim tekniği fotolitografi tekniğidir. Bu tekniğe ait detaylar Bölüm 4.1.2.'de verilmektedir.

4.1.2. Fotolitografi Yöntemi

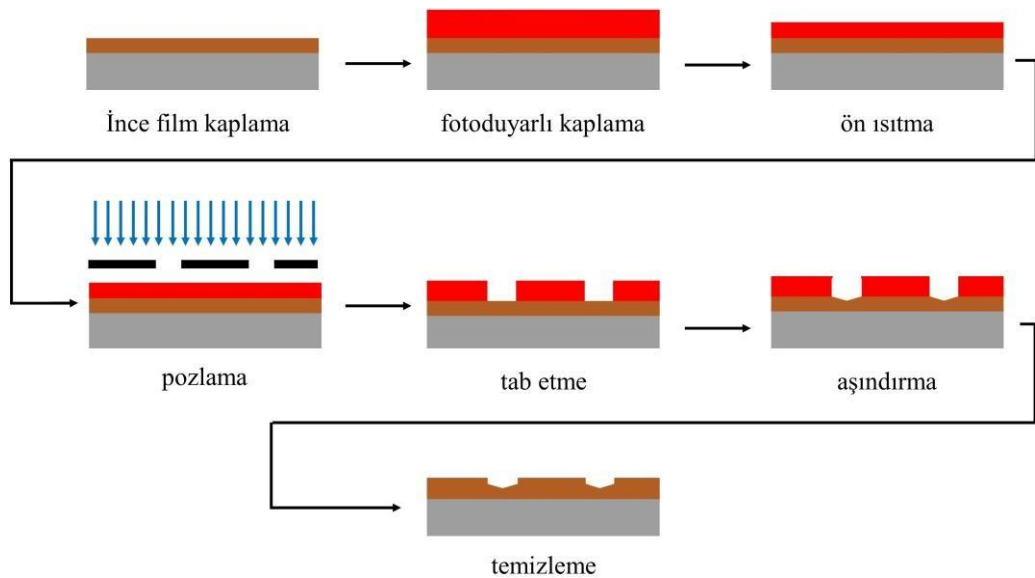
Fotolitografi tekniği desenleri aktarmak için UV ve EUV ışığı kullanan litografi tekniğidir. Bu teknik hem UV litografi hem de fotolitografi adıyla anılır. Basit bir fotolitografi süreci birçok adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar aşağıda sıralanmaktadır.

Sıralanan adımların anlatımı detaylı olarak tez kapsamında yapılan çalışmalar bölümünde Bölüm 4.2.'de anlatılacaktır.

Genel bir litografi işlem adımları,

- Altaş Hazırlama
- İnce Film Kaplama
- Fotoduyarlı Malzeme Kaplama
- Ön Isıtma
- Pozlama/Baskı
- Tab Etme
- İşlem Sonu Isıtma
- Aşındırma/Düşürme
- Silme/Temizleme

Yukarıda verilen sıralama ve basamaklar yapılacak litografi işleminin tipine göre farklılık göstermektedir. Araya yeni adımlar girebildiği gibi bazı adımlara da gerek kalmadan işlem tamamlanabilmektedir. İşlem sıralamasına ait görsel ve yapılan işlemlerin şematik gösterimi Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1 Fotolitografi yöntemi işlem adımları (ıslak kimyasal aşındırma yöntemi).

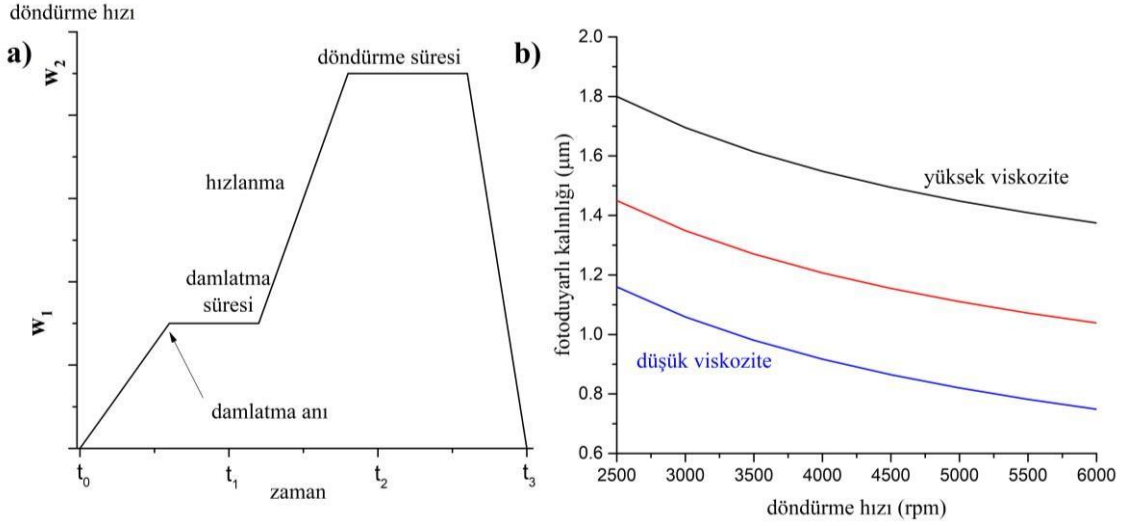
Alttaş hazırlığı, fotoduyarlı malzemenin alt tabakaya yapışmasını iyileştirmeyi amaçlar. Bu, iyileştirme birkaç teknik ile gerçekleştirilir. Kirlenmeyi gidermek için alttaş temizliği, su buharı yapışmasını gidermek için fırında kurutmak ve bir yapışma artırıcının eklenmesi yaygın kullanılan tekniklerdir. Alttaş kirlenmesi, partiküller veya bir tabaka şekli alabilir. Bu kalıntılar organik veya inorganik olabilir. Parçacık, son fotoduyarlı malzeme deseninde kusurlara yol açarken, film kirlenmesi yapışmanın zayıf olmasına ve daha sonra çizgi genişliğinde kontrol kaybına neden olabilir. Parçacıklar genellikle havadan veya kirli sıvılardan (örneğin, kirli yapışma artırıcı) gelir. Parçacık kirlenmesini kontrol etmenin en etkili yolu kaynaklarını ortadan kaldırmaktır. Bu her zaman pratik olmadığından, parçacıkları gidermek için kimyasal/mechanik temizlik kullanılır. Yağlar veya polimerler gibi organik filmler vakum pompalarından ve diğer makinelerden, vücut yağlarından ve terden gelebilir. Bunların yanında önceki işlem adımlarından kalan artıklar çeşitli polimer tortularından oluşabilir. Bu filmler genellikle kimyasal, ozon veya plazma temizliği ile çıkarılabilir. Benzer şekilde, doğal oksitler ve tuzlar gibi inorganik filmler kimyasal veya plazma ile sıyırma yoluyla uzaklaştırılabilir. Bir tür kusur mekanizması olan yüzeye tutunmuş sudan kurtulmak için susuzlaştırma (dehidrasyon) fırını adı verilen yüksek sıcaklıkta bir işlem kullanılmalıdır. Adından da anlaşılacağı gibi bir susuzlaştırma fırını, genellikle 30-60 dakika boyunca 200-400 °C arasındaki sıcaklıkta pişirme yaparak suyu alttaş yüzeyinden uzaklaştırır. Alttaş daha sonra soğumaya bırakılır (tercihen kuru bir ortamda) ve mümkün olan en kısa sürede kaplanır. Nemli (kuru olmayan) bir ortamda bırakılırsa suyun alttaş yüzeyinde tekrar yapışmasını

sağlayacağından bu tip ortamlardan uzaklaşılmalıdır. Bir susuzlaştırma fırını da organik kirleticilerin uçucu hale getirilmesinde etkili olup, alttaş daha da temizler. Genellikle, işlem adımlarının normal dizisi, örneğin termal oksidasyon gibi, fotoduyarlı malzeme ile kaplamadan hemen önce bir tür yüksek sıcaklık işlemi içerir. Alttaş yüksek sıcaklık adımından hemen sonra kaplanırsa, susuzlaştırma fırını elimine edilebilir. Bununla birlikte, tipik bir susuzlaştırma fırını, silika alttaşların (silisyum, polisilisyum, silisyum oksit ve silisyum nitrür dahil) yüzeyinden suyu tamamen çıkarmaz. Yüzey silisyum atomları, bir tekli su oluşturan silanol grubu (SiOH) ile güçlü bir şekilde bağlanır. Bu son su katmanını uzaklaştırmak için 600 °C üzerindeki sıcaklık sıcaklıkları gereklidir [71].

Ayrıca, silanol, alttaş kuru olmayan bir ortamda soğutulduğunda hızlı bir şekilde tekrar bağlanır. Bu yaklaşım pratik olmadığından, bu silanolun çıkarılmasında tercih edilen yöntem kimyasal yoldur. Yapışma destekleyicileri, yüzey silanol ile kimyasal olarak reaksiyona girmek ve -OH grubunu, hidroksil grubundan farklı olarak, fotoduyarlıya iyi yapışma sağlayan organik bir fonksiyonel grup ile değiştirmek için kullanılır. Silanlar bu amaç için sıklıkla kullanılır, en yaygın olanı heksametil disilizandır (HMDS) [72],[73]. HMDS'in kaplama işleminden sonra kurumasına izin verilmemesi durumunda dramatik yapışma kaybı ortaya çıkar. Doğrudan döndürme/spin kaplama (spin coating) işlemi ile kaplamak kolay olmakla birlikte, silanol gruplarının küçük bir yüzdesinin yer değiştirmesinde etkilidir. Bu sebeple özel fırınlarda HMDS kaplaması önerilmektedir. Yapışma destekleyicisinin uygulanmasında tercih edilen yöntem, alttaş, genellikle yüksek sıcaklıklarda ve düşük basınçta, HMDS buharına maruz bırakmaktır. Bu, alttaşın fazla HMDS birikmesi olmadan iyi bir şekilde kaplanmasına izin verir ve daha yüksek sıcaklıklar silanol gruplarıyla daha fazla reaksiyona neden olur. HMDS ile düzgün bir şekilde kaplandıktan sonra, alttaş birkaç güne kadar su yapışması olmadan dayanabilir [74]. Susuzlaştırma fırını ve buhar kaplamasının aynı fırında yapılması kaplama işleminin yüksek performansta yapılmasını sağlamaktadır.

İyi kontrol edilen bir kalınlıkta ince, homojen bir fotoduyarlı kaplama görünüşte basit olan dönel kaplama işlemi ile gerçekleştirilir. Katı bileşenleri bir çözücü içinde çözerek sıvı bir forma dönüştürülen fotoduyarlı, alttaşın üzerine dökülür ve daha sonra istenen filmi üreten yüksek hızda bir döner tabla üzerine döndürülür. Kalınlık kontrolü, homojenlik ve düşük hata yoğunluğu için sıkı gereksinimler vardır. Çok sayıda parametrenin fotoduyarlı kalınlığı, homojenliği ve kontrolü üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği bu işleme özellikle dikkat edilmelidir. Statik dağıtma (fotoduyarlı damlatılırken alttaş sabit) veya dinamik dağıtım (fotoduyarlı damlatılırken alttaş dönüş hareketinde), dönme hızları ve süreleri ve dönme hızlarının her biri için hızlanmalar arasında bir orantı vardır. Aynı zamanda, fotoduyarlı malzemenin hacmi ve malzemenin özellikleri (viskozite, içindeki katı miktarı ve çözücü bileşimi gibi), alttaş (alttaş malzemesi ve topografya), filmin dayanımı ve özellikleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bunlar haricinde, kaplama işleminin, egzoz, sıcaklık ve nem kontrolü ve kaplama temizliği gibi pratik yönleri, fotoduyarlı film üzerinde önemli etkilere sahiptir.

Şekil 4.2a, genel bir fotoduyarlı dönel kaplama döngüsünü göstermektedir.



Şekil 4.2 Döner kaplama sistemi ile fotoduyarlı malzeme kaplama işlemi a) döner kaplama hız ve hızlanma grafiği ($w_1 > 0$ durumunda dinamik damlatma) b) fotoduyarlı viskozitesinin kaplama kalınlığına etkisi [75].

Her ne kadar teori, dönel kaplama işlemini reolojik olarak tanımlasa da, pratik terimlerle, fotoduyarlı kalınlığının işlem parametreleriyle tekrarlanabilirliğinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Fotoduyarlı dönüş hızı eğrisi (Şekil 4.2b) istenen film kalınlığını elde etmek için gerekli bir araçtır. Nihai film kalınlığı, döndürme hızının karekökünün eksi birinci kuvveti ile değişir. Kabaca sıvı fotoduyarlı viskozitesi ile orantılıdır.

Kaplamadan sonra, sonuçtaki fotoduyarlı film kütlece % 20 ila 40 oranında çözücü içerecektir. Uygulama sonrası fırınlama işlemi, hafif pişirme veya ön-pişirme olarak da adlandırılır, bu aşırı çözücüyü kaldırarak spin kaplamadan sonra fotoduyarlının kurutulmasını sağlamaktadır. Çözücü içeriğini azaltmanın ana nedeni, fotoduyarlı filmi kararlı hale getirmektir. Oda sıcaklığında, pişirilmemiş bir fotoduyarlı film buharlaşarak çözücüyü kaybeder, böylece zamanla filmin özellikleri değişir. fotoduyarlının pişirilmesiyle çözücünün çoğu uzaklaştırılır ve film oda sıcaklığında kararlı hale gelir. Çözücüyü fotoduyarlı bir filmde çıkarmanın dört ana etkisi vardır: (1) film kalınlığı azaltılır, (2) maruz kalma sonrası fırın ve geliştirme özellikleri değiştirilir, (3) yapışma iyileştirilir ve (4) film daha az yapışkan hale gelir ve böylece parçacık kirliliğine karşı

daha az hassastır. Tipik pişirme işlemleri, fotoduyarlı filmde % 3 - 8 arasında artık çözücü bırakır [71], bu da filmi sonraki litografik işleme sırasında sabit tutmak için yeterince küçüktür. Çoğu fotoduyarlı için pişirmenin başka sonuçları da vardır. Yaklaşık 70 °C'den yüksek sıcaklıklarda, fotoaktif bileşik (PAC) adı verilen tipik bir direnç karışımının ışığa duyarlı bileşeni parçalanmaya başladığı bilinmektedir [74]. Aynı zamanda, direncin bir başka bileşeni olan reçine, yüksek sıcaklıklarda çapraz bağlanabilir ve/veya oksitlenebilir. Bu etkilerin ikisi de istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, çözücü buharlaşmasının faydalarını en üst seviyeye çıkaracak ve dirençli ayrışmanın zararlarını en aza indirecek optimum ön pişirme koşullarını araştırmak gerekir. Kimyasal olarak kuvvetlendirilmiş duyarlılar için, artık çözücü miktarı uygulama sonrası fırınlama işlemi üzerinde dikkatli bir kontrol gerektiren durumdur. Bu durum Pozlama/maruz bırakma sonrası fırınlama sırasında filmin difüzyon ve reaksiyon özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Fotoduyarlı filmleri pişirmek için kullanılabilecek birkaç yöntem vardır. En belirgin yöntem fırın pişirmesidir. Geleneksel fotoduyarlıların 90 °C'de 30 dakika boyunca fırınlanması yeterli olmakla birlikte günümüzde gelişen fotoduyarlı malzemeler için bu süre ve sıcaklıklar değişkendir [76]. Her ne kadar fotoduyarlıların ön pişirimi için konveksiyon fırınlarının kullanımı bir zamanlar oldukça yaygın olsa da, şu anda en popüler pişirme yöntemi sıcak plakadır [76,77]. Alttaş sıcak ve yüksek kütleli bir metal plakaya yerleştirilir veya yakın bir kontak mesafesine (proximity gap) getirilir. Bu yöntemin en büyük avantajı, konveksiyon fırınlarına göre gerekli fırınlama süresindeki düşüştür. Yaklaşık bir dakikaya kadar düşen sürelerde ön pişirme işlemi tamamlanabilir. Alttaş ocaktan alındığında sıcak olduğu sürece pişirme devam eder ve soğuduktan sonra litografik maruziyete hazır hale gelir.

Bir fotoduyarlıının çalışmasının arkasındaki temel ilke, bir geliştiricideki (tab sıvısı) fotoduyarlı malzemenin çözünürlüğündeki ışığa (veya başka maruz bırakan radyasyon türlerine) maruz kaldığında meydana gelen değişiklidir. Standart diazonaftokinon (diazonaphthoquinone) pozitif fotoduyarlı durumunda, sulu baz geliştirici içinde çözünür olmayan fotoaktif bileşik (PAC), 350 - 450 nm aralığında UV ışığına maruz kaldığında bir karboksilik aside dönüştürülür. Karboksilik asit ürünü bazik geliştirici içinde çok çözünür. Bu nedenle fotoduyarlıda meydana gelen ışık enerjisindeki uzamsal bir değişiklik, fotoduyarlı malzeme ile elde edilen çözünürlük değerlerinde uzamsal bir değişikliğe neden olacaktır. Fotoduyarlı malzemelerde istenmeyen alanların da ışığa

maruz kalması, maruziyet bölgesinde kimyasal değişikliğe sebep olur. Bu durumda minimum yapı boyutlarında genişlemeler gözlenerek çözünürlük değerinin düşmesi söz konusu olur.

Litografi tekniği kendi içinde birçok farklı baskı yöntemi barındırır. Bu teknikler temelde üçe ayrılır. Bu teknikler,

- Kontak Baskı (Contact Printing)
- Yakın Baskı (Proximity Printing)
- İzdüşüm Baskı (Projection Printing) teknikleridir. Tekniklerin ayrımı

deseni barındıran fotomaskenin konumundan gelir. İlk olarak kontak baskı yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde fotomaske doğrudan fotoduyarlı malzeme üzerine yerleştirilir ve pozlanır. Bu yöntemin avantajı yüksek çözünürlükte baskıya izin vermesidir. Öte yandan bu özelliğinin aksine fotoduyarlı malzeme ile temasta olması sebebiyle maskede oluşan baskı görüntü kalitesini ve fotomaske ömrünü kısaltmaktadır. Tekniğin şematik gösterimi Şekil 4.3'te verilmektedir.

Diğer teknik yakın baskı tekniğidir. Bu teknikte maske fotoduyarlı malzemenin kaplanmış olduğu alttaşa yaklaşık olarak 10-25 μm kadar yaklaştırılmaktadır. Bu mesafeye yakınlık aralığı (proximity gap) adı verilir. Bu teknikte kontak baskıdaki fotomaske zararı söz konusu olamamakla birlikte gölgelenme ve çözünürlük kaybı düşüktür. Kontak baskıya göre 2-4 μm 'lik bir çözünürlük kaybına kadar kayıplar yaşanabilmektedir [71]. İz düşümü litografisi, ismini maskenin bir görüntüsünün alttaşa yansıtılması gerçeğinden alır. Projeksiyon litografisi, 1970'lerin ortalarında bilgisayar destekli mercek tasarımı ve geliştirilmiş optik malzemelerin ortaya çıkmasıyla yarıiletken endüstrisinin gereksinimlerini karşılamak ortaya çıkan bir tekniktir [71]. İki ana izdüşüm litografi aracı sınıfı vardır, tarama (scanner) ve adım adım tekrarlama (stepper) sistemleri. Adım adım tekrarlama sistemleri bir kerede alttaşa bir dikdörtgen bölümü, görüntü alanı, birebir veya daha küçük ölçeklerde aktarabilmektedirler. Bu sistemler kırılma optiğini, yani mercekleri, kullanır ve genellikle yarı monokromatiktirler. Tarayıcılar ilk olarak 45 μm altındaki geometrileri 1970'li yıllarda aktarmaya başlamışlardır. Öte yandan 1980'li yılların başında adım adım tarayıcılar 2 μm sınırını aşmışlardır. Adım adım tarayıcılar, 1990'lı yıllarda minimum yapı boyutları 250 nm seviyelerine ulaştığında litografik işlerinin sınırını belirlemeye devam ettiler

[74]. Günümüzde bas ve tara sistemler olarak bilinen ve adım adım tarama ve tarama işlemlerinin hibriti olan sistemler litografide sıklıkla ticari olarak kullanılmaktadırlar. Yeterli kontrolle basılabilen en küçük özellik olan çözünürlük, iki temel sınırlamaya sahiptir: alttaş üzerine yansıtılabilen en küçük görüntü ve fotoduyarlı malzemenin bu görüntüden faydalanabilme yeteneği. Projeksiyon görüntüleme tarafından çözünürlük, görüntüleme ışığının dalga boyu (λ) ve izdüşüm merceğinin Rayleigh kriterine göre sayısal açıklığı (NA) ile belirlenir. Rayleigh çözünürlük eşitliği,

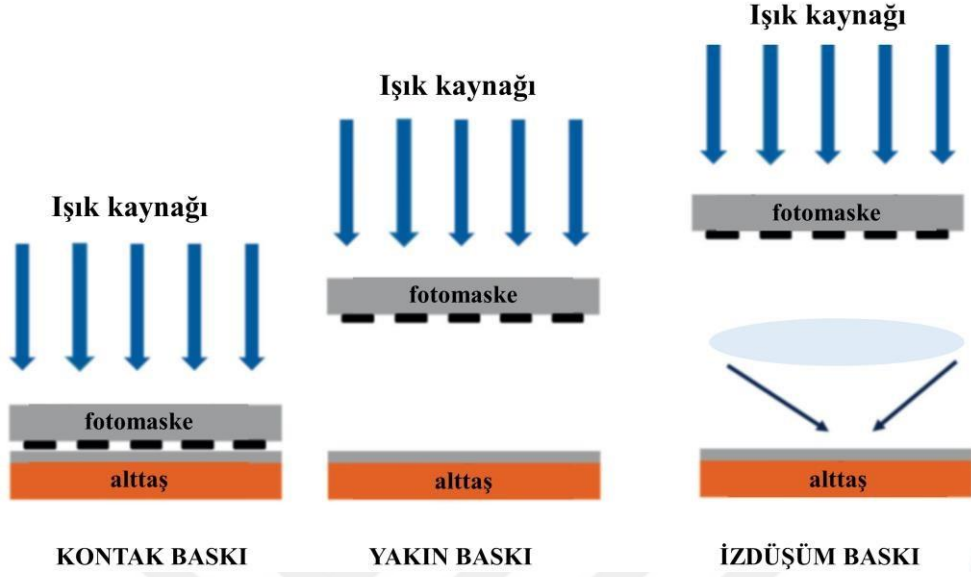
$$R \propto \frac{\lambda}{NA} \quad 4.1$$

İle verilmektedir. (Bkz. NA Bölüm 2.1.2.) Litografi sistemleri mavi dalga boylarından (436 nm) UV (365 nm) 'den derin UV'ye (248 nm), ve bugünün sık kullanılan dalgaboyu olan 193 nm dalgaboyuna ilerlemiştir [78]. Bu arada, izdüşüm aleti sayısal açıklıkları, ilk tarayıcılar için 0.16'dan başlayarak günümüzde oldukça yüksek olan 0.93 NA sistemlerine yükseldi. günümüzde 100 nm'nin altında boyutlarda litografi işlemleri başarıyla gerçekleştirilebilmektedir [71], [72]. Tez kapsamında kullanılan litografi tekniği maskesiz yazıcı tekniğidir. Bu teknik başlarda izdüşümü tekniği gibi algılansa da maskenin olmayışı bu tekniği başka bir teknik olarak sınıflandırmaya yetmektedir.

Maskesiz yazıcı tekniği detayları ile birlikte Bölüm 4.2.7.'de anlatılacaktır.

Kullanılan tekniklerdeki oluşan önemli bir hata mekanizması duran dalga etkisidir. Monokromatik ışık, bir alttaş üzerine yansıtıldığında, fotoduyarlı yüzeyine, çeşitli düzlemlerde vurur ve düzlem dalgalarına yaklaşır. Bu ışık fotoduyarlı malzeme boyunca aşağı doğru hareket eder ve eğer alt tabaka yansıtıcı ise, tekrar fotoduyarlı malzemeye yansır. Gelen ve yansıyan ışık, fotoduyarlı malzemede farklı derinliklerde yüksek ve düşük ışık yoğunluğunun sabit bir dalga desenini oluşturmaya müdahale eder. Bu desen fotoduyarlı malzemede çoğaltılır, bu çoğaltma fotoduyarlı malzemenin yan duvarlarında çıkıntılara neden olur. Desen boyutları küçüldükçe, bu çıkıntılar desenin kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Daimi dalgalara neden olan girişim aynı zamanda dönüş eğrileri adı verilen bir olguya, değişen kalınlıkta değişen hat genişliği boyunca sinüzoidal değişime neden olur. Bu zararlı etkiler, alttaşın yansımayı azaltabilecek alt yansıma önleyici kaplama (BARC- bottom antireflective coating) adı verilen ince bir soğurma katmanı ile

kaplanmasıyla iyileştirilebilir [71]. Şekil 4.3'te geleneksel tekniklerin yer aldığı geometrik gösterim verilmiştir.



Şekil 4.3 Kontak baskı, yakın baskı ve izdüşüm baskı teknikleri şematik gösterimi.

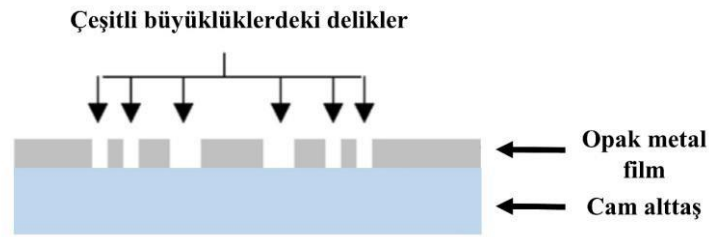
Pozlama işleminden sonra, fotoduyarlı malzeme tab edilmelidir. En yaygın kullanılan fotoduyarlı malzemeler, geliştiriciler/tab sıvısı olarak sulu bazları kullanır. Özellikle, tetrametil amonyum hidroksit (TMAH), 0.2 - 0.26N derişimlerde kullanılır. Tab etme fotoduyarlı işlemdeki en kritik adımlardan biridir. fotoduyarlı-geliştirici etkileşimlerinin özellikleri büyük ölçüde fotoduyarlı profilinin şeklini ve daha da önemlisi, çizgi genişliği kontrolünü belirler. Geliştiriciyi fotoduyarlıya uygulama yöntemi, gelişim düzgünlüğünü ve işlem sürekliliğini kontrol etmede önemlidir. Literatürde birden fazla geliştirme tekniği mevcuttur, bunlar bazıları püskürtme, daldırma ve damlatma yöntemleridir [74].

Desenlendirme için gerekli işlem, ince film kaplama veya aşındırma gibi, yapıldıktan sonra kalan fotoduyarlı çıkarılmalıdır. İki sıyırma tekniği sınıfı vardır: organik veya inorganik çözeltiler kullanarak ıslak sıyırma ve kuru (plazma) sıyırma. Organik bir çözücünün (stripper) basit bir örneği asetondur. Yaygın olarak laboratuvar ortamlarında kullanılmasına rağmen, aseton alttaş üzerinde kalıntı bırakma eğilimindedir [79] (scumming). Bu nedenle yarıiletken işleme için kabul edilemezdir. Çoğu ticari organik sıyırıcı fenol bazlı olup, kalıntı oluşumunu engellemede daha iyidir. Bununla birlikte,

pozitif fotoduyarlılar için en yaygın ıslak sıyırıcılar, yüksek sıcaklıklarda kullanılan sıyırıcılar olan inorganik bazlı asit sıyırıcılardır. Islak soyma, çeşitli doğal problemlere sahiptir. Her ne kadar çeşitli uygulamalar için uygun sıyırıcı seçimi genellikle kaba temizliği yapabilse de, son fotoduyarlı tabakasını alttaştan ıslak kimyasal yollarla çıkarmak neredeyse imkansızdır. Dirençli tortuları alttaştan tamamen temizlemek için bir plazma temizliği gereklidir. Ayrıca, geniş sertleşme (örneğin derin UV sertleşmesi) geçirmiş ve sert işlem koşullarına (örneğin, yüksek enerjili iyon implantasyonu) maruz kalan fotoduyarlının kimyasal olarak sıyırılması neredeyse imkansız olabilir. Bu nedenlerden dolayı, plazma sıyırma yarıiletken işlemede standart haline gelmiştir. Bir oksijen plazması organik polimerlere karşı oldukça reaktiftir ancak çoğu inorganik materyali etkilemez. Kullanılan duyarlı malzemeye göre sıyırma teknikleri iyi seçilmeli ve optimize edilmelidir.

4.2. Üretim Gelişimi

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi foton elekleri Fresnel bölgelerine yerleştirilmiş birçok delikten oluşur. Kullanılan dalgaboyunda geçirgen olan bir alttaş üzerine oluşturulan delikler haricinde kalan tüm alanlar opak olmalıdır. Işık açık delik alanlarından geçtikten sonra oluşan kırınım foton eleklerinin görüntü oluşturmalarını sağlamaktadır. Basit bir foton eleğinin şematik görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 Basit bir foton eleği yapısal görünümü.

Foton eleğini üretmek için, geometrik desenleri yazılımdan veya maskelerden alttaş üzerindeki metal filme aktarmak için litografik teknikler kullanılmıştır. Işık/parçacık kaynağı türüne bağlı olarak, litografi üç kategoriye ayrılabilir: optik, x-ışını ve elektronlar / iyon demeti. Optik litografi yarıiletken endüstrisinde yaygın olarak kullanılmasına

rağmen, çözünürlük gereksinimleri mikron altı seviyelere geçtiğinde üretim sınırına ulaşır. Elektron ve iyon ışınları, yüksek enerjilere sahiptir ve bu nedenle, derin ultraviyole veya ultraviyole (UV) ışığı ile karşılaştırıldığında daha iyi çözünürlük veren son derece küçük yapı çözünürlükleri sunarlar. Daha iyi çözünürlüğe ek olarak, elektron ve iyon ışınları herhangi bir maske olmadan doğrudan fotoduyarlıya desenler üretmek için odaklanabilir [80]. Bu çalışmada kullanılan foton elek tasarımlarının minimum özellik boyutu mikrometre aralığında olduğundan optik litografi diğer bir adıyla fotolitografi tekniği kullanılmıştır. Kullanılan teknik fotolitografi tekniğinde desenlerin tıpkı elektron demetindeki maske kullanmadan yazılabilmesi için maskesiz yazıcı desenlendirme tekniği kullanılmıştır. İlerleyen bölümlerde, her işlem adımında karşılaşılan sorunlar ve detaylı çözüm mekanizmaları gösterilmektedir. Üretim ve yapısal analiz dahil olmak üzere bazı tekniklerin arka plan bilgisi de ayrıca bu bölümlerde tanıtılmıştır.

Foton eleklerini üretmek için temel iki alt yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler düşürme (Lift Off) ve ıslak kimyasal ıslak aşındırma (Wet Chemical Etching) yöntemidir. Her iki yöntem için de hemen hemen tüm adımlar aynı olmak üzere işlem sırasında farklılık vardır. İşlem sırası Şekil 4.5'te akış şemasında gösterilmektedir.

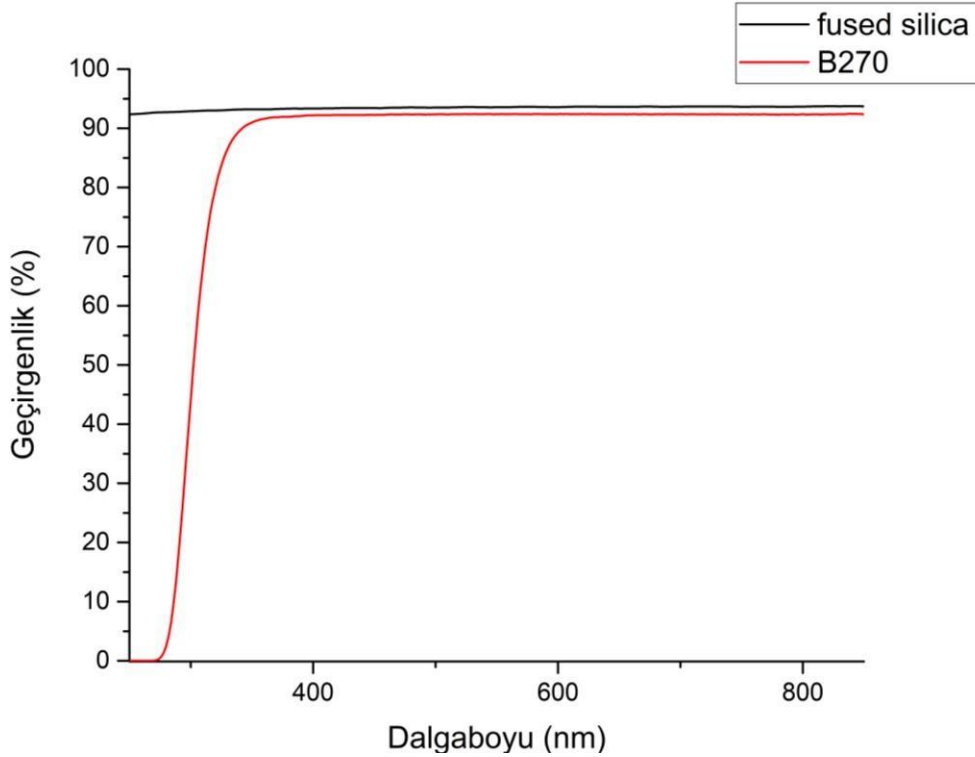


Şekil 4.5'te Foton eleği üretim süreci düşürme ve ıslak kimyasal aşındırma yöntemleri işlem akış şeması.

Şekil 4.5’da verilen akış şemasında işlemlerin sırası görülmektedir. Bu işlemler her yöntem için farklı önceliklerde yapılsa da yapılan işlemlerdeki prosedürler aynı kalmaktadır. İki teknik arasındaki işlemlerdeki tek fark kimyasal aşındırma ve düşürme işlemleridir. Bu işlemler haricindeki tüm işlemler her iki foton eleği üretim tekniğinde ortaktır. Yapılan tüm işlemler detaylı bir şekilde, 4.2.1.’den 4.3’e kadar olan bölümlerde anlatılmıştır.

4.2.1. Alttaş Hazırlığı

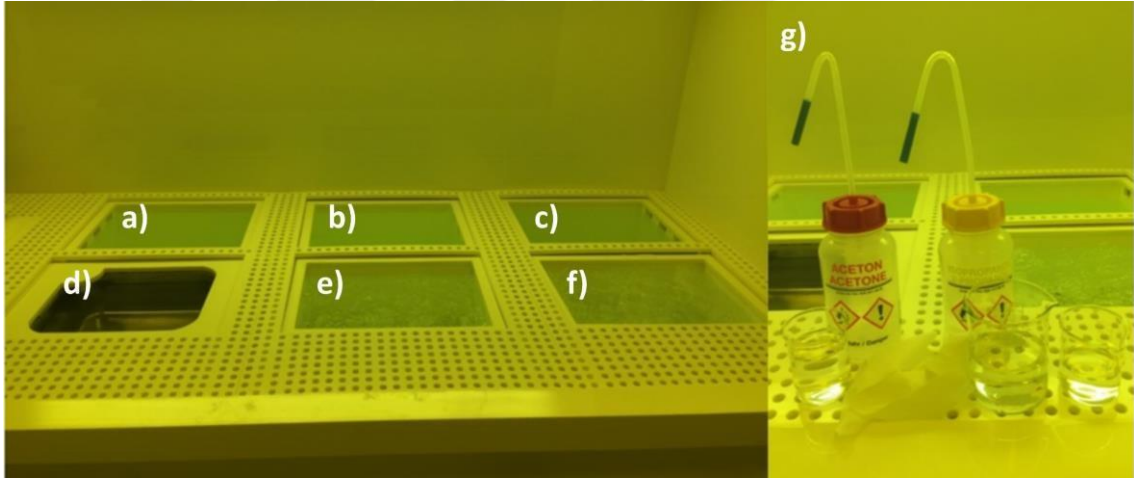
Tez genelinde iki tip alttaş malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemeler her ikisi de 25.4 mm dairesel çapta ve 1mm kalınlığındaki B270 test camı ve fused silika’dır. Bu camların kullanılma sebebi her iki camın da istenilen dalgaboyu bölgesinde yüksek geçirme oranına sahip olmasıdır. B270 test camının ve fused silika’nın geçirgenlik grafikleri Şekil 4.6’da verilmektedir.



Şekil 4.6 Fused silika ve B270 alttaşlarının geçirgenlik grafiği

Litografi işleminde kullanılan tüm camlara aynı temizlik prosedürleri uygulanmıştır. Bu prosedürler sırasıyla, ultrasonik yıkama, deterjanlı temizlik, durulama, azotlu su tankında

durulama ve kurutma işlemleridir. Bu temizlik işlemlerinden sonra camlar aseton ve alkol temizliğine alınıp daha sonra da tavlanmak üzere sıcak tablaya yerleştirilirler. Her adımda cam alttaşlar teker teker temizlik prosedüründen geçmektedir. İlk adım ultrasonik yıkamadır. Alttaş hazırlığı için kullanılan tüm prosedürlerde ultra saf su ($\Omega=18.2$ Mohm) kullanılmaktadır. İlk işlem, oda sıcaklığındaki ultrasonik titreştirme ile camların mekanik kalıntılardan kurtulmasıdır. Bu işlem birkaç dakika boyunca devam eder. İkinci işlem taşmalı banyolar yardımıyla deterjanlı su ile camların temizlenmesidir. Bu işlemden sonra camlar taşmalı banyolar yardımıyla sürekli yenilenen temiz ultra saf su ile durulanır. Durulama işleminden sonra yüzeyde kalan artık maddelerin uzaklaştırılması için azotla beslenen iki tanka arka arkaya her bir daldırma birkaç dakika sürecek şekilde daldırılır. Bu sistemlerde saf su sürekli saf azotla beslenerek camların hava kabarcıkları ile durulanması sağlanır. İşlem bitiminde alttaş saf azot ile kurutulur. Yapılan işlemlerin gerçekleştirildiği banyolar Şekil 4.7’de verilmektedir.



Şekil 4.7 Üretim süreci alttaş hazırlık istasyonu a) taşmalı banyo 1 b) taşmalı banyo 2 c) taşmalı banyo 3 d) ultrasonik banyo e) azotlu banyo 1 f) azotlu banyo 2 g) alttaş temizlik malzemeleri (aseton ve isopropil alkol).

Yapılan bu işlemlerden sonra alttaşların bir kısmı ince film kaplama işlemine giderken bir kısmı ise fotoduyarlı malzeme kaplama işlemine gitmektedir. Her iki işlemden önce hem camların organik kalıntılardan hem de çeşitli izlerden kurtulması için bir set temizlik prosedürü daha uygulanmaktadır. İkincil temizlik olarak uygulanan bu temizlik daha önceden kalan fotoduyarlı malzeme kalıntılarını temizlemek oldukça önemli bir yöntemdir. Bu yöntemde ilk olarak alttaşlar aseton ile silinerek temizlenir. Aseton

temizliğinden sonra isopropil alkol (IPA) ile tekrar silinen camlardaki tortu ve iz gibi kalıntılar temizlenerek fotoduyarlı malzeme ve ince film kaplama işlemleri için hazır hale getirilmektedir. Bu tip ikincil temizliğin yapılmadığı durumlarda yeni katman olarak kaplanan ince film ve fotoduyarlı malzemenin cama yapışma durumunda istenmeyen etkiler ortaya çıkmaktadır. Özellikle küçük boyutlara sahip yapılarda filmlerin cama yapışması oldukça önemli bir durumdur.

4.2.2. Ön ısıtma ve ısıtma işlemleri

Yapılan üretimler kapsamında birkaç tür ısıtma işlemi kullanılmaktadır. Bu işlemler litografi ve ince film kaplama öncesi susuzlaştırma (dehidrasyon) ısıtması veya tavlama, fotoduyarlı malzeme kaplama sonrası ön ısıtma ve fotoduyarlı desenlendirme sonrası ısıtma işlemleri olarak üç ana başlık altında incelenebilir. Bu ısıtmaların hepsi bu çalışmada sıcak tabla ile yapılmıştır.

İlk ısıtma işlemi susuzlaştırma işlemidir ve sonraki adımlarda kaplanan filmlerin alttaşa tutunması için oldukça önemli bir adımdır. Bu işlemin detaylı bir anlatımı Bölüm 4.1.2.'de verilmektedir. Tez kapsamında yapılan susuzlaştırma işlemi 250 °C'de 30 dak. olarak yapılmıştır. Altaşların soğutulması kontrollü bir şekilde yine sıcak tabla üzerinde yapılmıştır. Susuzlaştırma işleminden sonra kaplama sırasını bekleyecek olan camlar kuru bir azot dolabında bekletilmişlerdir. Şekil 4.12'te ısıtma işlemlerinde kullanılan sıcak tablanın görüntüsü verilmektedir. Bu sıcak tabla bir dönel kapla sistemi (BREWER SCIENCE spin coating system with integrated hot plate) ile bütünleşik çalışmaktadır ve hem kontak hem de yakın mesafe (proximity) tavlama işlemleri için uygundur. Yapılan tüm çalışmalarda kontak ısıtma işlemi uygulanmıştır. İkinci ısıtma işlemi fotoduyarlı malzemeye yapılan ön ısıtma işlemidir. Bu işlemler kullanılan fotoduyarlı malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Kullanılan fotoduyarlı malzemeler ve özellikleri Bölüm 4.2.5.'te verilmektedir. Kullanılan her iki teknikte de ön ısıtma işlemi fotoduyarlı malzeme kaplandıktan sonra yapılmaktadır. Foton eleği üretimi sırasında kullanılan negatif fotoduyarlı malzeme, nLOF 2020 [76,77], 110 °C 60 s/ μ m ve pozitif fotoduyarlı malzeme, AZ1518 [81], 100 °C'de 50 s ön ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu değerler her bir fotoduyarlı malzemenin teknik bilgi kitapçığında sağlanan değer aralığının

içindedir. Yapılan ısıtma işlemlerinin sonuncusu son tavlama işlemi ya da diğer adıyla ısıtma işlemidir. Bu işlem opsiyonel olarak uygulanmaktadır ve kullanılan her türlü fotoduyarlı malzeme için kullanılması gerekmemektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda sadece negatif fotoduyarlı malzeme, nLOF2020, için bu tür tavlama işlemi kullanılmıştır. Kullanılan ısıtma sıcaklığı 110 °C'de 60 s'dir. Çalışma kapsamında yapılan kaplama işlemlerinden sonra yapılan tavlama parametreleri Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1 Üretim çalışmalarında kullanılan fotoduyarlı malzemeler ve kaplama işlemi parametreleri.

Parametreler	Değerler
nLOF 2020	
Dönüş hızı	6000 RPM
Hızlanma	1000 RPM
Ön ısıtma sıcaklığı, süresi	110 °C, 60 s
Isıtma sıcaklığı, süresi	110 °C, 60 s
Tab etme süresi	50 s
Geliştirme çözeltisi (tab etme)	AZ MIF 726
Silme çözeltisi	AZ 100 Remover
AZ 1518	
Dönüş hızı	6000 RPM
Hızlanma	1000 RPM
Ön ısıtma sıcaklığı, süresi	100 °C, 50 s
Isıtma sıcaklığı, süresi	Isıtma yok
Tab etme süresi	50 s
Geliştirme çözeltisi (tab etme)	AZ 400 K
Silme çözeltisi	AZ 100 Remover
Aşındırma çözeltisi	HNO ₃ :H ₂ O
İnce Film Kaplama	

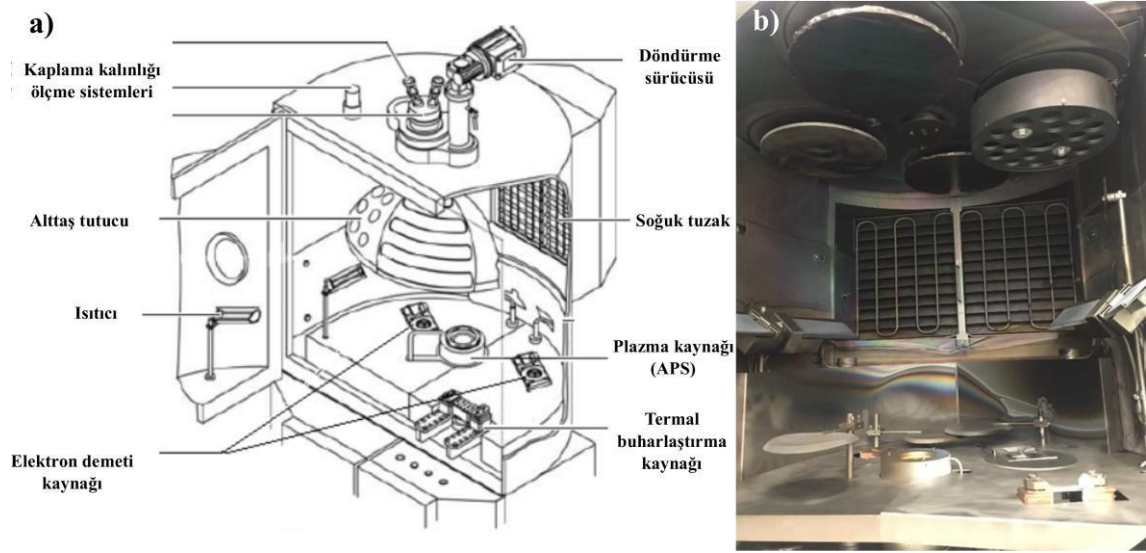
Kaplama türü	PVD, e-demet kaplama
Malzeme, kalınlık	Ni/Ag, 3/150 nm
Kaplama sıcaklığı	50 °C

4.2.3. İnce Film Kaplama

Foton eleği üretim işlemlerinde kullanılan ince film kaplama tekniği fiziksel buhar biriktirme tekniğidir (PVD). Yapılan çalışmalarda ince film kaplamanın alt tekniklerinden biri olan elektron demeti buharlaştırma kullanılmıştır [82]. Foton eleği üretimindeki katmanlar nikel (Ni) ve gümüş (Ag) katmanlarıdır. Gümüş katmanı ile alttaş (B270) arasına kaplanan ince bir nikel tabakası ile gümüşün cama daha iyi yapışması sağlanmaktadır. Sırasıyla malzeme kalınlıkları Ni ve Ag için 3 ve 150nm'dir.

Foton eleği üretim çalışmalarında kullanılan ince film kaplama sistemi Leybold Syruspro 1110'dur. Kaplama sistemi temel olarak bir vakum ünitesi, bir soğutma sistemi (Meissner tuzağına sahip polycold tipi kriyo (cryo) üretici, su akış birimleri (soğuk ve ılık su sirkülasyonu) ve bir vakum odasını (230x137x230 cm) içermektedir. Yüksek kaliteli kaplamalar elde etmek için, vakum ortamı önemlidir. Bu kadar büyük bir odada yüksek vakum elde etmek için birden fazla pompalı bir vakum sistemi gereklidir. Kaplama sistemindeki vakum sistemi, vakum pompalarını dönel kanatlı pompa (rotary vane pump), kök pompası (root pump) ve difüzyon pompasıdır (diffusion pump). Vakum ölçüm ekipmanlarını, vakum vanalarını ve flanjlara veya borular gibi diğer vakum elemanlarını içerir. Dönel kanatlı pompa ve kök pompa, yüksek vakum pompası için ön vakum oluşturmak için kullanılır. Bu sistemde, yağ difüzyon pompası yüksek vakum pompası olarak kullanılır ve odanın basıncının vakum öncesi seviyeden yüksek vakum seviyesine gelmesini sağlar. Yağ difüzyon pompasının içinde, yağ düşük buhar basıncı ile kaynama noktasına kadar ısıtılır ve dairesel metal deflektörler yağ buharı jetleri oluşturur. Bu jetler gaz moleküllerini doğru iter ve toplanan gaz molekülleri dışarı pompalanır. Soğutma ünitesi (Meissner tuzağı), oda basıncını düşürmede etkili rol oynamaktadır. Bu ünite vakum odasının içinde soğuk bir yüzeyden (panel) ve harici bir buzdolabından (Polycold) oluşur. İç kriyo paneli doğrudan Polycold'a bağlanır. Sistem kapalı bir halkadır ve çalışma prensibi suyun soğuk bir yüzeyde yoğunlaşmasına bağlıdır. Soğuk tuzak, odadaki su buharını tutarak pompalama süresini kısaltır. Sistem temiz olduğu durumda taban basınç

seviyesi olarak 2×10^{-7} mbar değerine ulaşmaktadır. Kaplama sistemi iki su akış ünitesine sahiptir; Bunlardan biri soğuk su ünitesi (soğutucu), diğeri ılık su ünitesidir. İşlem sırasında, bileşenlerde oluşan ısı oluşumunu gidermek için soğuk su işlemi gerçekleştirilir. Böylece, bileşenlerin ısıdan etkilenmemesi ve düzgün çalışmaya devam etmesi sağlanır. Ilık su işletimi işlemin sonunda havalandırmadan önce etkinleştirilir. Bileşenler ılık su ile ısıtılır ve oda atmosferik koşullar altında olduğunda sıcak tutulur. Bu şekilde, bileşenler yüzeyindeki su yoğunlaşması azaltılır ve bu sayede bir sonraki işlem için pompalama süresi kısalır. Kullanılan vakum sistemi elemanlarının basit bir görüntüsü Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 a) İnce film kaplama sistem donanımları şematik görüntüsü b) Leybold Syruspro 1110 vakum odası.

Vakum odası temel olarak iki e-demet kaynağına, bir termal buharlaştırma kaynağına, plazma kaynağına (APS, Advance Plasma System), ısıtıcılara, altta tutucularına, kalınlık ölçüm sistemlerine ve kaplama koruma panjurlarına sahiptir. Alttaşlar, bir döndürme sistemine bağlı alttaş tutucularına monte edilir. Dönme hareketi ile sistem içinde dolaşabilen tutucular tüm yüzeylerin düzgün bir şekilde kaplanmasını sağlar. Ayrıca, kaplamayı homojen hale getirmek için, alttaş tutucuların önünde dağıtım panjurları (maskeler) kullanılabilir. Malzemeler dirençli ısıtma veya e-demet ile buharlaştırılabilir. Sistemde termal buharlaştırma ünitesi, tekne şeklinde elektriksel olarak iletken bir konteynere sahiptir. Dirençli bir şekilde ısıtıldığında, kabın içindeki malzeme

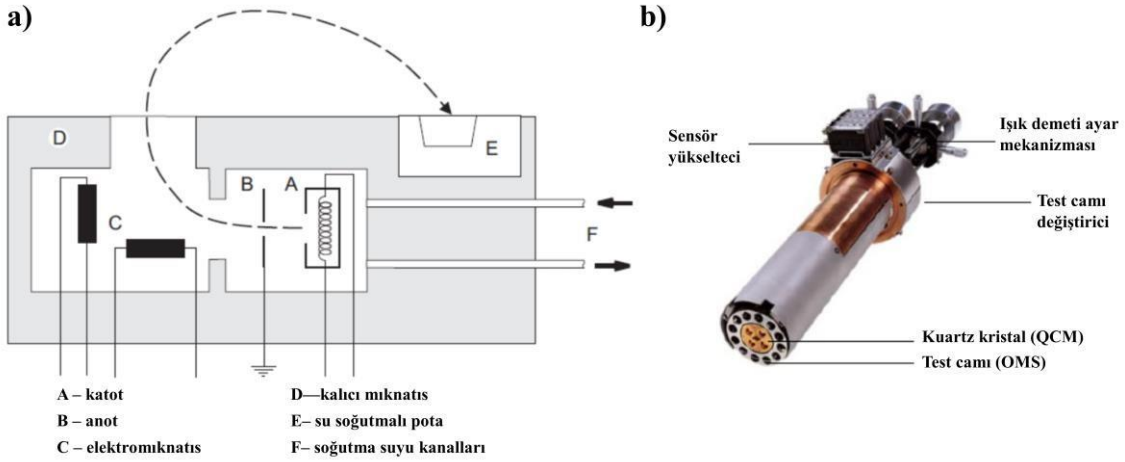
buharlaştırılır. Foton eleği üretiminde bu yöntem yerine elektron demeti buharlaştırma tercih edilmiştir. Gümüş için malzeme kaybı ve homojenite bakımından elektron demeti buharlaştırma daha iyi bir seçenektir.

Vakum odasında, iki e-ışın kaynağı ve iki pota vardır. İlk potada, yalnızca bir tür malzeme içerebilen bir cep, diğerinde farklı tipte kaplama malzemelerinin yerleştirilebileceği altı cep bulunmaktadır. Her iki pota da dönebilmekte ve suyla soğutulmaktadır. Vakum odasında buharlaşma kaynaklarının (potalar ve termal buharlaşma kabı) dışında plazma kaynağı da vardır. Tüm kaynakları için 4 adet koruma panjuru vardır. Buharlaştıran malzemeyi veya plazmayı bloke etmek veya engelini kaldırmak için bu panjurlar kullanılırlar. Buharlaşma kaynağının üstündeki panjur, muntazam birikme oranı elde edilinceye kadar kapatılabilir. Biriktirme süresi dolduğunda, panjur fazlalık malzemenin hızlı bir şekilde bloke edilmesini sağlar. Genellikle, işlem başlamadan önce alttaşların ısıtılması gerekmektedir. Bu kaplama sisteminde alttaşları ısıtmak ve sistemi sabit sıcaklıkta tutmak için hazne duvarlarına ve hazne kapısına üç ısıtma devresi monte edilmiştir. Her ısıtma devresinde, her biri 2.6 kW olan bir çift seramik ısıtıcı bulunur.

Odaklanmış yüksek enerjili elektron demetleri, düşük buhar basınçlı metaller, refrakter metaller (tantalum, tungsten, vb.) ve alaşımlar dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelerin buharlaştırılması için kullanılabilir. E-demet buharlaşması ile çok küçük bir alanda büyük miktarda ısı toplandığından yüksek birikim hızına ulaşılabilir [83]. Bir e-ışın buharlaştırma birimi esas olarak bir elektron demet kaynağından, sabit bir mıknatıstan, bir elektromıknatıstan ve bir cep ya da cepli bir potadan oluşur. Bu kaplama sisteminde kullanılan e-demeti buharlaşma kaynağının yapısı Şekil 4.9a'da verilmektedir. Serbest elektronlar oluşturmak için, ışın tabancasının içindeki filaman AC akım ile ısıtılır. Filaman yeterince ısındığında serbest elektron yaymaya başlar ve böylece filaman yakınında bir elektron bulutu meydana gelir. Bu elektronları hızlandırmak için, filamana (katot) negatif voltaj ve ortada bir delik olan metal bir plakaya pozitif voltaj (Şekil 4.9a'de B olarak gösterilen anot) uygulanarak bir elektrik alanı oluşturulur. Oluşturulan elektrik alanı elektronları katottan anoda hızlandırır. Anot bu elektronların bazılarını durdurur, ancak bir kısmı anodun ortasındaki delikten geçebilir ve böylece bir serbest elektron demeti üretilir. Ardından, e-demet cebindeki kaplama malzemesine doğru Şekil 4.9a'da D olarak gösterilen kalıcı manyetik elemanın oluşturduğu statik manyetik alan ile

yönlendirilir. Şekil 4.9a'da C olarak gösterilen elektromıknatıs, birbirlerine dik açılarda yerleştirilmiş iki bobinden oluşur. Bu elektromıknatıs değişken bir manyetik alan yaratarak e-demetin hedef yüzey üzerindeki hareketini sağlar. Manyetik alan, bobin akımlarının düzenlenmesi ile değiştirilebilir. e-demeti hedef yüzeye çarptığında, ışının kinetik enerjisi malzemeyi buharlaştıran ısıya (termal enerji) dönüştür. Daha sonra buharlaştırılan malzeme, alttaş yüzeyinde ince bir film halinde biriktirilir. Buharlaşma hızı kaplamanın kalitesini etkiler ve e-demeti yoğunluğunu değiştirerek düzenlenebilir. Üretilen ısının yoğunluğu çok yüksek olduğundan potanın erimesini önlemek için su ile soğutulması gerekir. e-demeti buharlaştırma tekniğinde, kaplanmış filmlerin zayıf paketlenme yoğunluğu sorunu, yoğunlaşan parçacıkların düşük enerjisinden kaynaklanmaktadır. Film özelliklerini geliştirmek için daha yüksek parçacık enerjisine sahip işlemlere ihtiyaç vardır. İyon destekli biriktirme işleminde, gelen iyonlardan buharlaşan malzemelere momentum transferi gerçekleşir ve bu parçacıkların hareketliliği artar. Bu nedenle, daha yüksek paketlenme yoğunlukları ve daha iyi mekanik özellikler elde edilebilir. Plazma iyon destekli biriktirme, alttaş yüzeyleri üzerinde yüksek paketlenme yoğunluğu ve yüksek homojenliğe sahip kaplamalar üretmenin kullanışlı bir yoludur [84]. Üretim için kullanılan sistemde bir APS vardır, fakat üretim işleminde kullanılmadığı için detayları verilmeyecektir. Kaplama sisteminde bilinmesi gereken diğer bir özellik ince film kalınlığının ölçüm tekniğidir. Foton eleklerinde yeterli bir opaklığa ulaşılması gerekmektedir. İstenilen dalgaboyunda ışığın iletimini kesilmesi amacıyla belirli kalınlıklarda filmler üretilmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı kaplama kalınlığının saptanması önemlidir.

Kalınlığı ölçmek ve istenen kalınlığa ulaşıldığında kaplamayı durdurmak için kontrol mekanizması kalınlık ölçüm sistemleri ile gerçekleştirilir. Kaplama sisteminde, vakum odasının üstünde, iki ölçüm sistemini birleştiren bir ölçüm kafası vardır; kuvars kristali ölçümü (QCM) ve optik kaplama kalınlığı ölçümü (OMS). Şekil 4.9b'de Leybold Syruspro 1110'da ölçüm yapan kombine kalınlık belirleme sistemi gösterilmektedir.



Şekil 4.9 İnce film kaplama sistemi donanımları a) elektron demeti buharlaştırma kaynağı b) Kuartz kristal ve optik monitör kalınlık ölçüm sistemleri.

Kuvars kristalleri ile film kalınlığı ölçümü, alttaş ile aynı anda kaplanmış bir kristalin salınım frekansına bağlıdır. İlke, bir kuvars kristalinin yüzeyinde biriken malzemenin kütlesi arttıkça, kuvarsın titreşim sıklığının sürekli olarak azalmasıdır. Kalınlık salınım frekansındaki değişim ve kaplama malzemesinin fiziksel özellikleri (şiddet gibi) kullanılarak hesaplanır. Kuvars kristalleri, bir osilatör yardımıyla yüksek frekansta (6 MHz) salınır. Osilatör ve 4 kuvars kristali içeren (Bkz. Şekil 4.9b) ölçüm kafası vakum odasına yerleştirilmiştir.

Optik katman kalınlığı ölçüm birimi (OMS), kalınlığı, kaplamanın yansıması veya iletim ölçümüyle belirler. Ölçüm, ölçüm kafasına yerleştirilmiş bir test lamı üzerinde gerçekleştirilir. Test slayt tutucusu, test slaytını Şekil 4.9b'de gösterildiği gibi 12 ölçüm pozisyonuna böler. Test kaydırma değiştirici, işlem sırasında ölçüm konumunu değiştirir. Fiber optik üzerinden gelen ışık demeti bir ayar cihazı ile ayarlanabilir, böylece ışık ölçüm pozisyonunun ortasına odaklanır. Test kayma yüzeyinden yansıyan ışık alıcı optiğe gider. İşleyiş prensibi, kaplama kalınlığı arttıkça, yansıyan ışığın (tek renkli ışık) yoğunluğunun değişmesi gerçeğine dayanmaktadır. Kaplama sisteminin bu özellikleri kullanılarak üretilen ince filmler Bölüm 4.2.4'de verilmektedir.

4.2.4. Kaplanan İnce Filmler ve Özellikleri

Tüm foton eleklerinde aynı katmanlar kullanılarak üretim yapılmıştır. Bu katmanlar daha önce de verildiği üzere nikel ve gümüş katmanlarıdır. Nikel katmanı ince olduğu için optik olarak bir özelliğinden yararlanma söz konusu değildir. Bu ara katmanın kullanım sebebi gümüş tabakasının altta olan B270 test camına daha iyi yapışmasıdır. İkinci katman gümüş katmanıdır ve foton eleklerindeki opak katman olarak kullanılmaktadır. Tez çalışmaları sırasında alınan bir geçirgenlik spektrumu **Error! Reference source not found.**'da verilmektedir. Kaplanan filmlerde kullanılan kaplama parametreleri Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.2 Ni/Ag ince film kaplama parametreleri.

Katman	Nikel (Ni)	Gümüş (Ag)
Film Kalınlığı (nm±%3)	3	150
Kaplama Tekniği	e-demeti	e-demeti
Kalınlık Ölçüm Tekniği	QCM	QCM
Elektron Demeti Akımı (mA)	~130	~90
Sistem Basıncı (mbar)	<1x10 ⁻⁵	<1x10 ⁻⁵
Dönme Hızı (RPM)	20	20
Sistem Sıcaklığı (°C)	50	50
Kaplama Hızı (nm/s)	0.2	0.2
Yoğunluk (g/cm ³)	8.910	10.500

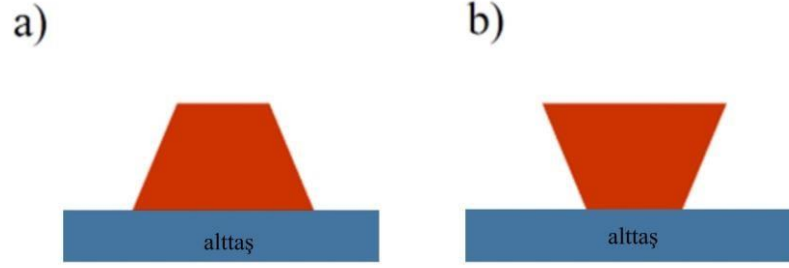
Z oranı	0.331	0.529
---------	-------	-------

Çizelge 4.2’de verilen parametreler kullanılarak üretilen ince filmler foton eleklerindeki hem geçirgenlik değerlerini sağlamakta hem de bu işlemlerin öncesindeki litografi işlemleri korunmaktadır.

4.2.5. Fotoduyarlı Malzemeler ve Fotoduyarlı Kaplama İşlemi

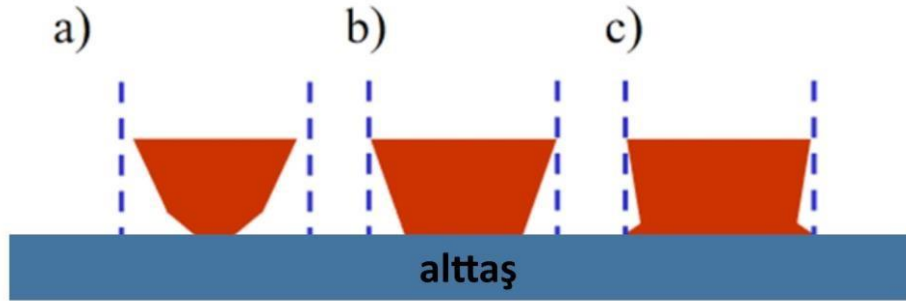
Bu tez kapsamında iki farklı fotoduyarlı malzeme aynı teknik ve farklı parametrelerle kaplanmıştır. Kaplama tekniği döner kaplama (spin coating) tekniğidir. Bu teknikle kaplanan fotoduyarlı malzemeler için literatürdeki birçok çalışma yanında malzemelerin teknik bilgi kitapçıları da kullanılmıştır [76,77,81,85].

Fotoduyarlılar genellikle iki sınıfa ayrılırlar. Bu sınıflar pozitif fotoduyarlı ve negatif fotoduyarlıdır. Aralarındaki temel fark ışık ile etkileşim sonrasında oluşan kimyasal etkidir. Negatif fotoduyarlı malzemede UV ışık ile pozlanan alandaki polimerler arasında çapraz bağlanmalar oluşur. Bu bağlanmanın olduğu alanlardaki malzeme çözücü tarafından çözünmez hale gelir. Öte yandan ışığa maruz kalmayan alanlar çözücüde çözünerek silinirler. Pozitif fotoduyarlı malzeme için ise bu durumun tersi geçerlidir. Işığa maruz kalan alanlardaki bölgeler uygun bir çözücüde çözünür hale gelirler. Geriye kalan pozlanmayan alanlar ise çözücüyle herhangi bir etkileşmeye girmemektedirler. Tipik fotolitografi özellikleri ölçeğinde, kırınım etkisi maske deseninde kenarlardan sonra şiddet profilini genişleten önemli bir rol oynar. Sonuç olarak, fotoduyarlının yüzeyi uzamsal olarak homojen bir doz almamış olur. Bu olay fotoduyarlının kenar profilini (yan duvar) etkiler. Pozitif bir fotoduyarlı pozitif eğimli bir yan duvar sergiler, çünkü bir desenin/yapının kenarı merkezden daha az enerjiye maruz kalır (Bkz. Şekil 4.10a). Aynısı negatif fotoduyarlı için de geçerlidir, sadece desen/yapı kenarındaki dozda düşme, alttan kesme olarak bilinen negatif eğimli bir yan duvarla sonuçlanır (Bkz. Şekil 4.10b). [86].



Şekil 4.10 a) Pozitif fotoduyarlıya ait pozitif eğimli duvar modeli b) negatif fotoduyarlıya ait negatif eğimli duvar modeli.

Belirli bir litografik işlem için en uygun fotoduyarlı tipini belirleyen yanak eğiminin polaritesi (yönü) ve açısıdır. Tipik bir negatif fotoduyarlının duvar profili Şekil 4.11’de verilmektedir.

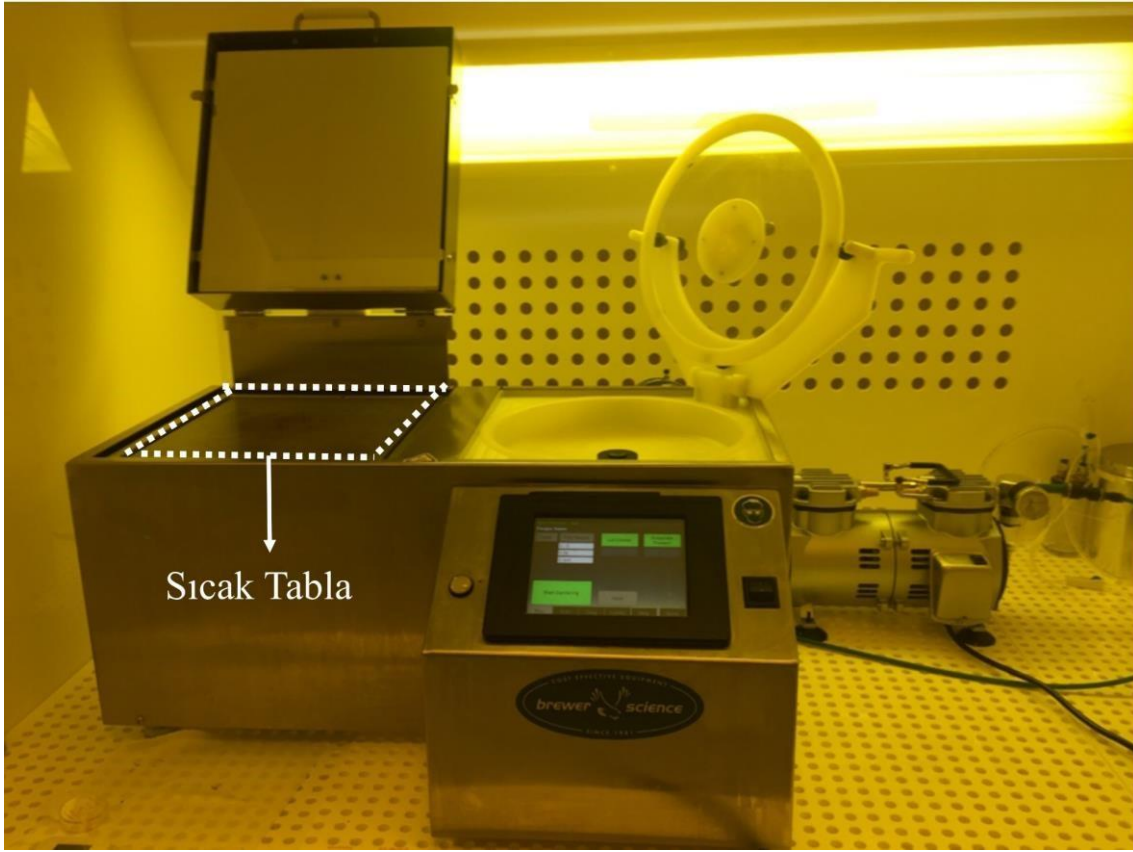


Şekil 4.11 Negatif fotoduyarlı duvar profilleri a) yetersiz pozlanmış b) düzgün pozlanmış c) aşırı pozlanmış.

Bu çalışmada kullanılan iki tip fotoduyarlıdan biri negatif fotoduyarlı nLOF2020 [77] diğeri ise pozitif fotoduyarlı AZ1518’dir [81].

Dönel kaplama tekniği litografi yönteminde oldukça sık rastlanan bir fotoduyarlı kaplama tekniğidir. Bu teknikte kaplanacak olan alttaş döner kaplama cihazı üzerindeki döner tablaya yerleştirilir. Bu tabla alttaşları tutmak için vakum kullanır. Alttaş üzerine damlatılan fotoduyarlı malzeme dönmenin etkisi ile merkezkaç kuvvetine maruz kalır ve giderek dağılır. Kaplama işleminin önemli adımları olan hız ve hızlanma kaplanan malzemenin homojenitesini ve aynı zamanda kalınlığını da belirler. Farklı tür Fotoduyarlılar için farklı yüzeye serme teknikleri vardır. Bu çalışmada kullanılan tüm fotoduyarlılar statik yöntem ile serilmiştir (Bkz. Bölüm 4.1.2.). Her ne kadar kullanılan

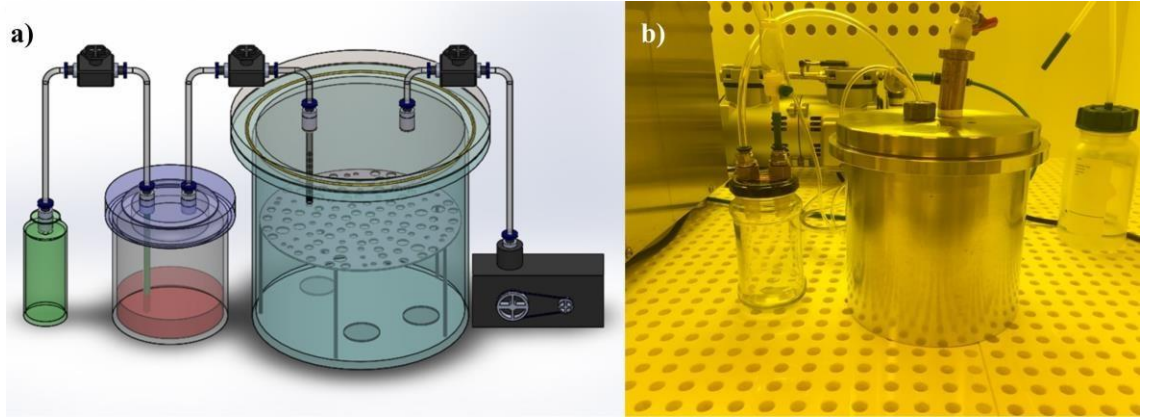
her fotoduyarlı için teknik bilgi kitapçığında verilen hızlar ve bunlara karşılık gelen kalınlıklar olsa da kaplanan fotoduyarlının hız, hızlanma ve viskozite ile değişen kalınlığının saptanması deneysel bir süreçtir. Bu çalışmada kullanılan döner kaplama sistemi Brewer Science Cee 200CBX Programmable Spin Coater'dır Bu döner kaplama cihazının ayrıca entegre bir de sıcak tablası vardır. Bu sistem ile çalışma boyunca kaplanan malzemelerin döner kaplama ve pişirme işlemleri parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Tez çalışmalarında kullanılan döner kaplama sisteminin fotoğrafı ise Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 Brewer Science 200 CBX dönel kaplama sistemi ve entegre sıcak tabla.

Dönel kaplama ile yapılan diğer bir işlem ise TI prime [87] isimli yapışma kuvvetlendirici katmanın kaplanmasıdır. Bu malzeme ile alttaş ile fotoduyarlı malzeme arasında yapışma kuvvetlenir ve boyutlar küçüldükçe ortaya çıkan istenmeyen silinme problemleri ortadan kaldırılır. Ti Prime yapışma kuvvetlendirici kendi bilgi kitapçığındaki [87] parametreler içinde 4000 RPM'de 20s kaplanmış ve 120 °C'de sıcak tablada pişirilmiştir. Negatif fotoduyarlı malzeme için kullanılan bu yapıştırıcının optik olarak foton eleği yapısında

kayıp oluşturup oluşturmadığına da ayrıca bakılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.27’de verilmiştir. Dönel kaplama işlemi ile süreç geliştirmesi denenen diğer bir malzeme HMDS’dir [73]. Bu malzeme de literatürde sıklıkla kullanılan bir yapışma artırıcıdır. Bu malzeme her ne kadar dönel kaplamada kaplansa da sistemin gerçek kaplama stili Bölüm 4.1.2.’de anlatılmıştır. Bu bölümde anlatılan düşük buhar basıncında sıcak ortamda kaplama işlemini gerçekleştirmek bir buhar odası tasarlanmış ve yaptırılmıştır. Basit bir buhar odasında HMDS kaplanmış ve negatif fotoduyarlı malzeme ile yapılan üretim testlerinde kullanılmıştır. Bu malzeme de tıpkı Ti Prime gibi optik olarak istenilen bölgede geçirgen özellik göstermektedir. HMDS fırının şematik ve gerçek görüntüsü Şekil 4.13’te verilmektedir.



Şekil 4.13 Tez kapsamında geliştirilmiş HMDS kaplama sistemi a) sistemin şematik gösterimi b) sistem fotoğrafı

4.2.6. Desen Oluşturma

Fotolitografi tekniğinde desen oluşturmanın birkaç yöntemi vardır. Bu yöntemlerden Bölüm 4.1.2.’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan teknik fotolitografi desen oluşturmanın özel bir tekniği olan maskesiz fotolitografi yöntemidir. Çalışmalarda kullanılan litografi sistemi Kloe Dilase 650 maskesiz yazıcı sistemidir. Bu sistemin temel sistem parametreleri Çizelge 4.3’de verilmektedir. Her bir parametre ve sistemin çalışma prensibi Bölüm 4.2.7.’de anlatılmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan sistem parametreleri Çizelge 4.4’te verilmektedir.

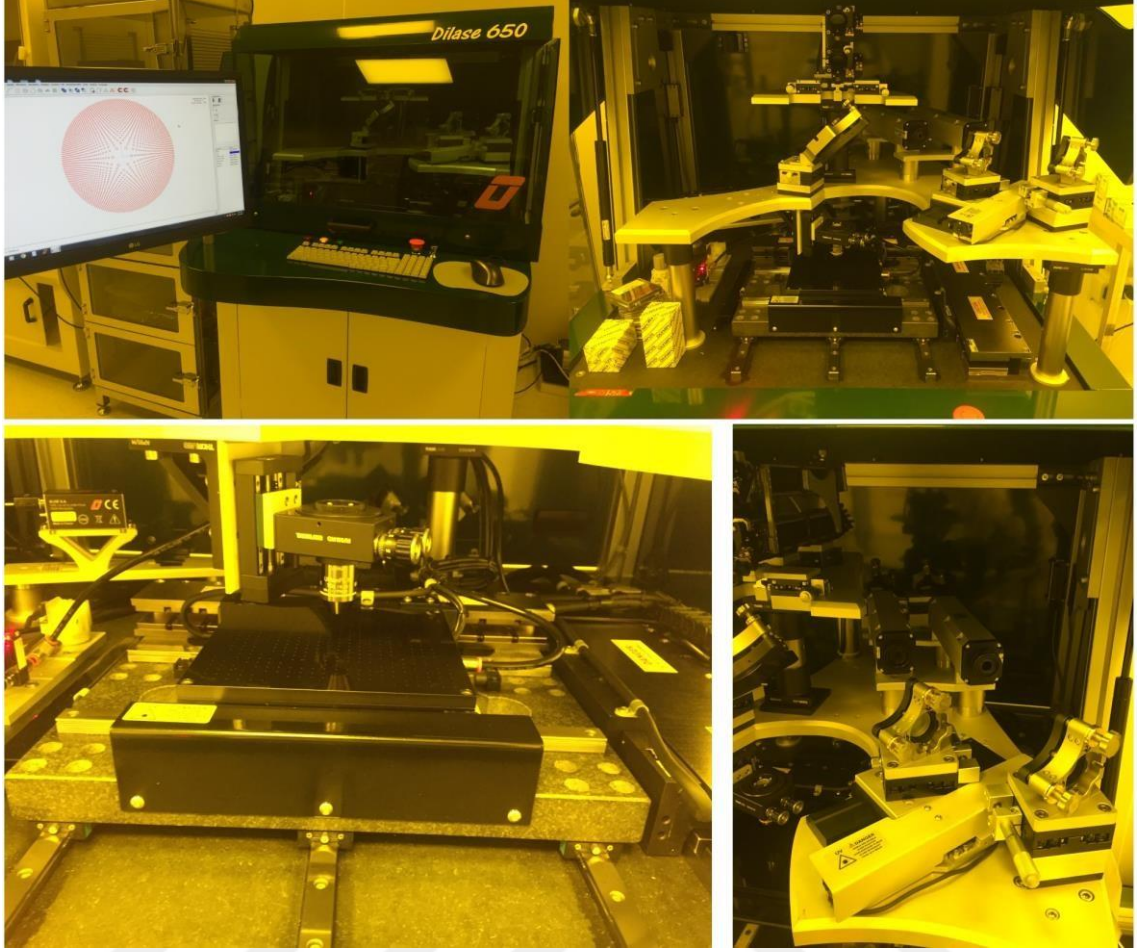
Çizelge 4.3 Kloe Dilase 650 maskesiz yazıcı sistem özellikleri.

Özellik	Değer
Tabla hızı	>500mm/s
Hareketli tabla konum hassasiyeti	100nm
Hareket alanı	150x150mm
Lazer modeli	Diyot lazer
Lazer dalgaboyu	375nm
Odaklama sonrası lazer çapı	0.5-2 μ m (40x 0.5 μ m optik yol), 10-100 μ m (10x 5 μ m optik yol)
Büyütme	10X-40X
Hareket tipi	Lineer motor
Alttaş yükseklikleri	0.25-10mm

Çizelge 4.4 Foton eleği üretiminde kullanılan sistem parametreleri.

Özellik	Değer
x-y tabla hızları	0.035-0.0085 mm/s
Yazım güçleri	0.1-0.005 (bağıl)
Güç filtreleri	%100-2.17
Odaklayıcı objektifler	10-40X
Maksimum lazer gücü	84mW
Optik yol	1-5 μ m

Çalışmalarda kullanılan litografi sistemi Şekil 4.14’te gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Kloe Dilase 650 maskesiz yazıcı sistemi.

Kloe Dilase 650 sisteminde üretilmiş foton eleklerine ait tipik yazım değerleri bilgiler Çizelge 5.4'te yer almaktadır. Ayrıca sistemin iyileştirmesi ile ilgili bilgiler Ref. [70]'de verilmektedir.

4.2.7. Maskesiz Optik Litografi Yöntemi

Maskesiz yazıcı yöntemi tez çalışmaları boyunca kullanılan fotolitografi yöntemidir. Bu yöntem diğer fotolitografi yöntemlerine benzemekle birlikte bir maskeye ihtiyaç duymadan desenlerin alttaşıllara aktarılmasını sağlamaktadır. Özellikle mikro ölçekteki maskelerin maliyetlerindeki artış ile hem maske yazabilen hem de maskesiz olarak desen aktarabilen sistemler geliştirilmiştir [88]. Bu sistemler elektron demeti [89][90], atomik güç mikroskobu [91] temelli ve lazer temelli sistemlerdir [15,92]. Ultraviyole bölgesinde çalışan iki tip maskesiz yazıcı modeli vardır. Bunlardan biri maskeyi dijital olarak

hazırlayıp, DMD (Digital Micromirror Device), alttaşa bir imaj şeklinde gönderen sistemler bir diğeri ise DWL (Direct Write Laser) tipinde olan ve UV lazerin odaklanarak bir deseni eksen hareketleriyle alttaşa aktaran sistemlerdir. Foton eleği üretim çalışmalarında bir DWL sistemi olan Kloe Dilase 650 sistemi kullanılmıştır. Bu sistemin bir görüntüsü Şekil 4.14'te verilmektedir. Bu sistem bir UV lazer kaynağından çıkan lazer ışığını çeşitli optikler ile odaklayarak alttaşın üzerine düşürmektedir. Temel olarak yapılan işlem diğer litografi sistemlerinde olduğu gibi fotoduyarlı malzemenin pozlanmasıdır. Bu sistemdeki temel fark UV ışığı bir maskeden geçirmek yerine maskedeki desenin UV ışık demeti ile çizilerek elde edilmesidir. Desenin eldesi için iki farklı yöntem olmakla birlikte bu tip sistemlerde kullanılan yöntem hareketli bir tabla ile alttaşın hareket edilmesidir. Lazer yazıcıların geneline bakıldığında hareketli tabla yerine ışığın bir galvo başlık, ışığı aynalar ile yönlendiren bir sistem ile bükülmesinin çeşitli güçlükleri vardır. Dilase 650 sistemi hareketli bir tabla ile alttaşı hareket ettirerek desenlerin çizilmesini sağlar. UV ışık demeti çeşitli optiklerden geçerek ilk olarak paralel hale getirilip demet çapı değiştirilir daha sonra ise bir objektif yardımıyla odaklanmış demet deseni çizmeye hazır hale getirilir. Sistemin iç mekanizması Şekil 4.16'de verilmektedir. Dilase 650 cihazında optik sistemin tamamı granit bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Sistemin temel elemanları aşağıda verildiği gibidir.

- Lazer kaynağı
- Optik yol
- Objektifler
- Hareketli tabla (vakum bağlantılı)
- Odaklama kamerası

Yukarıda verilen her bir sistem elemanının desenlendirme işleminde ayrı bir görevi vardır. Lazer litografi sistemi parametrelerinin litografi teknikleri ve sonuçları üzerindeki etkileri Bölüm 5'de tartışılacaktır.

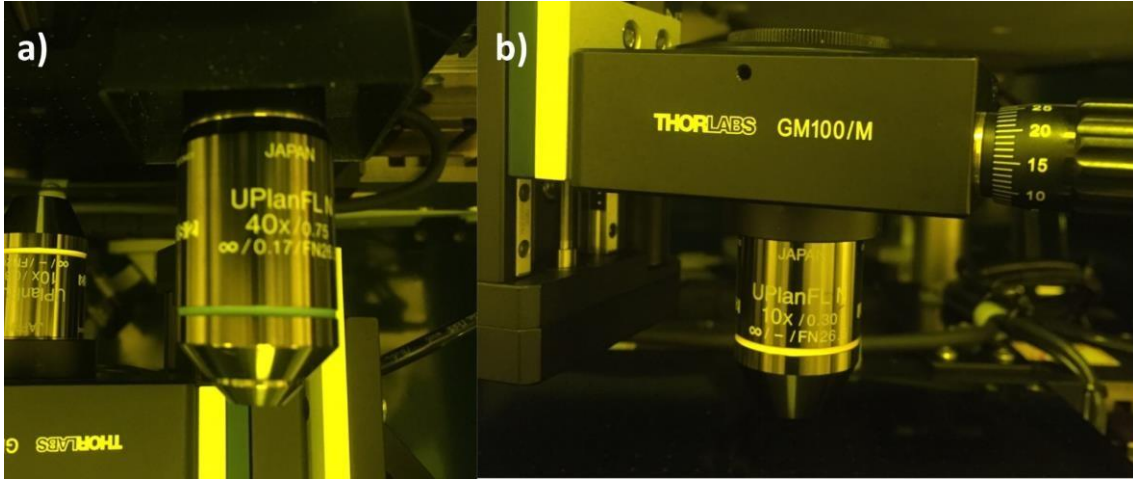
Sistem elemanları ışık kaynağından hareketli tablaya kadar birkaç adım izleyerek devam eder. Sistemde maksimum 84 mW güce sahip olan 375 nm'lik bir sürekli dalga lazer kaynağı kullanılmaktadır. Lazer kaynağının gücü iki farklı yöntemle belirlenir. Güç gereksinimi kullanılan fotoduyarlıya göre, kullanılan objektife göre ve hareketli tabla hızına göre ayarlanmalıdır. İlk yöntem sistemde optik yola yerleştirilen bir filtre, ikinci

yöntem ise sistem programı yoluyla lazer güç modülasyonu yapılmasıdır. Üretim çalışmaları sırasında her iki yöntemde kullanılan fotoduyarlı malzemeye bağlı olarak kullanılmıştır. Lazer kaynağından çıkan ışık ilk olarak çeşitli optik elemanlar ile paralel hale getirilip demet çapının belirleneceği optik yola yönlendirilir. Sistemde iki adet optik yol bulunmaktadır. İki optik yoldan biri gelen demetin çapını 0.5 μm olarak değiştirip paralel bir şekilde optik yol çıkışına göndermektedir. İkinci optik yol ise bu işlemi 5 μm için gerçekleştirmektedir. Bu optik yolların seçimi yazılması planlanan desene göre sistem programı yardımıyla değiştirilebilmektedir. Optik yol sonrasında demet tekrar optikler yoluyla yönlendirilerek bir aynaya yönlendirilir. Buradaki ayna lazer kaynağı için bir tür ayna görevi görürken aynı optik eleman sistemde bulunan kameranın ışık kaynağı için geçirgen bir davranış sergiler. Kullanılan kameranın aydınlatması beyaz ışıktır. Bu beyaz ışık bir filtre yardımıyla belirli dalga boylarından arındırılmaktadır. Kullanılan fotoduyarlı malzemeye zarar vermeyecek dalga boyları filtre yardımıyla süzülmemektedir. Işık demetlerinin bu adımdan sonra ulaştıkları nokta bir mikroskop objektifidir. Bu objektifler paralel gelen ışık demetinin odaklanması için kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan iki tip objektif vardır. Bunlar 10X ve 40X olarak iki farklı büyütme faktörüne sahip objektiflerdir. Kullanılan objektifler ve özellikleri

Çizelge 4.5'te verilmektedir. Kullanılan objektifler ayrıca Şekil 4.15'de gösterilmektedir.

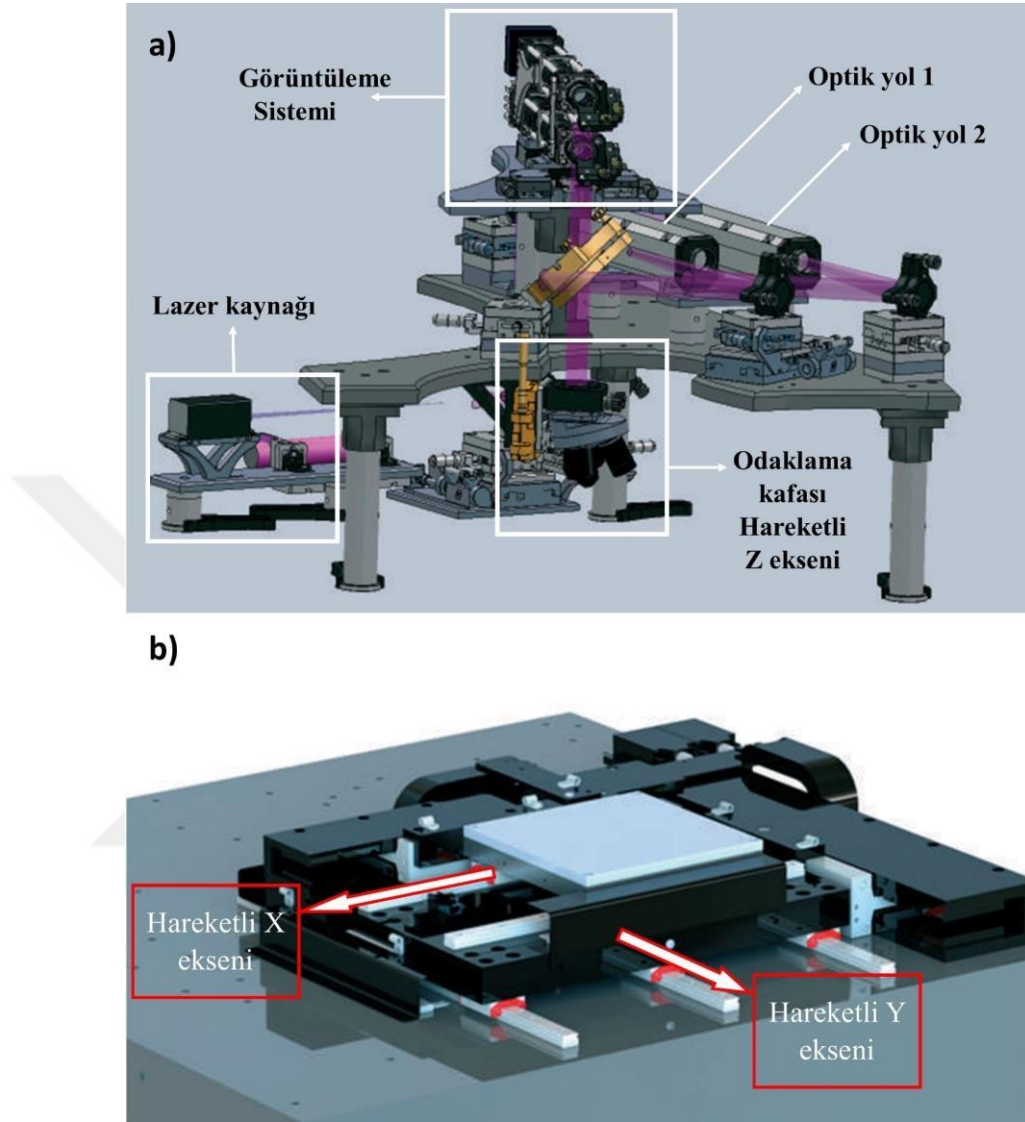
Çizelge 4.5 Foton eleği üretiminde desenlendirme işleminde kullanılan objektifler ve özellikleri.

Objektif	Büyütme Faktörü	Sayısal Açıklık	Çalışma uzaklığı (mm)	UV bölgesi uyumluluğu
OLYMPUS UPLFLN 10X2	10x	0.30	10	var
OLYMPUS UPLFLN 40X	40x	0.75	0.51	var



Şekil 4.15 Litografi işlemi desenlendirme objektifleri a) OLYMPUS UPLFLN 40X b) OLYMPUS UPLFLN 10X2.

Objektifler yardımıyla 1-50 μm arasında bir demet çapı elde edilebilmektedir. Bu değerlerin elde edilmesinde kullanılan optik yolun da etkisi bulunmaktadır. Objektif yardımıyla odaklanan UV demet haricinde alttaş üzerinde optik görüntüleme için kullanılan kameranın ışığı da odaklanmaktadır. Bu sayede odaklanan alan kamera yardımıyla izlenebilmekte ve işlem başlatılmaktadır. Objektif yükseklik ayarı otomatik bir ray yardımı ile mikron hassasiyetinde yapılarak odak mesafesi ayarlanabilmektedir. Burada önemli bir nokta olan görünür ışık ve UV ışığın odak mesafesindeki farklılıktır. Matematiksel olarak hesaplanan değerler haricinde desen yazımı için odaklama işlemi deneysel olarak test edilerek yapılmalıdır. Bunun temel amacı kullanılan fotoduyarlıya ve kalınlığa göre değişen minimum yapı boyutlarıdır. Deneysel olarak ayarlanan odak mesafesi ile işlem yapılması ile yaklaşık 1 μm 'lik minimum çizgi genişliğine ulaşmak mümkün olmaktadır. Hareketli tablanın hareketi deseni yazmada önemli olduğu kadar lazer şiddeti ve çizgi düzgünlüğü için de çok önemli bir parametredir. Şiddetin değişimi yazılan desende birçok özelliği değişmektedir. Bunun temel sebebi de soğurulan ışık miktarının değişmesidir. Sistemdeki hareketli tabla 150 x 150mm boyutlarındadır. Bu tablaya bağlı bir vakum pompası ile alttaşlar tablaya vakum yoluyla tutturulmaktadır. Buradaki önemli parametrelerden biri sisteme tutturulan alttaşa yapılacak odak ayarının vakum altında yapılmasıdır. Öte yandan hareketli tablanın hızı 500 mm/s hızına kadar çıkabilmektedir. Genellikle hareketli tablanın hızın düşük tutularak desenlerin tekrarlanabilirliği artırılmakta ve titreşim azaltılmaktadır.

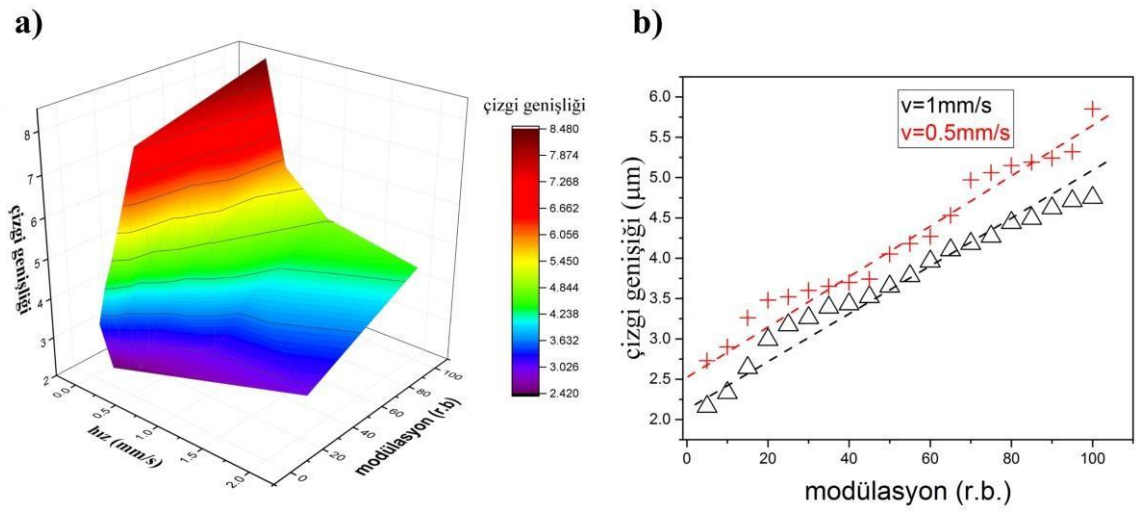


Şekil 4.16 Kloe Dilase sisteminde desenlendirme işleminde kullanılan donanımlar a) optik sistem ve optik yollar b) hareketli tabla (x,y).

Kloe Dilase sistemindeki optik yollar ve hareketli tabla Şekil 4.16’da verilmektedir. Sistemde üç adet eksen bulunmaktadır. Bu eksenlerin ikisinin (x,y hareketli tabla) desen oluşunu anlık olarak etkilerken üçüncü eksen olan z eksen, objektifin tutturulduğu eksen, objektifin odağını ayarladığından dolayı olarak sistemi etkilemektedir. Çizgi genişliğini ve soğurulan ışık miktarı bakımında bakıldığında her üç eksen de sistemde önemli rol oynamaktadır. Yapılan testlerden elde edilen bilgiler, çizgi genişliğinin odak mesafesi,

Şekil 4.18 Odak uzaklığına bağlı çizgi genişlikleri a) çizgi genişliği optik mikroskop görüntüleri b) odak mesafesine karşı çizgi genişliği değişim grafiği.

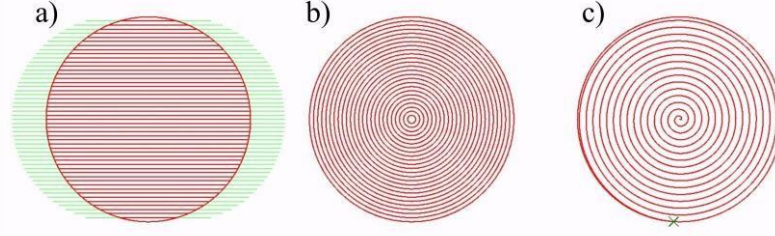
Desen oluşturma sırasında genellikle z ekseninde bir hareket tercih edilmez. Düz yüzeylerin desenlendirilmesinde odak mesafesinin genellikle en iyi (en küçük demet çapı) değeri sabit bırakılarak işlem yapılır. Sistemin hız ve şiddet parametrelerine verdiği cevabın ölçülmesi amacıyla bir dizi test yapılmıştır. Bu testlerin sonucunda oluşturulan şiddet, hız ve çizgi kalınlığını içeren grafik Şekil 4.19’da verilmektedir.



Şekil 4.19 Litografi sistemi sistem parametreleri ile çizgi genişliği değişim grafikleri a) lazer güç modülasyonu, hız ve çizgi genişliği değişim grafiği b) lazer güç modülasyonu çizgi genişliği değişim grafiği.

Şekil 4.19’da verilen grafik yardımıyla çizgi kalınlığının hem şiddet artışı ile hem de sabit şiddette hızın azaltılmasıyla arttığı gözlenmektedir. Bu durumun temel sebebi soğurulan ışık miktarıdır. Soğurulan ışık miktarı arttıkça fotoduyarlı malzemede meydana gelen kimyasal değişim de artmakta ve duyarlılığın tipine göre değişim göstererek çizgi genişliğini arttırmaktadır. Şiddet ve hız ikilisinin diğer kritik noktası soğurulan ışık miktarındaki değişimin duyarlılığın kimyasal değişimi için yeterli olmasıdır. Yeterli enerjiye sahip olmayan desenlendirilmiş bölgelerde istenmeyen sonuçlar ile karşılaşmaktadır. Çalışmalar kapsamında bu özelliği de test etmek amacıyla optik profilometre yöntemi (Bölüm 4.4.2.) kullanılmıştır. Bu yöntem ile fotoduyarlı kalınlıkları ölçülerek yeterli enerjinin soğurulup soğurulmadığı tayin edilmiştir. Sistemde birkaç tip

desenlendirme tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler çizilen bir desenin içini doldurmak amacıyla kullanılır. Doldurma tipleri; spiral doldurma, çizgisel doldurma ve desen küçültmesidir. Her teknik desenleri farklı şekillerde tarayarak doldurur. Tekniklerin şematik gösterimi Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20 Litografi sistemi foton eleği delikleri desenlendirme teknikleri

Özellikle foton eleği yapısında sistemin dezavantajı olan hız probleminin üstesinden gelmek amacıyla üç teknik de test edilmiştir. Hız ve çizim düzgünlüğü baz alınarak desen küçültmesi ile doldurma tekniği kullanılmıştır. Bu teknikler yanında bu çalışma kapsamında geliştirilen hızlı bir teknik Bölüm 5.5’de anlatılmaktadır.

4.2.8. Tab Etme/Geliştirme

Litografi işleminde desen oluşturma işlemini, tab etme veya diğer bir adıyla geliştirme işlemi takip eder. Bu işlem ile kullanılan fotoduyarlının tipine göre UV ışığa maruz kalan veya kalmayan bölgeler silinebilirler. Bazı özel fotoduyarlılarda ışığın miktarına göre duyarlının kalınlığında değişim elde etmek de mümkün olmaktadır [93]. Geliştirme işlemi sonraki işlem adımları için önemli bir adımdır. Bu adımda ışığa maruz kalan bölgeler haricinde de fotoduyarlıların incilmesi veya tamamen silinmesi söz konusu olabilmektedir. Bu durumda işlemlerin tamamının tekrarlanması gerekmektedir. Her fotoduyarlının kendine ait bir geliştirme reçetesi vardır. Bu reçete ile birim zaman başına silinen malzeme kalınlığı değiştiiğinden fazla silinmeler veya az silinmeler ortaya çıkabilmektedir. Fazla silinmelerde desen kaybı olacağı gibi fotoduyarlı kalıntısına sebep olan az silinmeler de sonraki işlemleri tehlikeye atmaktadır. Bu durumların oluştuuğu deneysel veriler ve çözüm yöntemleri Bölüm 5.1’de sonuçlar kısmında verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan iki tip fotoduyarlı Bölüm 4.2.5.’de verilmiştir. Negatif fotoduyarlı

olan nLOF2020 için AZ MIF726 geliştiricisi, pozitif fotoduyarlı malzeme olan AZ1518 fotoduyarlı için ise AZ400K geliştiricisi kullanılmıştır. Yapılan testler ile bulunan optimum reçeteler fotoduyarlı kalınlığına bağlı olmakla birlikte AZ400K:H₂O (ultra saf su) 1:4 oranında 50 s ve AZ MIF726 ise seyreltmeden kullanılacak şekilde 50 s olarak ayarlanmıştır. Kaplama özellikleri ve kullanılan geliştiriciler ayrıca Çizelge 4.1’de verilmiştir.

4.2.9. Kalıntı Silme Ve Temizleme

Litografi işlemin son adımı kalıntı silme ve temizleme işlemidir. Bu işlem basamağı içine aynı zamanda aşındırma işlemi de girmektedir. Bu tekniğin detayları Bölüm 5.4.’de verilmektedir. Kullanılan alt yönteme bağlı olarak, düşürme ve ıslak aşındırma, bu adımın sırası değişmektedir. Tez çalışmaları sırasında kullanılan her iki fotoduyarlı malzemenin de temizleme/sıyırma kimyasalı aynı olduğundan prosedürleri aynıdır. Kullanılan malzeme AZ100 Remover kimyasalıdır. Bu işlem sonrasında alttaş kalıntılardan temizlenmiş olur. Burada kalıntı olarak bahsedilen malzeme fotoduyarlıının kendisidir.

4.3. Litografi Teknikleri: Prosedürler ve Sonuçlar

Foton eleği üretim çalışmaları kapsamında temel olarak optik litografi yöntemi ve bu yöntemin özel bir uygulama cihazı olan maskesiz yazıcı kullanılmıştır. Maskesiz yazıcı ile geliştirilen desenler ile litografinin tamamlanması için iki farklı alt teknik kullanılmıştır. Bu alt teknikler ıslak kimyasal aşındırma ve düşürme teknikleridir. Her iki teknikte de aynı ince film katmanları kullanılmaktadır. Tekniklerin aşındırma ve düşürme süreçleri haricinde diğer prosedürleri aynı fakat işlem sırası farklıdır.

4.3.1. Düşürme (Lift Off) Tekniği

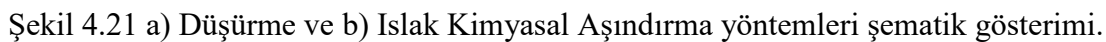
Düşürme tekniğinin temel işlem sırası Şekil 4.5’te verilmektedir. Bu yöntem oldukça sık kullanılan bir litografi yöntemidir. Bu yöntem ile ikinci yöntem arasında işlem sırası farkı olmakla birlikte bazı ekstra adımlar da kullanılmıştır. Düşürme tekniğinde temel olarak kaplanan metalik ince filmlerdeki bazı bölgelerin silinmesi düşürülmesi istenmektedir.

Bu durum için ilk olarak düşürülecek yani silinecek bölgenin inşa edilmesi gerekmektedir. Düşürme yönteminde bu sistem negatif fotoduyarlı malzeme ile elde edilmiştir. Bir foton eleğinin yapısına bakıldığında metalik bir alanda ışığı geçirebilen delikler olduğu görülmektedir. Bu deliklerin metalik filmlere açılmasının yöntemlerinden biri de düşürme tekniğidir. Bu teknikte sıralama alttaşın temizlenmesi ile başlamaktadır. Alttaş ısıtılarak susuzlaştırma sağlanır. Özellikle kullanılan negatif fotoduyarlı malzemede fotoduyarlının cama yapışma oranı çok yüksek değildir. Bu sebeple yapıların boyutuna bağlı olarak fotoduyarlı kaplamasından önce bir yapıştırma artırıcı tabaka uygulanabilir. Bu çalışma kapsamında birçok örneğe farklı iki tip yapışma kuvvetlendirici (HMDS-Ti Prime bkz. Bölüm 4.2.5.) ayrı ayrı uygulanarak testler yapılmıştır. Yapışma artırma ile birlikte ileriki safhalarda ortaya çıkan tutunamayan yapılar ortadan kaldırılmış olmaktadır. Bu safhadan sonra alttaş negatif fotoduyarlı ile kaplanarak ön ısıtma işlemine gönderilir. Ön ısıtma ile fazla çözücü sistemden uzaklaştırılarak fotoduyarlı desen yazımı işlemine hazır hale getirilir. Desen yazımı tamamlandıktan sonra ısıtma işlemi ile desendeki bölgeler daha süreç uyumlu hale getirilerek tab etme safhasına hazır hale getirilir. Işığı gören bölgelerdeki yapıların geliştiricide çözünmeden kalması ve diğer bölgelerin çözünerek silinmesi gerekmektedir. Uygun bir reçete ile bu işlem sağlanarak desenli alttaş ince film kaplama işlemine hazır hale getirilir. İnce film ile kaplanacak fotoduyarlı ile desenlendirilmiş örneğin bir sonraki adımda silinebilmesi için sıcaklığının belli bir değer altında tutulması gerekmektedir. Bu çalışmada yapılan testlerde ortalama 100 °C ve altında büyütülen ince filmlerde sonraki adımlardaki başarı faktörünün daha fazla olduğu görülmüştür. Tüm çalışmalarda kaplama sistemi sıcaklığı 50 °C olarak ayarlanmış ve fotoduyarlıların termal bozulmaları önlenmiştir. İnce film kaplama işleminden sonra düşürme işlemi gerçekleştirilir. Düşürme işlemindeki en önemli parametre negatif duvar yapısıdır. Negatif duvar yapıları Şekil 4.11b’de gösterilmektedir. Negatif duvar yapısına sahip olmayan örneklerdeki davranış detaylı bir şekilde Bölüm 5.’te tartışılacaktır. Duvar yapısının değişmesi genellikle soğurulan enerji ile ilişkili olduğundan maskesiz yazıcı parametreleri burada önemli bir rol oynamaktadır. Düşürme alt tekniğinde silme işlemi düşürme işleminin kendisi olduğundan bu tekniğin son adımıdır. Bu çalışmada silme/düşürme işlemi AZ100 Remover ile yapılmıştır. Silici için malzeme kalınlığı baz alınarak belirli bir süre beklenmelidir. Uzun süreli işlemlerde silicinin metal katmanına

da etki ettiği çalışmalarda saptanmıştır. Çalışmalarda silici malzeme yerine aseton kullanılarak yapılan testlerde daha hızlı sonuç alınsa da yüzey temizliği açısından önerilmeyen sonuçların ortaya çıkması muhtemeldir. Bunun temel sebebi; asetonu yüksek buhar basıncından dolayı çok hızlı kurumasıdır. Bu hızlı kuruma sebebiyle silinen fotoduyarlı malzeme kalıntıları tekrar silinen bölgeye yapışarak çizikler oluşturur. Bu çiziklerin giderilmesi için isopropil alkol kullanılabilir fakat hem işlem adımları hem de temizlik açısından risk taşıdığı için aseton ile işlem önerilmemektedir [94]. Çalışmalarda kullanılan fotoduyarlıların her ikisi de AZ serisi duyarlılar olduğundan üretici firma tarafından önerilen ve performansı yüksek olan silici, amin ve çözücü karışımı olan AZ 100 Remover'dır [94]. Bu teknikte kullanılan işlem sırası ve işlemlerin şematik görünümü şekil 4.21a'da verilmektedir.

4.3.2. Islak Kimyasal Aşındırma Tekniği

Kimyasal aşındırma tekniğinde yapılan temel işlem metalik filmin bir asit ile aşındırılmasıdır. İki teknik arasındaki temel fark maskelemenin sırası olarak düşünülebilir. Islak kimyasal aşındırma süreci ilk olarak metalik ince filmin kaplanmasıyla başlar. Bu filmin özellikleri tamamen düşürme yöntemi ile aynıdır. Burada kullanılan ince film her ne kadar düşürme yöntemi ile aynı olsa da ince film kaplama parametrelerindeki düşük sıcaklık parametresi bu yöntem için esnetilebilir. Burada ince film kaplama sistemine giden alttaşa herhangi bir fotoduyarlı kaplanmamıştır. İşlem sırası şekil 4.21b'de verilmektedir. İnce film kaplama işleminde sonra sıra pozitif fotoduyarlının kaplanmasına gelir. Burada kaplanan fotoduyarlı AZ1518'dir ve döner kaplama işlemi parametreleri izelge 4.1'de verilmiştir. Fotoduyarlı kaplama sonrasında işlem sırası ön ısıtma ve sonrasında desenlerin oluşturulmasındadır. Desenler oluşturulduktan sonra herhangi bir ısıtma işlemine gerek duyulmadan desenlendirilmiş örnek tab etme işlemine tabi tutulmaktadır. Tab etme işlemi AZ400K geliştirici ile izelge 4.1'de verilen süre ve seyreltme oranı ile yapılmaktadır. Tab işlemi sonrasında oluşan desen yapısı şekil 4.10a'daki gibi olmaktadır. Bu desenlendirme işlemi temel olarak alt katmandaki metalik filmi aşınmaya karşı koruyan bir maske görevi görmektedir. Maskeleme işlemi tamamlandıktan sonra yapılan işlem desenlendirilmiş örneğin asit ile aşındırılmasıdır. alışmalar kapsamında yapılan asit aşındırma işlemi için



Her iki alt yöntem olan düşürme ve ıslak kimyasal aşındırma yöntemlerinde işlemlerin çeşitli basamaklarında farklı yapısal analiz yöntemleri ile yapılar incelenmiş ve deneysel çalışmalara bu şekilde yön verilmiştir. Yapılan ölçümlerde kullanılan teknikler aşağıda sıralanmakta ve detaylı bilgileri Bölüm 4.4’de verilmektedir.

- Optik Mikroskop Yöntemi
- Optik Profilometre Yöntemi
- Spektrofotometre Yöntemi

4.4. Yapısal Analiz Yöntemleri ve Sonuçlar

Çalışmalarda kullanılan üç farklı analiz yöntemi vardır. Bu yöntemler optik mikroskop yöntemi ve bu yöntemde kullanılan Olympus BX53 optik mikroskop, optik profilometre yöntemi ve bu yöntem için kullanılan Zygo Zegage Plus optik profilometre ve ince filmlerin geçirgenlik ve yansıtıcılık gibi özelliklerinin ölçülmesi amacıyla kullanılan Perkin Elmer Lambda 950 UV-VIS spektrofotometredir. Her bir teknik kullanılan ekipmanları birlikte 4.4.1., 4.4.2., 4.4.3. bölümlerinde verilmektedir.

4.4.1. Optik Mikroskop Yöntemi

Optik mikroskoplar, küçük nesnelerin büyütülmüş görsel veya fotografik görüntülerini oluşturmak için tasarlanan ekipmanlardır. Bunu başarmak için, mikroskop üç görevi gerçekleştirmek üzere tasarlanır: numunenin büyütülmüş bir görüntüsünü oluşturmak, görüntünün farklı ayrıntılarını ayırt etmek ve son görüntünün insan gözüyle veya kamerayla görülebilir olmasını sağlamak. Bu karakterizasyon enstrümanları sınıfı, basit bir büyüteçten gelişmiş çoklu mercek mikroskoplarına kadar her şeyi içermektedir. Işığın numuneye nasıl yansıtıldığına bağlı olarak optik mikroskopların çalıştırılmasının iki temel yolu vardır. Biyolojik polimerleri incelemek için yaygın olarak kullanılan ilk yaklaşım, çok ince örnekler hazırlamak ve ışığın numuneden geçmesini sağlamaktır.

İkinci yaklaşım ise daha kalın kesit numuneleri ve saydam olmayan malzemeleri görüntülemek için kullanılır. İkinci yöntemde ışık objektiften geçer ve daha sonra numunenin yüzeyinden tekrar mikroskop objektifine yansır. Bu iki teknik, iletilen ve yansıyan ışık mikroskobu olarak adlandırılmaktadır [95]. Optik mikroskopların çözünürlük sınırı, optik sistemin sayısal açıklığı (NA) ve kullanılan ışığın dalga boyu (λ)

tarafından kontrol edilen difraksiyonla kontrol edilir. Optik sapmaların önemsiz olduğu varsayılarak, (d) çözünürlüğü Eşitlik 4.2’de verilmektedir.

$$d = \frac{\lambda}{NA} \quad 4.2$$

Burada d çözünürlük, λ kullanılan dalgaboyu ve NA nümerik açıklıktır. Nümerik açıklığın sınırlı olması sebebiyle çözülebilen yapıların sınırları düşüktür. Örneğin 1.5 nümerik açıklık değeriyle 550nm’lik aydınlatma kaynağına sahip olan bir mikroskop yaklaşık 0.3 μ m’lik bir alanı çözebilmektedir.

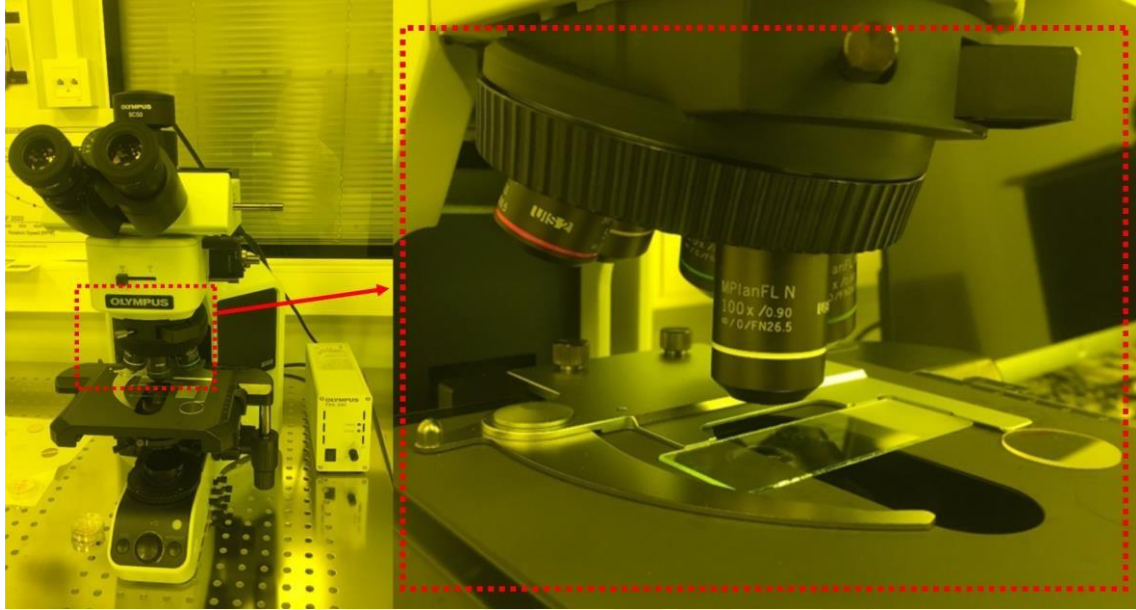
Foton eleği üretim çalışmalarında kullanılan optik mikroskop Olympus BX53’tür. Bu mikroskopta kullanılan toplam beş adet objektif ile yapıların büyüklüğüne göre görüntüleme çözünürlüğü artırılabilir. Kullanılan objektifler Çizelge 4.6’da verilmektedir.

Çizelge 4.6 Olympus BX53 optik mikroskop objektifleri.

Objektif	Büyütme Faktörü	Sayısal Açıklık	Çalışma Uzaklığı (mm)	Alan Numarası	Çalışma Ortamı
O. MPLNFLN 5x	5X	0.15	20	26.5	hava
O. MPLNFLN 10x	10X	0.3	11	26.5	hava
O. MPLNFLN 20x	20X	0.45	3.1	26.5	hava
O. MPLNFLN 50x	50X	0.8	2	26.5	hava
O. MPLNFLN 100x	100X	0.9	1	26.5	hava

Kullanılan mikroskopta iki tip aydınlatma seçeneği de mevcuttur. Bunlar alttan aydınlatma yani geçirimli mikroskop ve üstten aydınlatma olarak, yansıtmalı mikroskoptur. Foton eleği üretiminde her iki teknik ile de görüntü alınmıştır. Mikroskop halojen lamba ile örneği hem alttan hem de üstten aydınlatmakta ve bir optik sistem yardımıyla görüntü hem kamera sistemine hem de göz ile görüntüleme yapılan okülere göndermektedir. Kullanılan kamera sistemi ile üretilen foton eleklerinin görüntüsü bilgisayar ortamına aktarılmakta ve bu ortamda hem boyutsal hem de görsel analiz

yapılabilmektedir. Görüntülenen foton eleklerinin boyutları 10-150 μm civarında olduğundan optik mikroskop yöntemi tüm delikleri incelemek için yeterli olmaktadır. Yaklaşık olarak 1 μm 'lik alanlar 100X objektif yardımıyla görülebilmektedir. Foton eleği üretim çalışmalarında kullanılan optik mikroskop Şekil 4.22'de verilmiştir.



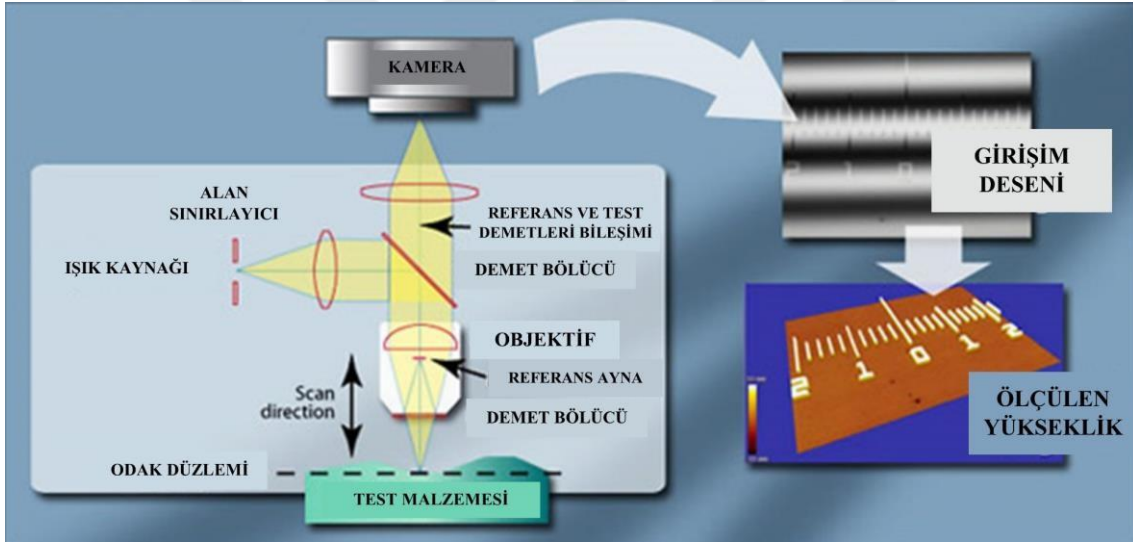
Şekil 4.22 Olympus BX53 optik mikroskop.

4.4.2. Optik Profilometre Yöntemi

Bir optik profilometrenin çalışma prensibi şematik olarak Şekil 4.23'te verilmektedir. Optik profilometre bir tür girişim mikroskobudur ve cetvel olarak ışığın dalga boyunu kullanarak yüzeylerdeki pürüzlülük gibi yükseklik değişimlerini ölçmek için kullanılırlar.

Optik girişim profili oluşturma, doğru yüzey ölçümleri elde etmek için iyi bilinen bir yöntemdir. Optik profil oluşturma yöntemi, bir test yüzeyi ile bir referans yüzey arasındaki optik yol farkını karşılaştırmak için ışığın dalga özelliklerini kullanır. Bir optik girişim profili oluşturucunun içinde, bir ışık demeti ikiye ayrılır, ışık bir mikroskop objektifinden geçerek yüzeyine bakılacak malzemeye gider ve oradan yansır. Diğer ayrılan demet ise bir referans aynadan yansıtılarak optik görüntüleyiciye diğer demet ile birleşerek gelir. Demet bölücü ve örnek mesafe ile demet bölücü ve referans ayna mesafesi arasındaki yolların farkına göre farklı fazlardaki iki dalga görüntüleyicide

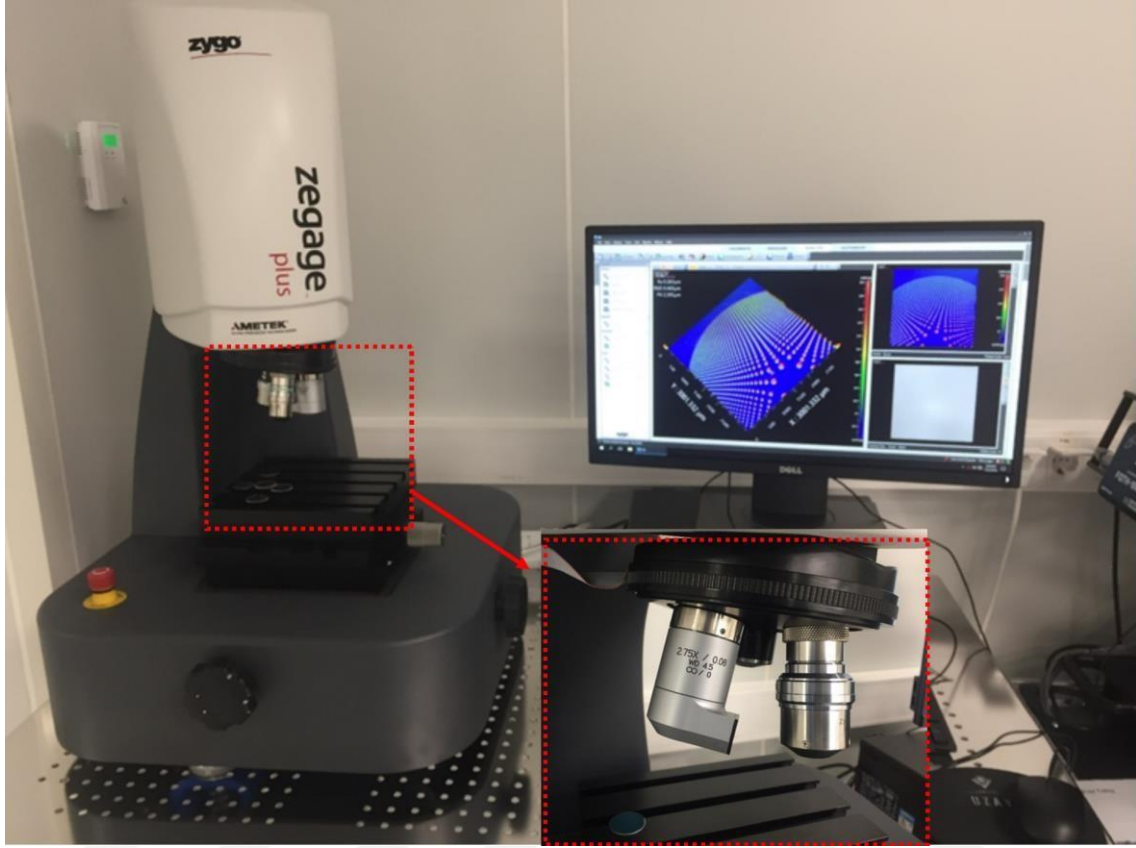
buluşur. Görüntüleyecide oluşan desen girişim desendir ve iki dalğanın faz farkına, yol farkına, göre aydınlık ve karanlık desenler oluşmaktadır. Burada oluşan karanlık aydınlık desenlere girişim saçakları adı verilir. Referans aynası bilinen bir düzlüğe sahip olduğu için, mümkün olduğu kadar mükemmel düzlüğe yakındır, optik yol farkları test yüzeyindeki yükseklik farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Görüntüleyici burada bir dijital kameradır. Girişim ışını, yapıcı girişim alanlarını daha açık ve yıkıcı girişim alanlarını daha koyu olarak gören bu kameraya odaklanmıştır. Oluşan aydınlık ve karanlık desenlere interferogram adı verilir. Bir "interferogram" görüntüsünde ışıktan karanlığa her geçiş referans yolu ile test yolu arasındaki farkın yarım dalga boyunu temsil eder. Eğer dalgaboyu biliniyorsa, bir yüzeydeki yükseklik farklarını bir dalğanın fraksiyonlarında hesaplamak mümkündür. Bu yükseklik farklarından bir yüzey ölçümü elde edilebilir [96].



Şekil 4.23 Optik profilometre çalışma prensibi şematik gösterimi [96].

Uygulamada, optik bir profilleyici malzemeyi dikey olarak tarar. Görüş alanındaki malzeme odak düzleminde girişim oluşturur. Test materyalindeki her bir yükseklik seviyesi farklı bir zamanda en uygun odağa (ve dolayısıyla en büyük girişim ve kontrast) değerine ulaşır. İyi kalibre edilmiş optik profilometrelerde, bir nanometrenin altında hassasiyet elde etmek mümkündür. Foton eleği üretim çalışmalarında kullanılan optik profilometre Zygo Zegage Plus profilometredir. Bu cihazın diğer bir adı beyaz ışık

interferometresidir. Bu isim ışık kaynağının beyaz ışık olmasından gelir. Foton eleği üretim safhalarındaki ölçümlerde kullanılan profilometre Şekil 4.24’te verilmektedir.



Şekil 4.24 Zygo Zegage Plus Optik Profilometre

Yüzey profili ölçümleri sırasında üç farklı objektif kullanılmıştır. Bu objektiflerin diğer objektiflerden farkı birer interferometrik objektif olmalarıdır. Her biri kendi içinde konumu ve yüzey özellikleri tam olarak bilinen referans aynalara sahiptirler. Kullanılan objektiflerin tipleri ve özellikleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

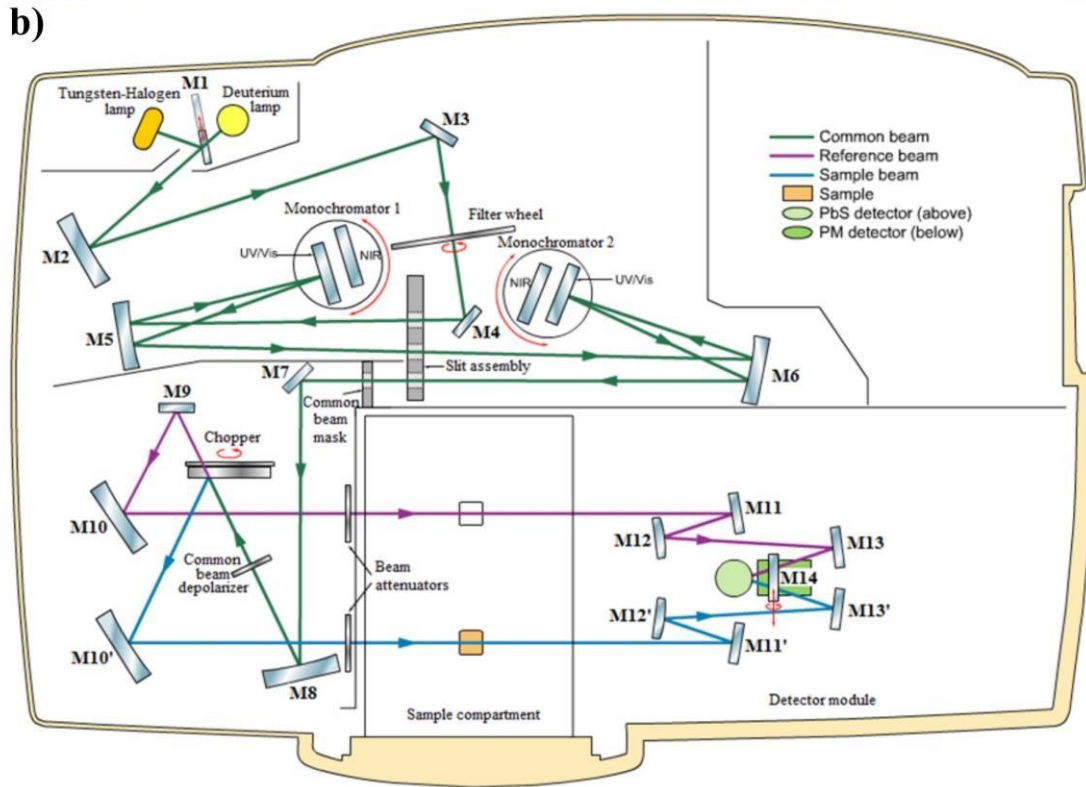
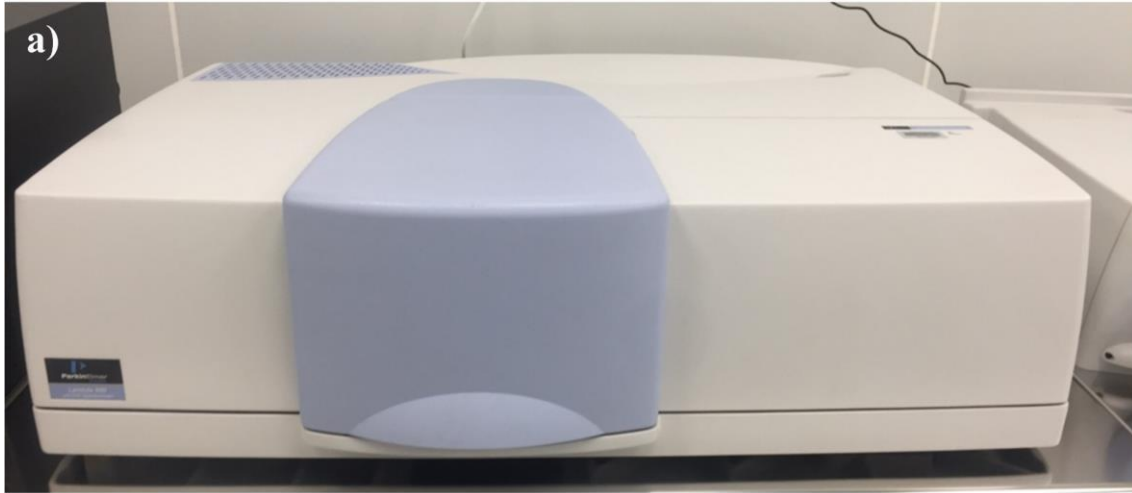
Çizelge 4.7 Zygo Zegage Plus interferometrik objektifler ve özellikleri.

Özellik	Zygo 2.75X Michelson	Zygo 20X Mirau	Zygo 50X Mirau
Büyütme Faktörü	2.75	20	50
İnterferometre Tipi	Michelson	Mirau	Mirau
Çalışma Uzaklığı (mm)	4.5	4.7	3.4
Nümerik Açıklık	0.08	0.4	0.55

Optik Çözünürlük (μm)	3.56	0.71	0.52
------------------------------------	------	------	------

4.4.3. Spektrofotometre Yöntemi

Spektrofotometre yöntemi ile üretilen örneklerin geçirgenlik ve yansıtıcılık gibi değerleri ölçülmektedir. Üretim çalışmalarında kullanılan cihaz Perkin Elmer Lambda 950 UV/VIS cihazıdır. Lambda 950, ultraviyole (UV), görünür (Vis) ve yakın kızılötesi (NIR) spektral aralıklarında (175-3300 nm arasında) çalışan bir cihazdır. Spektrofotometredeki optik sistem şematik olarak Şekil 4.25b’da gösterilmektedir.

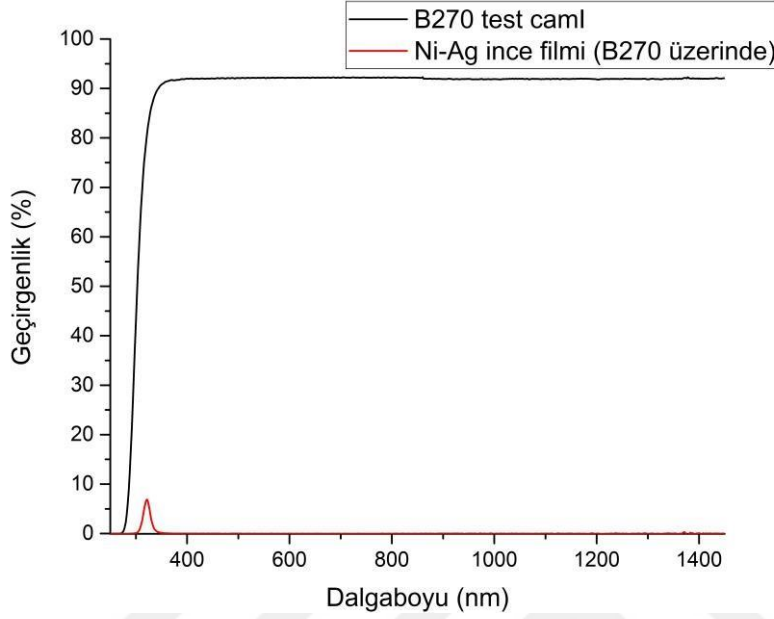


Şekil 4.25 Perkin Elmer Lambda 950 Spektrofotometre a) cihaz görseli b) optik sistem şematik gösterimi.

Tüm dalga boyu aralığını karşılamak için iki ışık kaynağı, bir halojen lamba (NIR ve Vis aralıkları için) ve bir döteryum lambası (UV aralığı için) kullanılır. Hareketli ayna M1 bu kaynaklardan birini seçmek ve diğerini engellemek için kullanılır. Radyasyonun izlediği yol Şekil 4.25’de gösterilmektedir. M2 ve M3 aynalarından yansıyan demet, monokromatörlerle senkronize olan filtre tekerleğindeki optik filtreden geçer. Radyasyon, üretilen dalga boyuna bağlı olarak ışın yoluna yerleştirilen uygun optik filtre ile önceden filtrelendir. Demet M4 aynasından yansır, ilk monokromatörün giriş açıklığından geçer ve M5 aynası ile ızgara (kırınım ağı) tablasına yansıtılır. Işın, geçerli dalga boyu aralığına göre UV / Vis ızgaraya veya NIR ızgaraya çarpar ve bir spektrum üretmek üzere dağıtılır. Izzgaraların dönme pozisyonu tarafından seçilen bir spektrum parçası M5 aynasına tekrar vurur ve bu parçayı monokromatik hale getiren çıkış yarığundan geçer. Ardından, radyasyon M6 aynası üzerinden ikinci monokromatöre yansıtılır ve şekilde gösterilen yolu izlemeye devam eder. Monokromatör 1 ve monokromatör 2’nin döner ızgara tabloları senkronizedir. Çıkış yarığundan sonraki radyasyon yüksek spektral saflık gösterir. Ortak bir demet maskesi demetin kesitini sınırlar. Daha sonra, ışık demeti M7 ve M8 aynalarına çarpar ve bir pencere bir ayna ve iki karanlık parçayı içeren kıyıcıya (chopper) yansıtılmaktadır. Kıyıcı yardımıyla referans ışın, örnek ışın ve karanlık sinyal oluşturulur. Bir dizi aynadan yansdıktan sonra, referans ve örnek ışınlar uygun detektöre ulaşır. Sistemde iki dedektör vardır, bunlar UV / Vis aralığı için bir fotoçoğaltıcı (PMT) ve NIR aralığı için bir kurşun sülfür detektörüdür

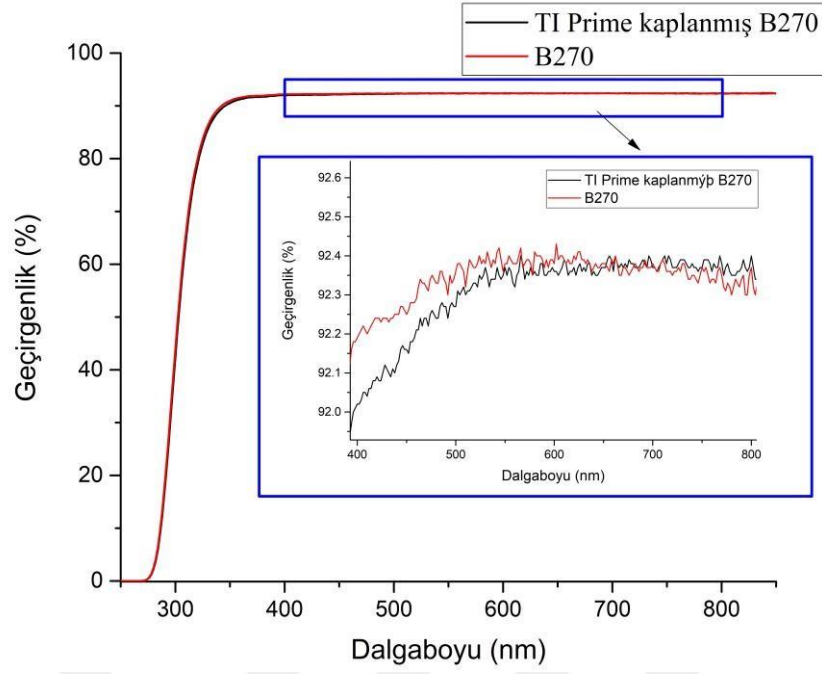
(PbS). Ayna M14 gerekli dedektörü seçmek için kullanılır. Üretim işleminde kullanılan Spektrofotometre Şekil 4.25a’da gösterilmektedir. Perkin Elmer Lambda 950 UV/VIS Spektrofotometre cihazı ile ölçülen geçirgenlik değerleri **Error! Reference source not found.**, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de verilmektedir. Bu ölçümlerden ilki foton eleği üretiminde kullanılacak olan camların geçirgenlik ölçümleridir. Kullanılan iki tip cam içinde geçirgenlik ölçümleri yapılmış ve **Error! Reference source not found.**’da v erilmiştir. Her iki alttaşında geçirgenlik değerleri yakındır bu sonuçlar ile her iki camında foton eleklerinde alttaş olarak kullanılabileceği görülmektedir. Üretim sırasında kullanılan B270 alttaşının geçirgenlik değeri ile nikel gümüş incefilm kaplaması ile

oluşan geçirgenlik değeri Şekil 4.26’da verilmektedir. Foton eleklerinin yapısında kullanılması gereken filmlerin istenilen çalışma aralığında opak olması gerekmektedir. Bu özelliği sağlamak amacıyla kaplanan ince filmlerin geçirgenlik spektrumu ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4.26 Üzeri Ni-Ag ince film kaplamasına sahip olan ve olmayan B270 test camının geçirgenlik grafiği.

Negatif fotoduyarlı malzemelerin alttaşlara yapışmaları sırasında karşılaşılan zorlukları yenmek amacıyla yapıştırma artırıcılar kullanılmaktadır. Her ne kadar ışığın geçeceği deliklerdeki fotoduyarlılar silinse de bu malzemenin cam yüzeyine tutunması ve silinmemesi söz konusudur. Işığın geçeceği alanlardaki malzemelerin geçirgenliği düşürmesi söz konusu olduğundan bu malzemenin geçirgenlik ölçümü yapılmıştır. Ti Prime yapıştırma artırıcının ve kaplanmamış olan B270 alttaşın geçirgenlik spektrumu Şekil 4.27’de verilmiştir. Yapılan ölçüm sonucunda Ti Prime malzemesi ile kaplanan alttaşın istenilen çalışma aralığındaki optik geçirgenlik değerini neredeyse hiç düşürmediği ve bu işlem için uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 4.27 Üzeri Ti Prime kaplamasına sahip olan ve olmayan B270 test camının geçirgenlik grafiği.

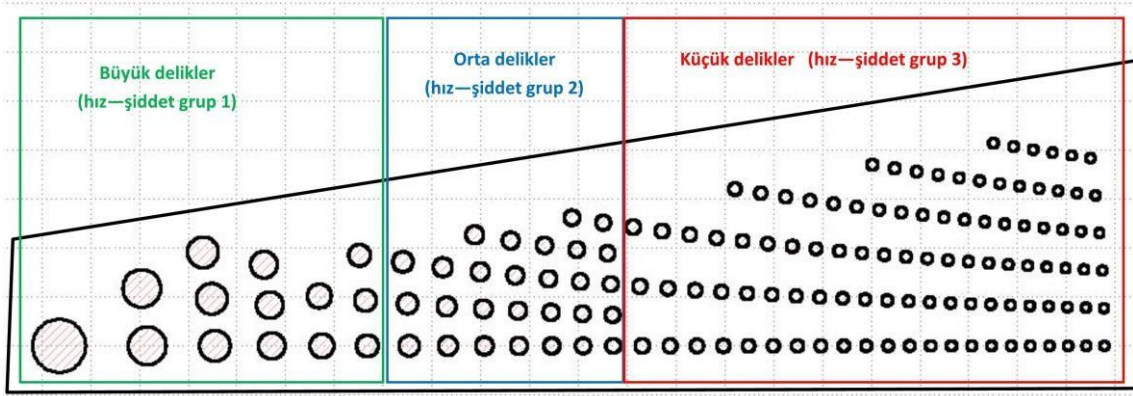
Yapılan ölçümler sonucunda HMDS malzemesi için de benzer sonuçlar ölçülmektedir. Çalışmaların büyük bir çoğunluğunda Ti Prime malzemesi kullanılmıştır.

5. SONUÇ VE YORUM

Bu bölümde çalışmalar kapsamında yapılan ölçüm sonuçları ve analizler verilmektedir. Foton eleği üretim bölümünde (Bölüm 4.) verilen üretim yöntemlerin ayrıntılı bir analizi ile foton eleği üretiminde fotolitografi tekniğinin üretim sonuçları bu bölümde tartışılmaktadır. Ayrıca bu bölümde çalışmalar kapsamında geliştirilmiş hızlı üretim tekniği Bölüm 5.2’de tanıtılmıştır. Üretim sonucunda meydana gelen üretim tasarım farklılıklarından meydana gelen optik performans değişimleri Bölüm 5.6.’te simülasyonlar yardımı ile analiz edilmektedir.

5.1. Üretim Sonuçları

Fotolitografi tekniği ile üretilen foton eleği yapısında üretim işlemleri süresince karşılaşılan ve işlem basamaklarını optimize ederek çözülen temel problemler Bölüm 5.2.'de verilmektedir. Bu hata mekanizmaları yanında alt yöntemlerin de kendi içlerindeki hata mekanizmaları ve optimize edilmiş çözüm yolları deneysel üretim sonuçları ile ilerideki bölümlerinde verilmektedir. Tüm üretimler sırasında tasarlanmış bir foton eleği için üretimler yapılmıştır. Üretimlerin daha hızlı olması adına yapılan çalışmalarda foton eleği yapısının sadece bir parçası kullanılarak iyileştirme çalışmaları sürdürülmüştür. Tasarlanan parça foton eleğinde her bir bölgenin sonuçlarının net görülebileceği ve hata mekanizmalarının birden fazla kez tespit edileceği sayıda delik yapısı vardır. Tasarlanan parça foton eleği Şekil 5.1'de verilmektedir. Bu tasarımdaki bölgeler iyileştirme çalışmaları sırasında yapısal analiz ve desenlendirme analizleri sonucunda belirlenmiştir. Her bölgedeki delik sayısı yapılan öncül çalışmalar sonucunda saptanmıştır. Toplam delik sayısının belirlenmesinde iki faktör göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan ilki hızlı üretimler için minimum delik sayısı diğeri ise hata mekanizmalarının net anlaşılmasına yetecek benzer yapı sayısıdır.



Şekil 5.1 Foton eleği parçasının üretim parametrelerine göre gruplara ayrılmış üç bölgesi.

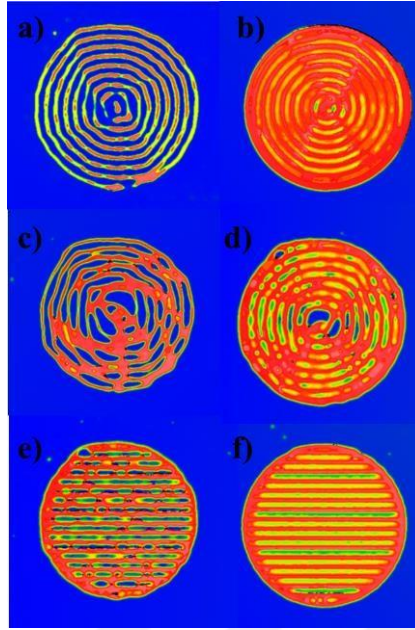
Şekil 5.1'de verilen üç bölge içinde farklı yazım desenlendirme parametreleri kullanılmaktadır. Temel amaç her bir bölge için en iyi desenlendirme parametresinin her iki alt uygulama için de elde edilmesidir. Bölgelerdeki delik sayıları ve bölge sınırları belirlenirken her iki fotoduyarlılığın da desenlendirme tepkilerine ayrıca bakılmıştır.

5.2. Optik Litografi Hata Mekanizmaları

Fotolitografi tekniğindeki hata mekanizmaları ve çözüm tekniklerini araştırmak için deneysel çalışmalar iki bölümde incelenmiştir. Foton eleği üretiminde literatürde kullanılan tekniklerin çoğu elektron demeti üretim tekniğidir [19,20], [97], [18]. Elektron demeti üretim yöntemi ile benzer bir üretim tekniği olan maskesiz yazıcı ile üretilen foton eleklerinin üretim aşamasında elektron demeti yöntemine göre farklı mekanizmalar elde edilmektedir. Özellikle sonuçlara bakıldığında üretim tekniğinin çözünürlüğünün sınırı bu tekniği üretim sürecindeki hata mekanizmalarının çözümü açısından daha keskin bir şekilde sınırlandırmaktadır. Çalışmalarda hata mekanizmaları ikiye ayrılmıştır. Bu mekanizmalar desenlendirme mekanizmaları ve geriye kalan litografi adımları olarak ayrılmaktadır. Desenlendirme amacıyla kullanılan cihaz bir maskesiz yazıcı olduğundan literatürde bu tip litografi teknikleri ile ilgili gelişmeler hala devam etmektedir [70]. Öte yandan hem kimyasal aşındırma tekniği hem de düşürme tekniği mikroelektronik alanında uzun süredir kullanılmasına rağmen mikro optik üretimde gelişimleri devam etmektedir. Bu alanda yapıların kalitesi diğer alanlardaki çalışmalara göre daha fazla önem taşımaktadır. Örnek vermek gerekirse mikroelektronik alanında üretilen yapılardaki sınırlandırmalar ile mikro optikteki sınırlandırmalar arasında oldukça büyük bir fark olmaktadır. Bunun temel sebebi mikro optikte yapılarla ışığın etkileşmesi ve etkileşecek olan dalgaboyunun mertebesindeki değişimin yapıların kalite gereksinimini oldukça artırmasıdır. Çalışmalarda ilk olarak maskesiz yazıcı parametreleri üzerinde durulmuştur. Maskesiz yazıcı ile üretilen desenlerin her biri ikincil işlem adımı olan düşürme işlemine geçilmeden önce hem optik mikroskop yöntemi hem de optik profilometre yöntemi ile incelenmiştir. Bu iki yöntem ile incelenen örneklerde maskesiz litografi desenlendirme ile meydana gelen hataların incelenmesi amaçlanmıştır. Bölüm 4.'te verilen bilgiler kullanılarak üretilen foton eleği yapıları bu bölümde deneysel yöntemler ile test edilerek analiz edilmiştir.

5.3. Maskesiz Yazıcı Desenlendirme Mekanizmaları

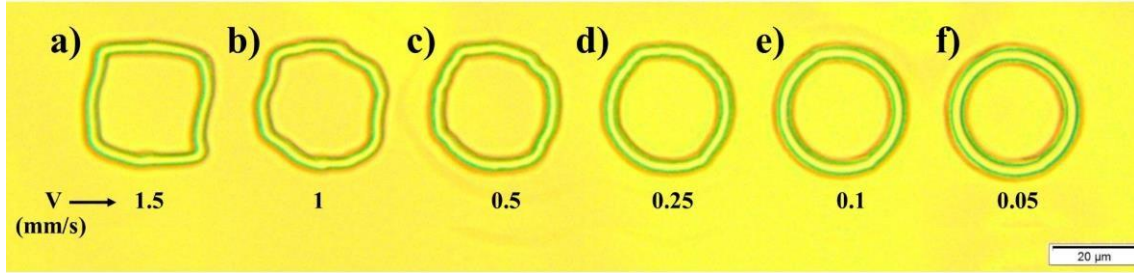
Kullanılan litografi sistemindeki değişken parametreler, odak mesafesi, demet gücü ve hareketli tabla hızı olarak üç ana başlıkta incelenebilmektedir. Optik litografi yönteminde bu üç ana başlıkta birinci olarak soğurulan ışık miktarını etkilemektedir. Daha önceki bölümlerde çizgi genişliği olarak irdelenmiş olan olgu fotoduyarlı malzeme üzerinde soğurulan ışık miktarının bir sonucudur. Şekil 4.19’da verilen grafiklerde çizgi genişliği hem hareketli tabla hızına hem de şiddete bağlı olarak incelenmiştir. Bu grafiklerin ortaya çıkardığı sonuç soğurulan ışık miktarı değişimin yapıda genişlemeye sebep olduğudur. Kullanılan fotoduyarlılar her ne kadar pozlanmak için bir eşik değerine ihtiyaç duysa da az pozlanan alanlarında ortaya çıkması mümkündür. Bu tip durumlarda yeterince pozlanmayan fotoduyarlıların tab etme veya silme işlemlerinde çeşitli hata mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Sistem parametreleri ile testler sırasında hem hız hem de şiddet değiştirilerek testler yapılmıştır. Her ikisinde desen kusurları haricinde ortaya çıkan sonuç yeterince pozlanmayan yapıların ortaya çıkardığı ince veya pozlanmamış fotoduyarlı yapılarıdır. Hızlı yazılan (yazma hızı > 2 mm/s) örneklerdeki yetersiz pozlama olayının bir örneği Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.2’de verilen optik profilometre görüntüleri desenlendirilmiş ve tab edilmiş olan örneklerin görüntüsüdür. Kullanılan fotoduyarlı malzeme negatif duyarlı olan nLOF2020 malzemesidir. Bu malzemenin duyarlılığı pozitif malzemeye göre fazla olması ve diğer yandan çizilen desenin polimerize olarak tab işleminden sonra altta kalmaması sebebiyle çizilen desenler net ayırt edilebilmektedir.



Şekil 5.2 Litografi işleminde desenlendirme sırasındaki hız değişimi ile oluşan fotoduyarlı malzeme yüksekliği değişimi (sabit enerji modülasyonu, a), c) ve e) hızları 1.5 mm/s, b), d) ve f) hızları 0.5 mm/s'dir).

Şekil 5.2'de verilen optik profilometre görüntüsünde üç farklı desen çizme yöntemi ile oluşturulmuş foton eleği delik yapıları görülmektedir (Bkz. Şekil 4.20). Şekil 5.2 a, c ve e görüntülerinde yüksek hız (1.5 mm/s) ile yazılmış deliklerdeki fotoduyarlı malzeme üç boyutlu yüzey şekillenimi görülmektedir. Bazı bölgelerde yüksekliğin daha fazla bazı bölgelerde daha az olduğu renklendirme ile kolayca anlaşılmaktadır. Bu örneklerin hızlarının yavaşlatılmasıyla ortaya çıkan fotoduyarlı malzeme yükseklikleri Şekil 5.2 b, d ve f 'de verilmektedir. Her bir yöntem için daha yavaş hızda (0.5 mm/s) yazılan delik desenlerindeki soğurulan ışık miktarının artmış ve bu sebeple de duyarlı yüksekliklerinin de artmış olduğu görülmektedir. Öte yandan daha hızlı desen basımı yükseltilecek hızların da desenlendirme de dezavantajları vardır. Maskesiz yazıcı yöntemi daha çok bir prototipleme yöntemi olarak kullanılmakta ve geniş alan ve tekrarlı işlemlerde oldukça yavaş kalmaktadır. Bu sebepler göz önünde bulundurulduğunda hareketli tabla hızı artırılarak desenlendirme hızlandırılabilir. Bu durumda ortaya çıkan çeşitli problemlerden biri şiddet iyileştirmesi gerekliliği olurken (Bkz. Şekil 5.2) diğeri ise mikro ölçekteki yapıların şekillenimi olmaktadır. Yüksek hızlarda meydana gelen şekil bozuklukları özellikle mikro optikler için önemli bir problemdir. Şekil 5.3'te değişik hızlarda yazılan

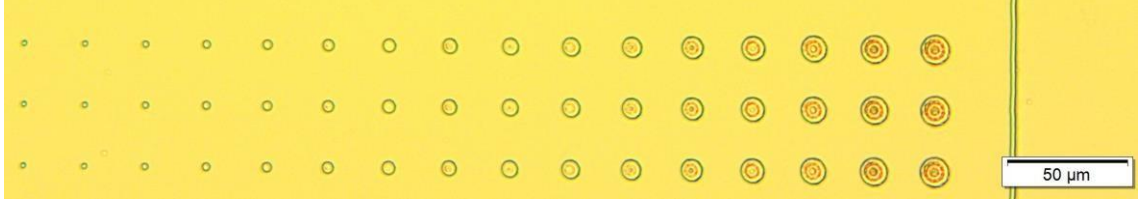
delik konturlarının optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Hızların giderek yavaşlamasıyla şekillerin düzeldiği net bir biçimde mikroskop görüntülerinden görülmektedir. Öte yandan daha küçük skalalarda hızların daha da azaltılması gerekir.



Şekil 5.3 Litografi sistemi yazım hızı (hareketli tabla hızı) ile delik desenlerindeki geometrik değişimler.

Hız ve şiddet gibi parametreler yanında diğer bir önemli parametre de odak mesafesidir. Odak mesafesinin değişmesi ile demet çapı değişmektedir. Buradaki önemli problem ise değişen demet çapı ile kullanılan sabit hız sabit şiddet parametrelerin fotoduyarlı için fazla veya az enerji soğurma durumunu ortaya çıkarmasıdır. Odak ayarı sistemde ilk olarak demet çapını etkilemektedir. Demet çapının büyüdüğü durumlarda çizgi genişliği artmakta fakat birim alana düşen enerji miktarı azalmaktadır. Diğer durumda ise demet çapının azalması ile birim alandaki enerji miktarı artmaktadır. Her iki durumda da bir hata mekanizması ortaya çıkmaktadır. Özellikle enerjinin arttığı durumlarda hassas çap kontrolü sağlanamamış olur ve bu durumda deliklerde genişleme görülür. Aynı sebep ile fotoduyarlı malzeme yüksekliğindeki değişim sonraki işlemleri olumsuz etkilemektedir. Fotoduyarlılığının yüksekliğindeki azalmanın düşürme ve kimyasal aşındırma tekniklerindeki hata mekanizmalarını nasıl etkilediği Bölüm 5.4.1. ve 5.4.2.’de anlatılmaktadır. Odak değişiminde desenlendirilecek olan bölge alanının değişimi Şekil 4.17’de açıklanmaktadır. Buradan yola çıkarak yapılan deneylerde demet çapının artmasıyla birim alana düşen enerjinin azaldığı saptanmıştır. Bu azalmanın alanın yarıçapının karesi ile orantılı olduğu da bilinmektedir [70]. Yapılan ilk testler ile birlikte demet çapı değişimi ile fotoduyarlı katman desenlerine ve yüksekliklerine bakılmıştır. Şekil 5.4’te tek noktaya yönlendirilen bir demetin odak uzaklığı artıkça sergilediği davranış görülmektedir. Öte yandan bu davranışın nasıl değiştiği hesaplanıp

parametrelerdeki değerler değiştirilerek çeşitli testler yapılmıştır. Özellikle yazım hızları sabit tutularak demet şiddetleri üzerinde testler yapılmıştır.

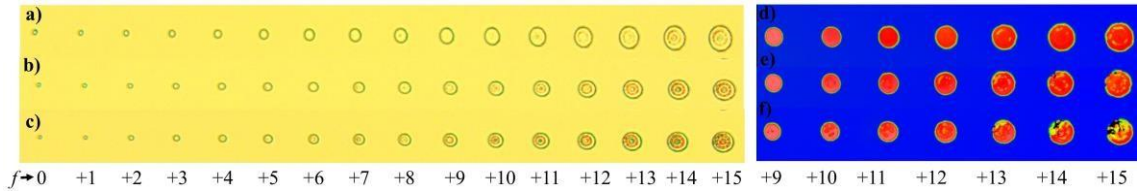


şekil 5.4 Litografi sistemi objektif odak mesafesi değişimi ile delik desenlerindeki değişimi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 10X, skala 50μm).

İlk olarak önerilen model olan r^2 yasası ile hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama eşitliği,

$$M_2 = M_1 \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad 5.1$$

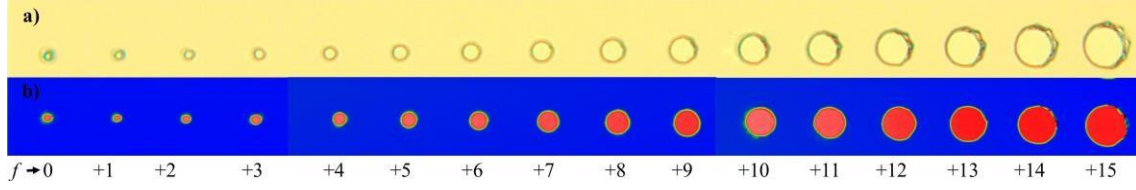
Burada M_2 istenilen enerji modülasyonu veya şiddeti, M_1 ilk modülasyon, r_1 ilk çap ve r_2 odak değişimi ile değişen aptır. Kullanılan objektiflere göre yapılan hesaplamalarda 15 μm'lik bir kaymanın şiddette büyük bir değişiklik yaratması ve kamera görüntüsündeki odağın tamamen kayması sebebiyle sınır değeri olarak bu değer kullanılmıştır. Aynı hız değerlerinde maksimum çapı pozlayabilen minimum şiddet için çalışmalar deneysel olarak yapılmıştır. Bu alışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar şekil 5.5'te verilmektedir.



şekil 5.5 Foton eleği delikleri optik mikroskop görüntüleri hız:0.005mm/s şiddet a) 75 (bağıl) b) 50 (bağıl) c) 25 (bağıl), optik profilometre görüntüleri hız:0.005mm/s şiddet d) 75 (bağıl) e) 50 (bağıl) f) 25 (bağıl), odak değişimi 0-15μm.

Litografi işleminde izlenecek adımlar için tüm yapıların aynı yükseklikte olması oldukça önemlidir. Bu sebeple yapılan çalışmalar ile aynı yüksekliklerin eldesi için odak mesafesine göre hesaplamalar ve testler yapılmış 0-15 μm arasındaki pozlama enerji

ihtiyaçları saptanmıştır. Şekil 5.6'da minimum enerji ihtiyaçları ile pozlanan ve aynı yükseklikte olan foton eleği delikleri gösterilmektedir.

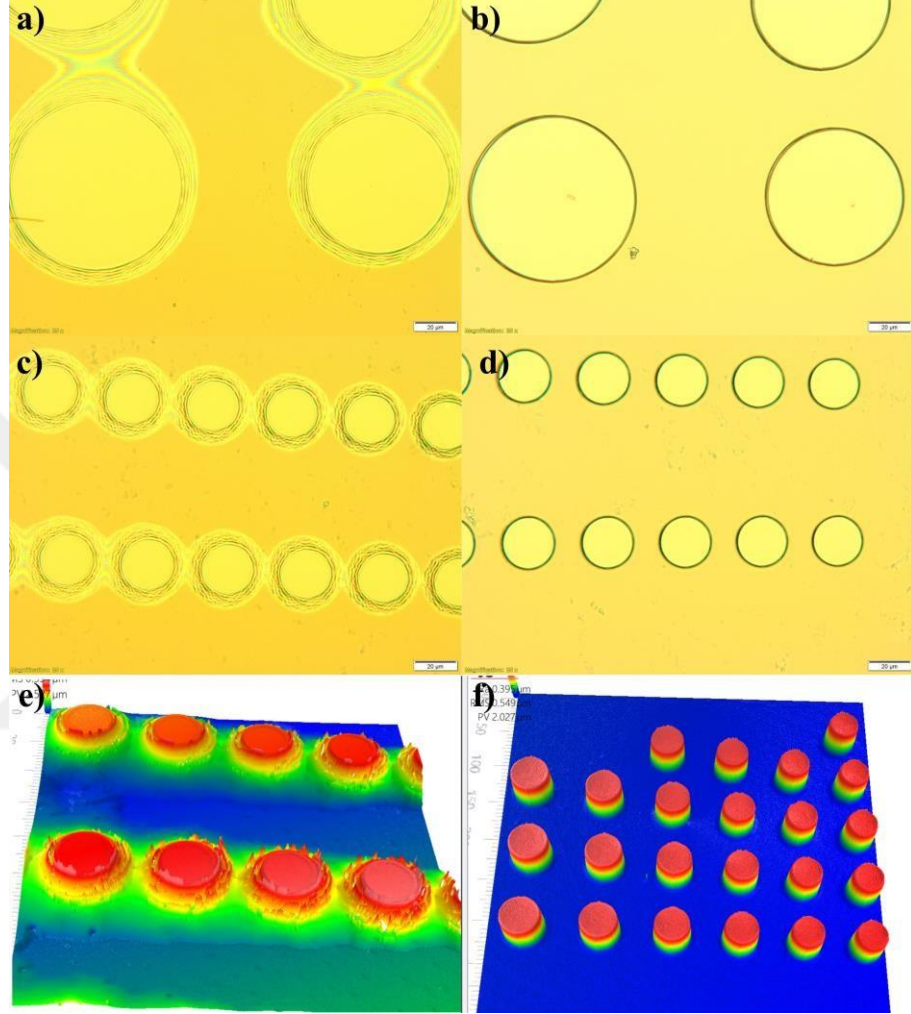


Şekil 5.6 Foton eleği delikleri desenlendirilmesinde 0-15µm'lik odak değişimi a) optik mikroskop görüntüleri b) optik profilometre görüntüleri.

Odaklama faktörünün enerji dışında diğer problemleri fazla yansımalar ve aşırı ince yapılarıdır. Daha önce de belirtildiği gibi tüm parametrelerin ortak noktası soğurulan ışık miktarıdır. Soğurulan ışık miktarının artışı yapılarda genişlemeye sebep olur. Bu durum foton elekleri gibi birbirine yakın birçok küçük yapıyı barındıran sistemler için tehlikeli bir durumdur. Litografi işlemini çok fazla etkileyen durumlardan ikisi fazla genişlemiş yapılar ve aşırı incelmış yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle foton eleği yapıları düşünüldüğünde fazla pozlanan alanların birbirine girmesi ve az pozlanan alanlarda yapıların tutunamaması ortaya çıkmaktadır. Her iki durum da desenlendirme işleminde gelen birer hata kaynağıdır.

Aşırı şiddetli veya hatalı odak mesafesine sahip desenlenirmelerde fotoduyarlı malzeme ile etkileşen demet fotoduyarlı içinde yayılır. Bu yayılmanın sonucu olarak desende genişlemeler meydana gelir. Bu iki durum farklı şekillerde açıklanabilir. İlk olarak yüksek şiddetli desenlendirmede çizgi genişliğinin arttığı bilinmektedir. Bunun temel sebebi daha fazla enerjinin fotoduyarlı tarafından soğurulmasıdır. Fotoduyarlı içinde ilerleyen demet pozlaması gereken alandan daha fazla alan pozlayarak yoluna devam eder. Foton eleklerinde bu olayın sonucu olarak genişleyen ve birbirine giderek yaklaşan delikler demektir. Bu durumun düzeltilmesi için şiddet iyileştirmesi yapılması gerekmektedir. Foton eleği yapısında tasarımlara bağlı olarak 10 µm'den 120 µm'ye kadar değişen delikler vardır. Aynı parametrelerle yazılan deliklerde şiddet farkından doğacak olan desen genişlemeleri kaçınılmaz olmaktadır. Bu sebeple yazılan desenlerin gruplara ayrılması ve her biri için farklı hız ve şiddet değerleri kullanılması gerekmektedir. Aynı hız, şiddet ve odak mesafesi kullanılan örneklerde boyutsal olarak büyükten küçüğe

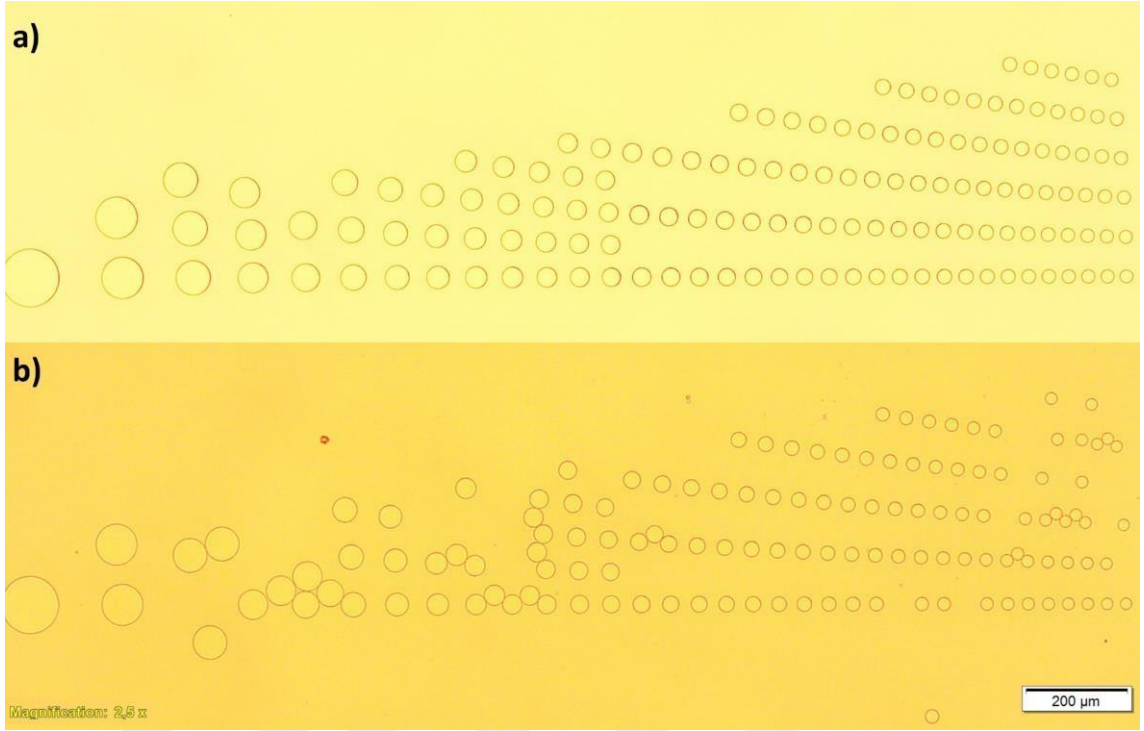
gidildikçe iç içe girmelerin arttığı gözlenmektedir. Bunun temel sebebi küçük alanlara gelen fazla şiddet dağılımıdır. İyileştirme çalışmaları ile elde edilen delik yapıları Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Bu deneylerde hız ve odak sabit bırakılıp şiddet değerleri değiştirilmiştir.



Şekil 5.7 Farklı şiddet dağılımlarına sahip desenlendirme işlemi sonrasında oluşan delik yapıları optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 25X, skala 20µm). Büyük delikler (>100µm) a) yüksek şiddet ile desenlendirme örnekleri b) optimum şiddet ile desenlendirme örnekleri, küçük delikler (10-20µm) c) yüksek şiddet ile desenlendirme örnekleri d) optimum şiddet ile desenlendirme örnekleri, küçük delikler optik profilometre görüntüleri e) yüksek şiddet ile desenlendirme örnekleri f) optimum şiddet ile desenlendirme örnekleri.

Şekil 5.7’de verilen optik mikroskop görüntüsünde Şekil 5.7a ve Şekil 5.7b görselleri büyük çaplı deliklerin ($>100\ \mu\text{m}$), Şekil 5.7c ve Şekil 5.7d’deki görseller küçük çaplı deliklerin ($10\text{-}20\ \mu\text{m}$) optik mikroskop görüntüleridir. Sadece şiddet değişimi ile yapılar birbirinden rahatlıkla ayrılabilir konuma gelmektedirler. Deliklerin daha yakın olduğu tasarımlarda ise sadece şiddet değerlerinin düzenlenmesi yetersiz kalabilmektedir. Şekil 5.7’de verilen büyük ve küçük çaplı deliklerin malzeme yüksekliklerindeki değişimler optik profilometre yöntemi ile ölçülmüş ve sonuçta birleşmelerin nasıl olduğu gözlenmiştir. Şiddet değişimi ile geliştirilen örneklerin profilometre görüntüleri Şekil 5.7e ve Şekil 5.7f’de verilmektedir.

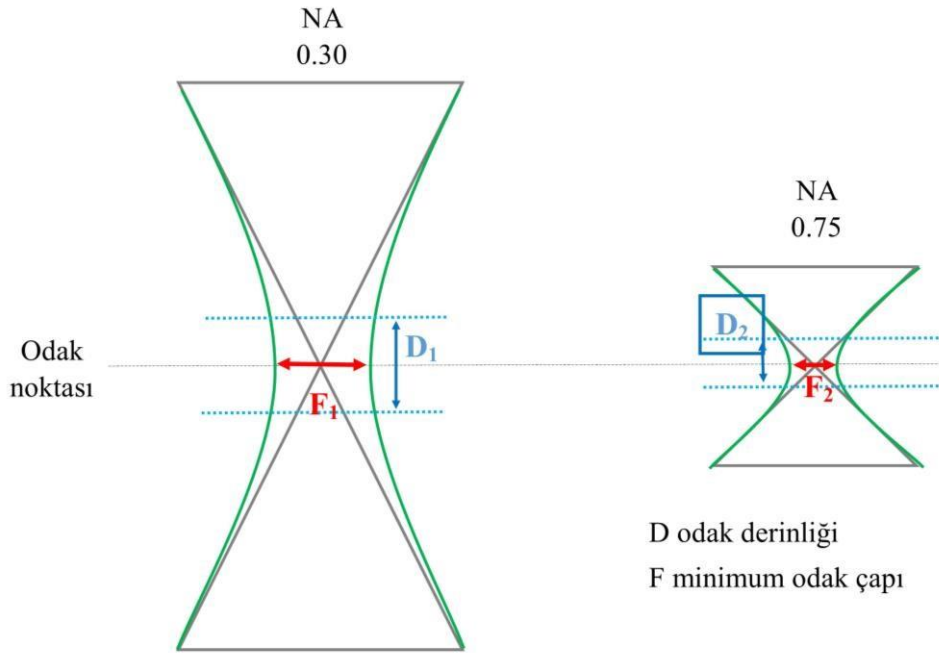
Düşük şiddette yazılan örneklerde oluşan en temel problem yapıların altına tutunamaması ve tab işleminde silinmeleridir. Bu durumları önlemek için yapıştırma artırıcılar kullanılsa da yeterince pozlanamayan yapılar giderek silinmekte ve foton leklerinde boş bölgelerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu tip problemler şiddet iyileştirmesi ile çözülmesi ve tüm deliklerin bir sonraki işlem için hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Aynı problem fazla tab etme işlemi ile de ortaya çıkmaktadır. Fakat buradaki problem yetersiz enerjiden kaynaklanmakta olduğu için yapının boyutu haricinde fotoduyarlılığın yüksekliğindeki yetersizlik yani tam pozlanmamış olma durumu ile ilgilidir. Fazla tab etme durumunda ise ilk silinen örnekler iyi pozlanmış fakat küçük olan delik yapılarıdır.



Şekil 5.8 Foton eleği parçası optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 2.5X, skala 200μm) a) optimum sürede tab edilmiş desenlendirme örneği b) fazla tab edilmiş desenlendirme örneği, tutunamayan yapılar desenlendirme alanında kayarak yer değiştirmektedir.

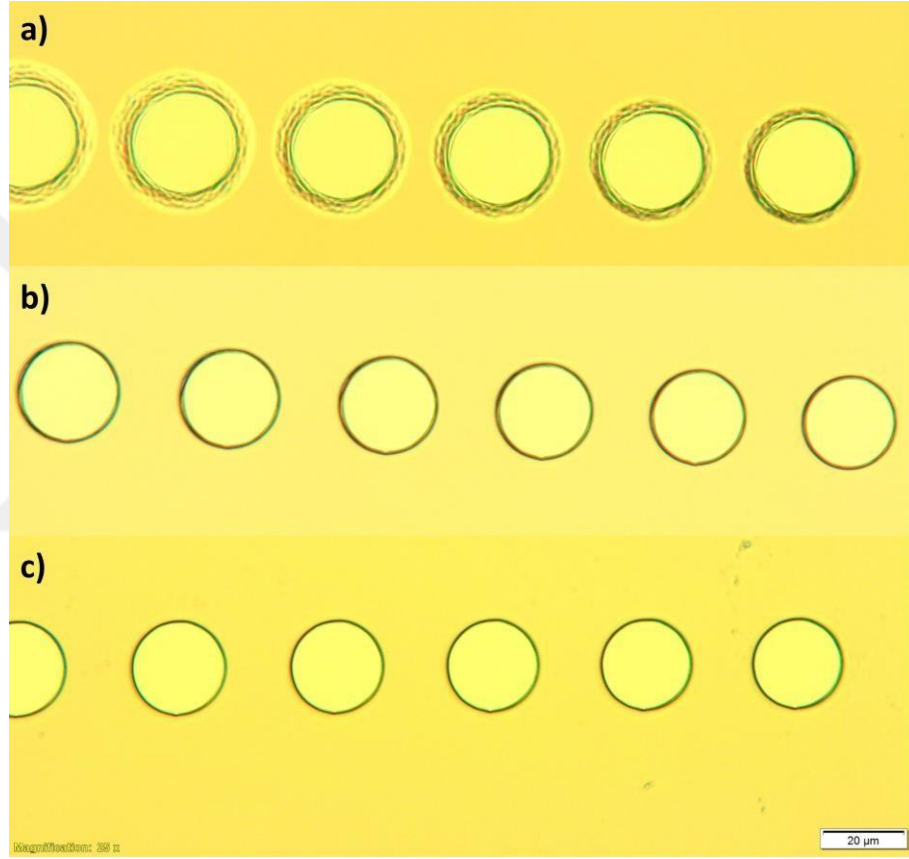
Şekil 5.8a’da verilen yapı iyi yapışmış ve iyi pozlanmış bir foton eleği parçası örneğidir. Şekil 5.8b’de ise aynı parçanın farklı şiddetler ile yazılmış durumu verilmektedir. Yazım şiddetinin azaltılması veya hızın artırılması sonucunda oluşan yetersiz pozlama tab işleminde yapıların yüzmesine ve yer değişmesine sebep olur. Temelde aynı durum iki faktörden dolayı olmaktadır. Bunlar yapışmanın sağlanmaması ve düşük pozlamadır. Bu örneklerde yapışmanın daha iyi sağlanması için yüksek sıcaklık susuzlaştırması (Bkz. Bölüm 4.2.2) ve yapıştırma artıcı malzeme (Bkz. Bölüm 4.2.5) kullanılmıştır. Ortaya çıkan bu kaymalar veya silinme durumları ile birçok kez karşılaşılmış ve optimum şiddet değerleri belirlenmiştir. Üzerinde durulması gereken diğer önemli desenlendirme hata mekanizması da odak mesafesidir. Odak mesafesinin önemi birkaç farklı açıdan incelenebilir. İlk olarak soğurulan ışık miktarını doğrudan etkilemesi özelliğine bakılarak düşük pozlama şiddetlerinde odaktan sapmanın meydana getirdiği negatif etkilerden bahsedilebilir. Bu etkiler ile diğer düşük şiddette ortaya çıkan durumlar yaşanmaktadır. Fakat böyle bir durumun yaşanması için ileri derecede odaktan sapsak gereklidir. Daha

önceki mekanizmalarda bahsedilen 15 μm 'lik sapmalar oldukça yüksek sapmalar olmasına rağmen kullanılan objektifin sayısal açıklığına göre odak sapmalarına bakılması gerekmektedir. Objektiflerin nümerik açıklıkları ve görüş katı açıları göz önüne alındığında büyük nümerik açıklığa sahip örneklerde odaklamanın daha zor ve sapmaların daha ciddi sonuçlar getirdiği bilinmektedir. Üretim sistemde iki farklı objektif kullanılmaktadır. Bu objektiflerin özellikleri Çizelge 4.5'te verilmektedir. Kullanılan objektiflerden 40X büyötmeye sahip olanın katı açısı 10X büyötmeye sahip olan objektiften oldukça büyüktür. Bu odaklama konusunda bir avantaj olsa da odak derinliği açısından bir dezavantaj konumundadır. 10X NA 0.30 objektifteki odak derinliği fazla olduğundan odak mesafesindeki birkaç mikronluk sapmadan (en iyi odak mesafesine göre) hemen hemen hiç etkilenmemektedir. Diğer yandan 40X NA 0.75 objektifte ise birkaç mikronluk sapma çizgi genişliğini yani demet çapını etkilemeye başlamaktadır. Demetteki bel bölgesi adı verilen bölgeye bakıldığında (odaklanmış bir demetteki en ince bölge, odak bölgesi) yüksek nümerik açıklıklarda oldukça dar bir bölge olduğu, düşük nümerik açıklıkta ise daha geniş bir bölge olduğu görölmektedir. Öte yandan bu bölgenin uzunluğu yüksek sayısal açıklıkta daha kısa, düşük sayısal açıklıkta ise daha uzundur. Bu uzunluk odağın değişmeden ne kadar devam ettiğini yani derinliğini vermektedir [35]. Şekil 5.9'da sayısal açıklık ile değişen odak derinliği ve minimum odak çapı gösterilmektedir.



Şekil 5.9 Odak derinliği ve minimum odak çapı sayısal açıklık ilişkisi.

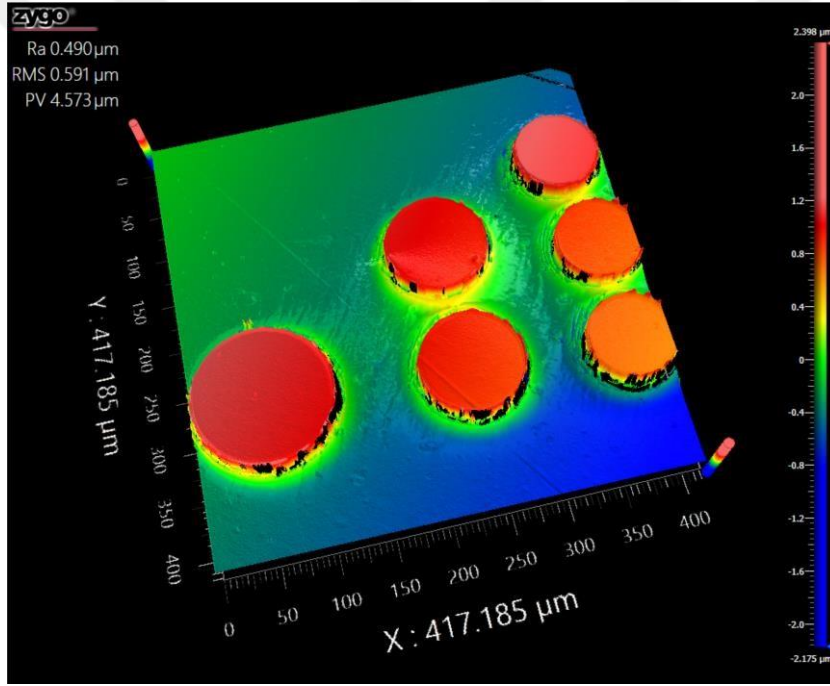
Çalışmalarda her iki objektif ile test yapılmış ve üretimlerin yapısal boyutlar göz önünde bulundurularak 40X NA 0.75 objektif ile yapılmasına karar verilmiştir. Kullanılan 40X objektifteki odak uzaklığının yaklaşık 2 mikronda bozulduğu deneysel olarak test edilmiştir. En iyi odağın yakalanması için yapılan testler sonucunda sabit hız ve şiddet ile elde edilen optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10 Foton eleği desenlendirmesi odak mesafesi değişiminin delik yapısına etkisi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 25X, skala 20µm, f_0 en iyi odak mesafesi) a) en iyi odak mesafesinde 8 µm’lik uzaklıktaki desenlendirme ($f=f_0+8\mu\text{m}$) b) en iyi odak mesafesinde 2 µm’lik uzaklıktaki desenlendirme ($f=f_0+2\mu\text{m}$) c) en iyi odak mesafesi desenlendirmesi ($f=f_0$).

Şekil 5.10’da verilen optik mikroskop görüntülerinde odağın değişmesiyle değişen yapı görüntüleri verilmektedir. İlk olarak Şekil 5.10c’de en net görüntüsü görülmektedir. Aynı

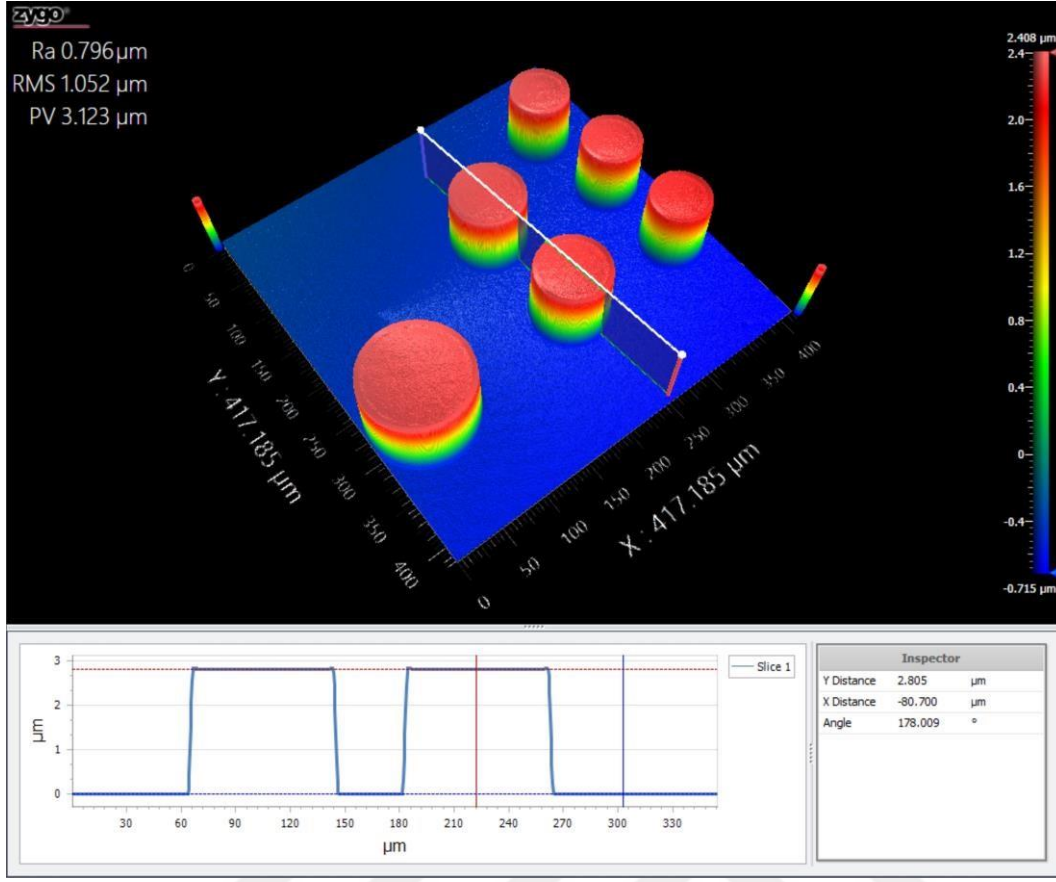
şekilde b ile verilen görüntü en net odağın 2 μm daha üstünde bir odaktan elde edilmiştir. Şekil 5.10a görüntüsünde ise 8 μm 'lik bir farka sahip odak mesafesi verilmektedir. Yeterince yüksek enerjilerde belirginliği azalan bu genişleme ve yapı bozulması kritik şiddetlerde kendini daha net belli etmektedir. Şekil 5.10b ve c görüntüleri arasında oldukça az fark vardır bunun temel sebebi bu iki mesafenin neredeyse odak derinliği (NA 0.75, λ 375nm ve büyütme faktörü 40X için yaklaşık 2 μm) içinde kalmasıdır. Bu objektif için odak derinliğinden yaklaşık 2 μm 'de çıkıldığı savunulabilir. Odak dışındaki ve kritik şiddetlerde yazılan deliklerin yapılarında da bozukluklar meydana gelmektedir. Bu yapı bozuklukları özellikle daha sonraki adımlardaki düşürme işlemlerinde hata mekanizmalarına da sebep olmaktadır. Şekil 5.10a'da oluşan yapının daha büyük deliklerdeki karşılığı olan optik profilometre görüntüsü Şekil 5.11'de verilmektedir.



Şekil 5.11 Kritik şiddette, odak mesafesi ($f=f_0$) dışında desenlendirilmiş fotoduyarlı tabaksı optik profilometre görüntüsü (büyük delikler $\sim 100 \mu\text{m}$).

Odaktan kaymaların yarattığı diğer bir hata mekanizması yansımaların artması ve istenmeyen bölgelerdeki pozlanmaların ortaya çıkmasıdır. Özellikle yüksek nümerik açıklıklarda bu durum daha keskin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Odaktan küçük sapmalar (3-5 μm) oluşturulan yapıların kenarlarında pozlanmalara sebep olur (Bkz. Şekil 5.11). Bu bölgelerdeki pozlanma gerçek birer pozlanma olmadığından yapılardaki

yükseklik oldukça azdır. Özellikle kalın fotoduyarlı katmanlarında daha çok ortaya çıkmakla birlikte kimyasal aşındırma işlemlerinde metalik katmanın altta olması bu yansımaları artırmaktadır. İstenmeyen bölgeler dışında odak mekanizmasının sebep olduğu diğer bir kusur mekanizması yapılardaki duvar şekillenimidir. Burada yine sayısal açıklık etkisi daha net görülmektedir. Demetin şekli göz önüne alındığında yüksek sayısal açıklıklardaki açı daha fazla olduğundan demetin şeklide üçgene daha çok benzemektedir. Çift taraflı bir üçgen deseni düşünüldüğünde en dar bölümü haricindeki her nokta üçgen şeklindedir. Bu şekilde pozlanan fotoduyarlı yapı da tab edildikten sonra bu davranışı gösterir. Bu davranışların her biri kritik şiddette ortaya çıktığından çoğu zaman göz ardı edilir. Oluşan desenler ile bir sonraki adıma geçildiğinde ise bu şekillenimin etkisi daha fazla belirli hale gelmektedir. Şekillenimin süreçte meydana getirdiği hata mekanizmaları kimyasal aşındırma ve düşürme işlemlerinde daha detaylı olarak verilecektir. Odak mesafesi iyi saptanmış bir objektif ile yazılan desenlerde beklenen duvar şekli negatif açıdaki duvar yapısıdır (negatif fotoduyarlı ile kaplanmış örneklerde). Optik profilometre yönteminin doğası gereği, yansımalar ile çalışan bir sistem olduğundan desenlerdeki negatif duvar yapılarının görülmesi genellikle mümkün olmamaktadır. Bunun yerine duvarları alttaşa dik olan örneklerden elde edilen sonuçların sonraki işlemler için en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.12’de düzgün duvar yapısına sahip örneğin optik profilometre görüntüsü verilmektedir. Negatif fotoduyarlı için ideal duvar yapısı negatif açılı olsa da dik açya yakın olan açılardan da iyi sonuçlar alınabilmektedir. Şekil 5.12’de verilen duvar yapısı yanında şeklin yüksekliği de kaplanan fotoduyarlı yapısıyla aynı mertebededir. Bu durum hem iyi odak mesafesine hem de iyi bir pozlama enerjisine sahip örneğin elde edildiğini göstermektedir.

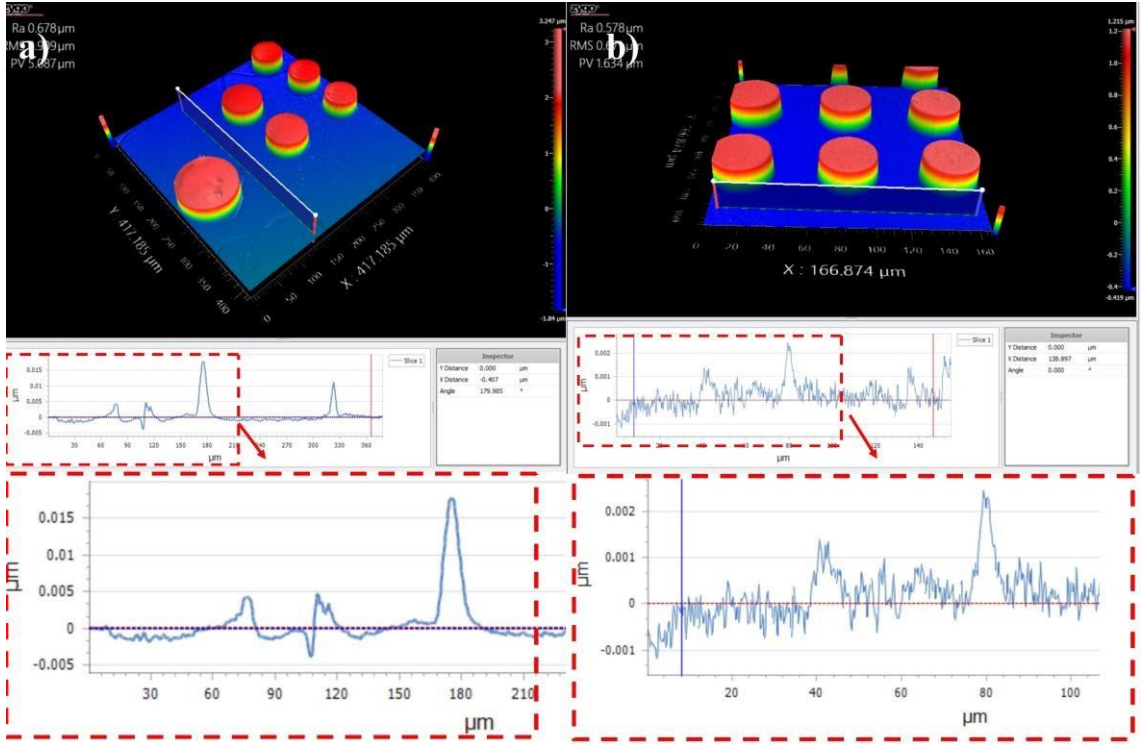


Şekil 5.12 Optimum odak mesafesi ve şiddette desenlendirilmiş bir delik yapısının optik profilometre görüntüsü.

5.4. Litografi İşlem Adımları Mekanizmaları

Litografi yönteminde desenlendirme işlemi haricinde oluşan hata mekanizmaları genellikle döner kaplama parametreleri, tab etme süresi ve malzemesi ve tavlama sıcaklıkları gibi işlem adımları sırasında oluşur. Bu hata mekanizmalarının bazıları desenlendirme ile ilişkilendirilebilir. Bu bölümde verilen işlem adımları arasındaki en önemli adım tab etme işlemidir. Tab etme işleminde ilk olarak önceden pozlanan desen tab edilir. Bu işlemde meydana gelen ilk problem fazla tab etme süresidir. Mikron başına sürelerle ifade edilen bu işlem de yüksek tab süresi istenmeyen silinmelere ve bazı bölgelerdeki yapı kayıplarına sebep olur. Bölüm 5.3’de Şekil 5.8’de verilen deliklerin kayması ya da tamamen yok olması bu tip hata mekanizmalarında da mümkündür. Özellikle fazla tab etme sürelerinde yapılar incelerek farklı iki hata mekanizmasının oluşumuna sebep olmaktadır. Biri daha öncede bahsedildiği gibi tutunamayan veya tamamen silinen yapılardır. İkinci ise düşürme işlemini tehlikeye atan yapı yüksekliğinin

azalmasıdır. Bu tip hata mekanizması bir sonraki bölümde tartışılacaktır. Diğer yandan tab etme süresinin düşük olması üretimde kir yapılarını ve bu bölgelerde oluşan silinmeleri getirmektedir. İstenmeyen bölgelerdeki silinmeler tıpkı istenmeyen bölgelerdeki desenlendirmeler veya pozlandırmalar gibi delik yapısını bozmakla kalmamakta bunun yanında delik olmayan bölgelerden ışık geçmesinin de önünü açmaktadır. Tab etme işleminden sonra desenlendirilmemiş yüzeylerde herhangi bir fotoduyarlı kalıntısının kalmaması gerekmektedir. Bu hata mekanizması hem düşürme hem de kimyasal aşındırma süreçlerinde etkin rol oynamaktadır. Şekil 5.13’de optik profilometre ile alınmış yüzey görüntüleri verilmektedir.



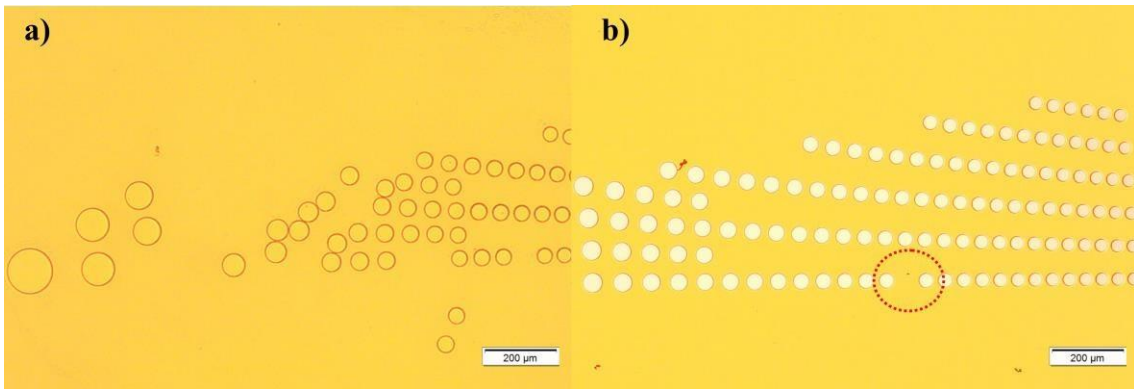
Şekil 5.13 Foton eleği delik desenlendirmesi çevresinde oluşan kirlenme bölgesi optik profilometre görüntüleri a) yüksekliği 20-25nm olan kalıntı tabakası b) pürüz seviyesi ~3nm olan kalıntı izine rastlanmayan delik bölgesi.

Şekil 5.13a’da foton eleği delikleri çevresinde oluşan kalıntı fotoduyarlıların optik profilometre görüntüsü verilmektedir. Şekil 5.13a’da verilen kalıntı yüksekliği 20-25 nm arasında değişmektedir. Buradaki örneğin üzerine kaplanacak ince film ve bu ince filmin kalınlığına göre bu kir seviyesi düşürme işleminde problem yaratabilmektedir. Şekil

5.13b’de ise foton eleği delikleri çevresinde temiz bir alanın görüntüsü verilmektedir. Buradaki yapıya bakıldığında yaklaşık 2-3 nm’lik bir pürüzlülük saptanmaktadır. Bu pürüzlülük alttaşın yapısından gelmektedir ve bu bölgede herhangi bir kalıntı kalmamıştır.

Litografi işleminde tab etme öncesi sıcaklıkları önemli parametrelerdir. Bu sıcaklıklardaki değişimler fotoduyarlı malzemenin yüzeyden sıyrılmasına veya yüzeye kalıcı olarak tutunmasına sebep olur. Her iki durum da istenmeyen hata mekanizmalarıdır.

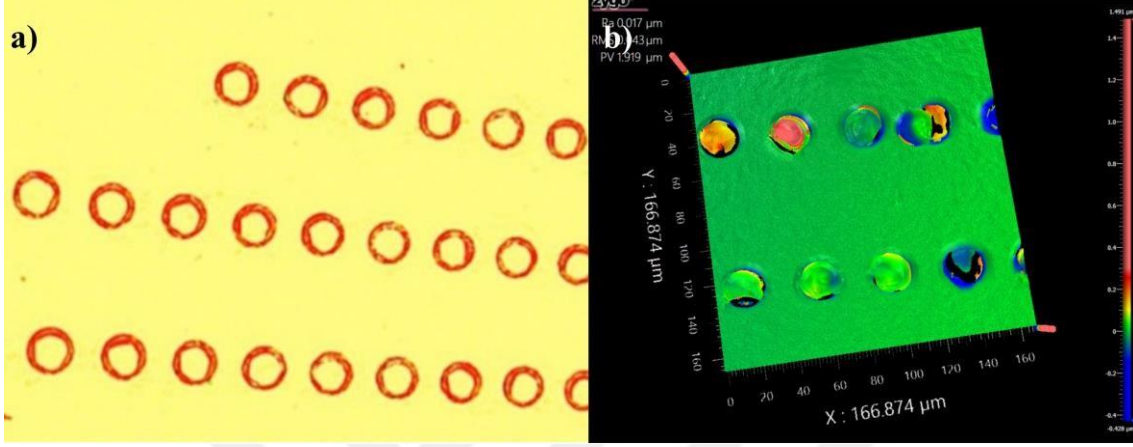
İlk olarak düşük sıcaklıklarda ön tavlama yapılan örneklerde iki farklı yol ile yapışmanın önlendiği görülmektedir. Bunlardan ilki fotoduyarlı kaplanmadan önceki susuzlaştırma işlemidir. Üretilen örneklerde yapıştırma artırıcı malzemenin kullanılmaması durumunda fotoduyarlı yüzeye tam olarak tutunamamakta ve desenlendirme işleminden sonra yüzeyden kaymaktadır. Burada meydana gelen kayma işlemi polimerize olan bir yapının kaymasıdır. Bu tür silinme ve kaymalarda yapı alttaşın başka bir bölgesine yapışmış olarak ortaya çıkmaktadır. Öte yandan susuzlaştırılmış veya yapıştırma artırıcı kullanılmış örneklerde durum daha değişiktir. Bu örneklerdeki silinme mekanizması desenlendirme sonrasındaki ısıtma ile alakalıdır. Bir fotoduyarlının içindeki çözücünün tamamen buharlaşması ve polimerizasyonun tamamlanması için bu ısıtma işleminin optimum sıcaklıkta ve sürede yapılması gerekmektedir. Bu süre genellikle fotoduyarlı üretici firma tarafından sağlansa da kullanılan ekipmana göre farklı sonuçlar elde etmek mümkündür. Yapı üzerinde kayan desenlere ve silinen desenlere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.14’te verilmektedir.



Şekil 5.14 Foton eleği üretim hata mekanizmaları optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) a) iyi pasive olmamış alttaş üzerinden kayan ve yer değiştiren delik yapıları (düşürme işlemi öncesi).b) tab etme süresince iyi tutunamayan fotoduyarlı desenlerinin silinmesi (düşürme işlemi sonrası).

Şekil 5.14a'da iyi yüzey pasivasyonu yapılmamış bir foton eleği yapısı görülmektedir. Delikler tam olarak silinememiş kayıp diğer delik yapılarının önüne geçmişlerdir. Şekil 5.14b'de ise tüm yapıdan sadece bazı deliklerin tamamen silindiği gözlenmektedir. Burada yapıların tamamen silinmesi söz konusudur. Pozlama ve polimerizasyon işlemi iyi şekilde tamamlanamayan örneklerde bu tip durumlara sıkça rastlanmaktadır. Özellikle düşürme işleminde etkili olan diğer bir litografi hata mekanizması ince film kaplama işleminden gelmektedir. Metalik filmin kaplanması düşürme işleminde fotoduyarlı kaplama ve desenlendirmeden sonra gelmektedir. Desenlendirme işleminden sonra 110 °C'de her bir mikrometrelik fotoduyarlı kalınlığı başına 60 s ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Bu sıcaklık ve tavlama süresi üretici firma verileri ile uyum göstermektedir. Bu işlemde sonra tab edilen örnekteki fotoduyarlı polimerize olmuş olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda değişik etkilere sahip olmaya devam etmektedir. Bu durumun litografi işleminde yarattığı hata mekanizması yüksek sıcaklıklarda sıyırma/silme işlemine direnç göstermesidir. Hem sıcak tabla hem de kaplama ile bir dizi deney sonucunda yapılardaki silinme davranışları incelenmiştir. Sıcak tabla ile yapılan deneylerde yaklaşık yarım saat gibi sürelerde altta ve fotoduyarlı malzeme oda sıcaklığından (temiz oda koşullarında yaklaşık 22 °C) 150 °C'ye kadar ayrı ayrı ısıtılmışlardır. Örneklerin sıyırıcı içindeki davranışlarında sıcak tabla sıcaklığı baz alınarak incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında 120-130 °C'lerde yarım saat tavllanmış altta ve fotoduyarlı malzemenin silinmesinde gecikmeler yaşanmaktadır. Bu testin temel sebebi tab işleminden sonra gerçekleştirilecek ince film kaplama ortam sıcaklığının belirlenmesidir. Kullanılan ince film kaplama sistemi Bölüm 4.2.3.'de verilmiştir. Bu sistemde buharlaşma potası ile altta ve fotoduyarlı malzeme arasında mesafe oldukça fazla olmasına rağmen yapılan üç farklı testte en uygun silinmenin ortam sıcaklığı 50 °C de olduğunda gözlemlendiği belirlenmiştir. Yapılan testlerde ortam sıcaklığı 50 °C, 100 °C ve 150 °C olarak ayarlanmıştır. 150 °C'de silinebilen hiçbir deliğe rastlanmazken 100 °C'de bazı deliklerin silinebildiği gözlenmiştir. 100 °C'lik sıcaklıkta sıcak tablada bir silinememe problemi yaşanmazken kaplama sistemi içinde yapılan testte bu değerlerdeki sonuçlar aynı değildir. Buradan edinilen sonuç, sıcaklığın anlık olarak değişmesi ve ortam sıcaklığı ile buharlaşan malzemenin fotoduyarlı üzerinde negatif etki yarattığıdır. Optimum kaplama sıcaklığı olan 50 °C bu bilgiler ile kararlaştırılmıştır. Sıcaklık farkı ile oluşan silinememe

probleminin çözümü için sıyırıcının sıcaklığı ve sıyırma süresi ile yapılan testlerde diğer bir negatif sonuç olan metalik film incilmesi problemi saptanmıştır. Yüksek sıcaklıkta kaplanan foton eleğindeki yapıların silinemediğini gösteren optik mikroskop ve profilometre görüntüleri Şekil 5.15'te verilmektedir.



Şekil 5.15 Yüksek sıcaklık ince film kapla işlemi sonrasında oluşan silinemeyen yapı problemi a) optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) b) optik profilometre görüntüsü.

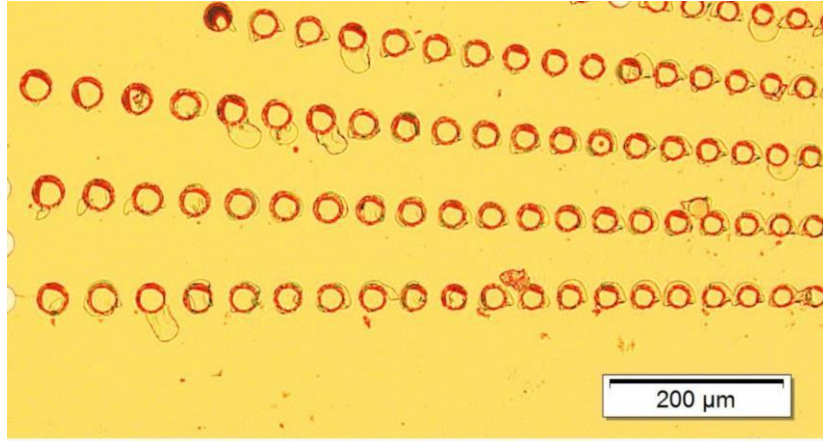
5.4.1. Düşürme Yöntemi Deneysel Üretim Sonuçları

Düşürme yönetimine özgü hata mekanizmaları genellikle yazım kusurları, tab etme işlemi ve ısıtma işlemi gibi Bölüm 5.3. ve 5.4.'de verilen mekanizmalar sebebiyle oluşan hata mekanizmalarıdır. Bu bölümde bu hata mekanizmaları ile düşürme işleminden sonra ortaya çıkan yapılar anlatılmaktadır. Oluşan kusurların ortadan kaldırılması ile elde edilen optimize edilmiş yapıların sonuçları da bu bölümde verilmektedir. Düşürme yöntemi hata mekanizmaları maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- İnce film ve fotoduyarlı kalınlık mekanizmaları
- Duvar profil mekanizması
- Yüksek sıcaklık mekanizması
- Kirlilik mekanizması

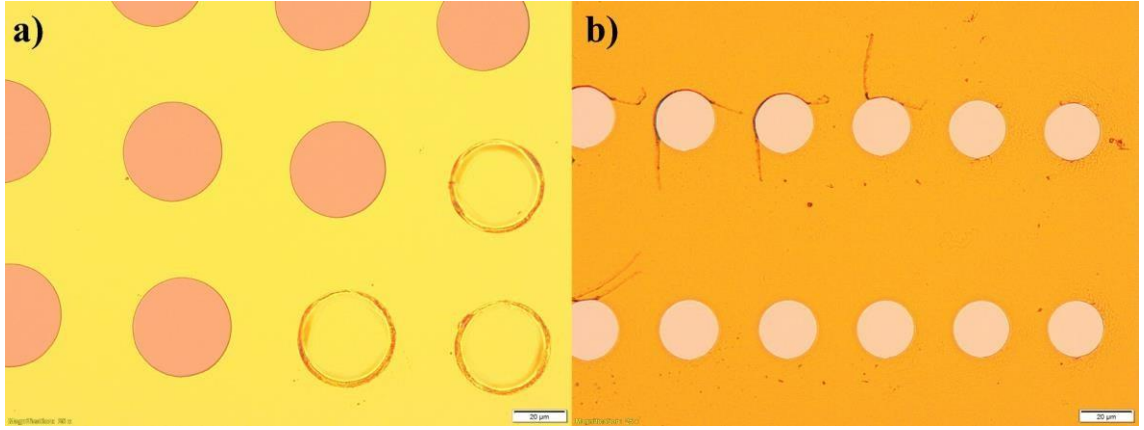
Yukarıda sıralanan dört madde hata mekanizmasının genel başlıklarıdır. Düşürme işleminde temel prensip desenlendirilmiş olan bölgenin üzerine kaplanan ince filmin

çevresindeki yapıya zarar vermeden silinmesidir. Silme işlemin gerçekleşmesindeki temel parametreler fotoduyarlının kimyasal özellikleri ve silme işlemini yapacak olan çözelti ile fotoduyarlının etkileşmesidir. Burada bahsi geçen temel etkileşme mekanik olarak silici çözeltinin fotoduyarlıya nüfuz edebilmesidir. Düşürme sürecinde sıklıkla karşılaşılan ve diğer mekanizmalarda da bahsedilecek olan özelliklerden biri fotoduyarlının veya ince filmin kalınlığıdır. Şekil 4.21 a-f’de verilen şematik çizimde fotoduyarlının ve ince film katmanlarının pozisyonları görülmektedir. Kalınlık açısından iki önemli faktörün göz önünde bulundurulması gerekir. Bunlardan birincisi fotoduyarlı kalınlığı ikincisi ise ince film kalınlığıdır. Düşürme işlemin başarıyla gerçekleşebilmesi için fotoduyarlı ile ince film katmanları arasında bir oran olması gereklidir. Bu oran genellikle 3:1 alınsa da buradaki temel parametre silme çözeltisinin desenlendirilmiş fotoduyarlıya her yönden kolayca nüfuz edebilmesidir. İnce film katmanının kalın fotoduyarlı katmanın kalınlığı ince olduğu durumlarda silinememe problemleri görülmeye başlamaktadır. Aynı durumun, silinme kusurları, farklı mekanizmalarla gerçekleşmesi de mümkündür. Foton eleklerinde ince film katman kalınlıklarını belirleyen faktör tasarımı yapılan dalgaboyu bölgesindeki geçirgenliğine bağlıdır. Genellikle metalik filmlerde ve görünür bölge dalga boylarında bir veya birkaç yüz nanometrelik filmler yeterli olmaktadır. Genellikle kullanılan kalınlık oranlarına bakıldığında düşürme işlemi için 500 nm ile 1 μ m’lik fotoduyarlı tabakalarının yeterli olduğu düşünülmektedir. Önceki bölümde bahsedilen fazla tab etme süresi ile düşen fotoduyarlı katman kalınlıkları da dikkate alınınca kalınlığı az olan fotoduyarlı katmanların silinememe problemleri yaratmaları olanaklı hale gelmektedir. Bu durum daha kalın ince filmler için de problem haline gelir. Örneğin farklı bir uygulama alanı olarak filtreli veya faz özellikli foton eleklerindeki ince film katman kalınlıkları dalgaboyu ile etkileşebilecek kalınlıklarda olduğundan fotoduyarlı katman kalınlıkları daha dikkatli seçilmelidir. Düşük fotoduyarlı katman kalınlığı sebebiyle başarısız olan bir düşürme işlemine ait optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.16’da verilmektedir.



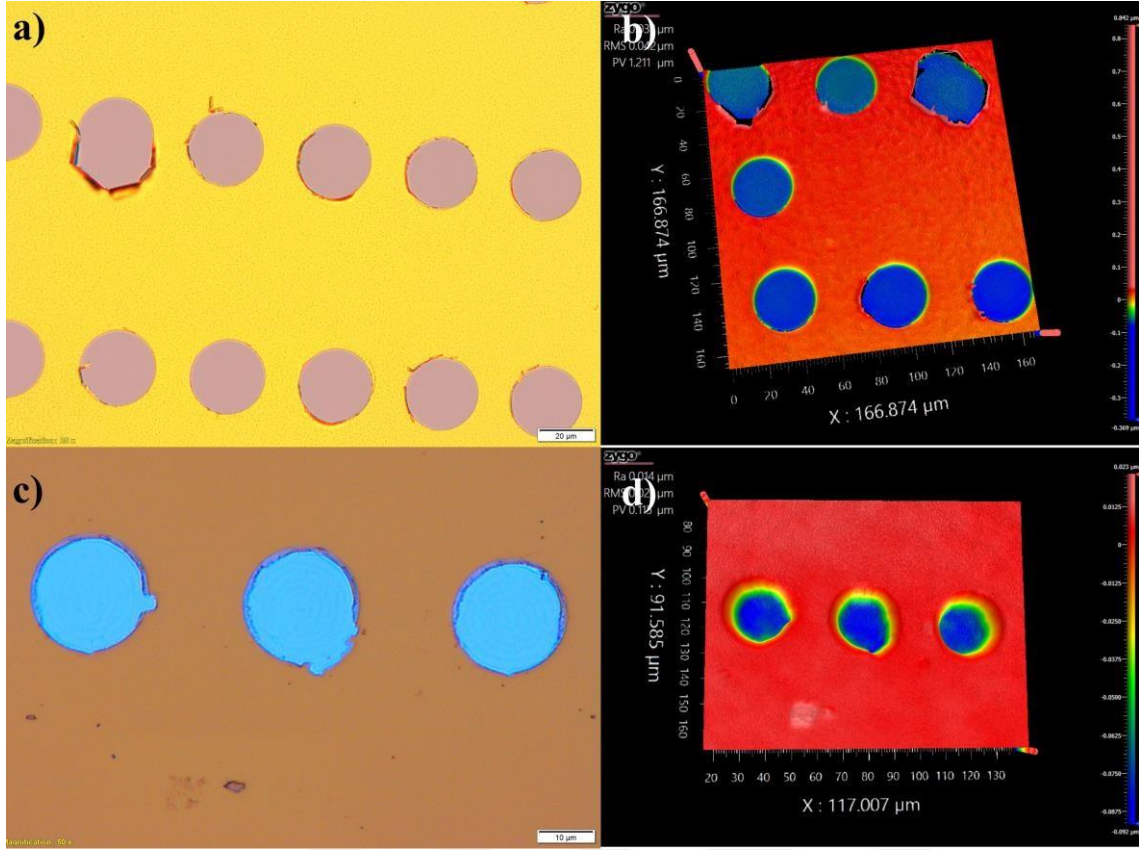
Şekil 5.16 Düşük fotoduyarlı katman kalınlığı sebebiyle silinemeyen yapılar optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200μm).

Şekil 5.16’da LOF 23 örneğinde ince film kalınlığı sabit (153 nm) olmakla birlikte fazla tab edilmiş bir fotoduyarlının düşürme işlemine ait optik mikroskop görüntüsü verilmektedir. Aşırı incelen ve yapısı bozulan fotoduyarlı ile silme işlemi sonucunda metalik film yapıdan düşürülememiştir. Şekil 5.16’da verilen tipte bir hata mekanizmasının tek oluşum mekanizması ince fotoduyarlı veya kalın incefilm katmanları değildir. Özellikle düşürme süreci ele alındığında, en önemli faktör duvar yapısıdır. Teorik olarak negatif duvar yapısı gerektiren düşürme işleminde pratik olarak negatif veya dik açılara çok yakın açılarında düşürme işleminde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu mekanizmanın en büyük dezavantajı farklı birçok litografi parametresinden etkilenmesidir. Özellikle odak dışındaki desenlendirme çalışmaları duvar yapısını bozmaktadır. İyi odaklanmamış bir desenlendirme de negatif duvar yapısını yakalamak hem teorik hem de pratik olarak zordur. Duvar yapısının negatif olmasının getirdiği en büyük avantaj ince filmin desenlendirilmiş şekil duvarlarında tutunacak alanının olmamasıdır (Bkz. Şekil 4.11). Fazla pozlanmış bir fotoduyarlının duvar yapısı da Şekil 4.11c’de verilmektedir. Odak dışında pozlama veya fazla pozlama ile duvar yapısındaki dikliği ve negatifliğini kaybeden desenlerde ince filmlerin silinememesi gibi problemlerin yanında yapılarda ince film katmanlarında çatlaklar hatta kırıklı yapılar gözlemlenmektedir. Şekil 5.17a’da duvar yapısı sebebiyle silinemeyen deliklerin görüntü verilmiştir. Şekil 5.17b’de ise açılan deliklerdeki kenar yapı bozuklukları sebebiyle yaşanan çizikler/çatlaklar gösterilmektedir.



Şekil 5.17 Pozitif duvar yapısı sebebiyle oluşan hata mekanizmaları optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) a)LOF21 örneği orta büyüklük deliklerdeki silinemeyen yapılar b) LOF22 küçük delikler bölgesi ince film kırığı görülen yapılar.

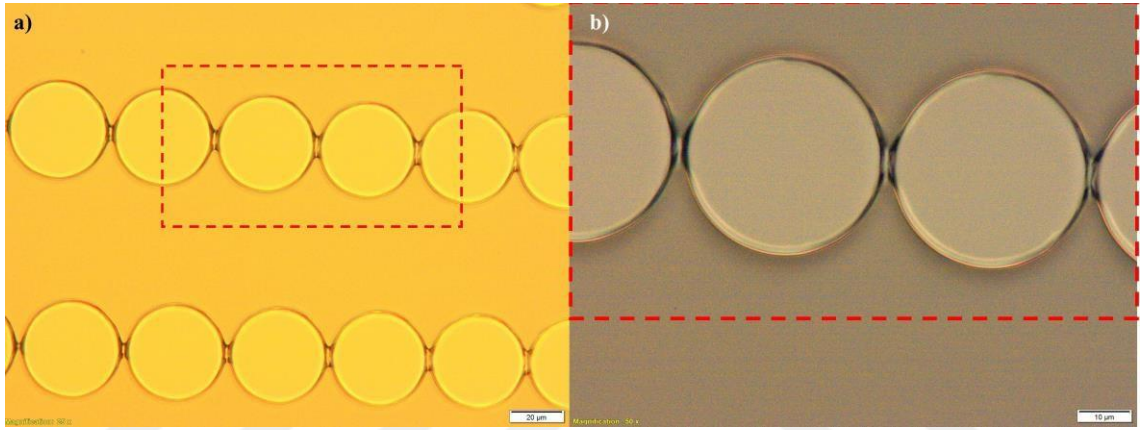
Yapı duvarlarındaki ileri açısal değişimlerde, pozitif açılı duvarlarda, ince filmlerde kırılmalar yaşanmakta ve delik yapısındaki dairesel şekil kaybedilmektedir. Üretilen örneklerde meydana gelen kırık yapısına bir örnek olarak LOF1 örneğinin optik mikroskop ve optik profilometre görüntüleri Şekil 5.18’de verilmektedir. LOF1 örneğinde yaşanan kırılma olayının benzeri LOF 6 örneğinde de meydana gelmiştir. Büyütme faktörü daha fazla olan objektifler ile alınan profilometre ve optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18 LOF1 örneğine ait yapısal kusurlar (kırık yapılar) a) optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) b) optik profilometre görüntüsü (büyütme faktörü 50X), LOF 6 örneğine ait c) optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) d) optik profilometre görüntüsü (büyütme faktörü 50X) (tüm görüntüler küçük delikler bölgesinden alınmıştır).

Düşürme süreci ve kimyasal aşındırma süreçlerinin her ikisinde de baskın olan yüksek şiddet veya soğurulan ışık miktarının yüksekliği hata mekanizmaları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Detayı Bölüm 5.3.'de verilmekle birlikte düşürme sürecindeki sonuçları bu bölümde verilmektedir. Desenlendirme parametreleriyle oluşan hata mekanizmalarının temelinde genişleyen yapılar yatmaktadır. Genişleyen yapıların bir sonucu olarak duvar açıları değişirken diğer bir sonucu ise iki ardışık deliğin birleşmesidir. Duvar yapıları ile ilgili durum daha önce tartışılmıştır. Duvar yapısındaki genişleme ve yakın alandaki deliklerin birleşmesinde sadece yapıların büyümesi değil aynı zamanda duvar yapılarının da etkisi vardır. Kritik bir yaklaşma mesafesinde bir birine temas etmeyen iki deliğin düşürme sonucunda birleştiği görülmektedir (Bkz. Şekil

5.19). Yapıların yaklaşımındaki kriter genellikle tasarımdaki şiddet artırma mekanizması olan ve tasarım bölümünde bahsedilen d/w oranının artırılması ile sağlanmaktadır. Bu oranın artması ile birlikte delikler birbirine oldukça yaklaşmaktadır. Yaklaşan yapılarda ortaya çıkan iki ana hata mekanizması ile yapıların birleşmesi söz konusu olmaktadır. Duvar profillerindeki eğimin ve genişlemenin artması ile özellikle birbirine yakın ve boyutça küçük deliklerin birleşme olasılığı artmaktadır. Desensel olarak birleşmeyen deliklerde düşürme işlemi sonrasında birleşmelerin yaşandığı görülmektedir. Temelde görüntülenen deliklerde iki deliğin arasında bir sınır bölgesi olduğu LOF13 örneğinin en küçük deliklerinin optik mikroskop görüntüsü üzerinde belirlenmiştir.

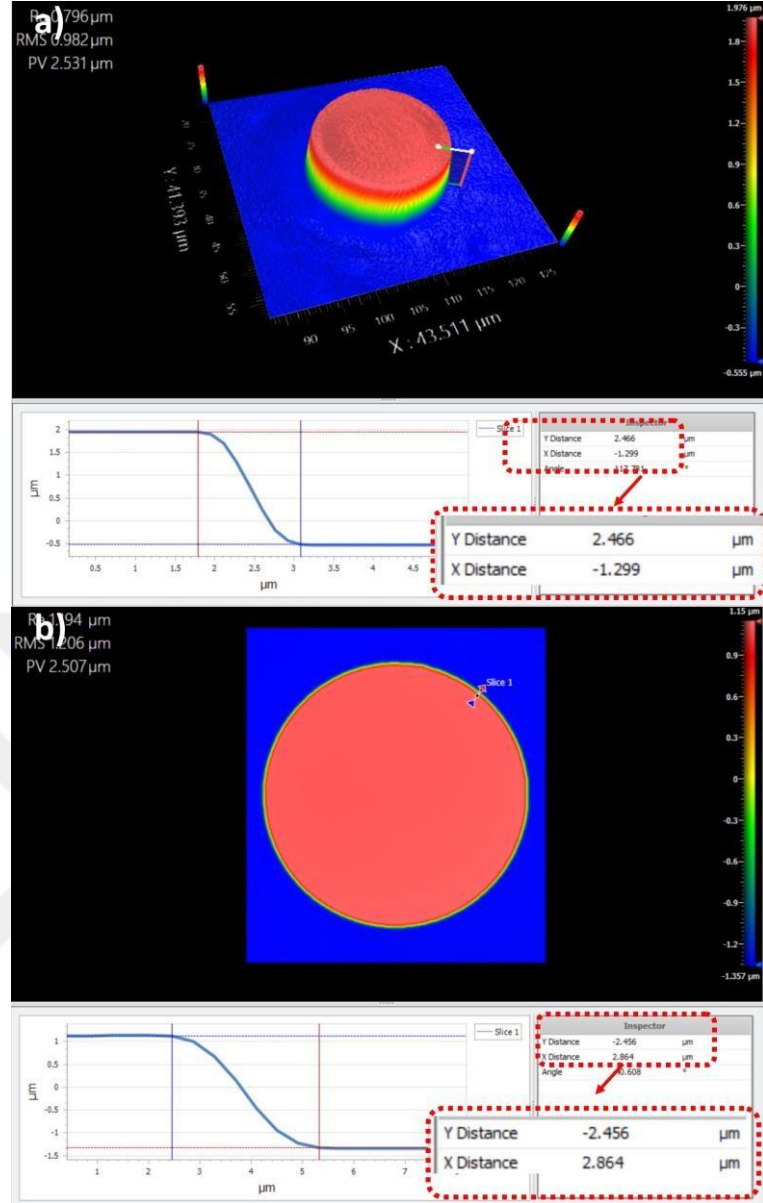


Şekil 5.19 LOF13 örneği genişleyen yapılar optik mikroskop görüntüsü (ince film kaplama öncesi küçük delikler bölgesi) a) büyütme faktörü 25X, skala 20µm b) büyütme faktörü 50X, skala 10µm.

Şekil 5.19’de verilen optik mikroskop görüntüsünde bir sınır pozlanmasının olduğu gözlemlenmektedir. Bu pozlanmanın oluşması ile meydana gelen yapıların hem düşürme işlemi öncesi hem de sonrasındaki durumları ayrıca Şekil 5.21’de verilmektedir. Birbirinden tamamen ayırık fakat mesafe olarak 4-5 mikrometre gibi mesafelerde konumlanan deliklerin bu şekilde birleşmeleri veya daha ileriki durumlarda tamamen iç içe geçmelerinin temel sebebi yapıların genişlemesi ve pozitif duvar yapılarıdır. Pozitif duvar yapı mekanizması daha önce belirtildiği gibi çeşitli parametrelerle, şiddet ve odak, meydana gelen bozukluklardır. Bu bozuklukların yapıda yarattığı değişimler optik profilometre ile incelenmiştir. Bu inceleme ardından bazı yapılarda çeşitli genişleme ve pozitif duvar örnekleri görülmüştür. Duvar genişleme faktörü ile tasarımdaki

konumlandırma yapıların birleşip bileşmeyeceği konusunda bilgi veren faktörlerden sadece bir tanesidir. LOF 25 ve LOF 26 örneklerinin optik profilometre görüntüleri Şekil 5.20’da verilmiştir. Şekil 5.20a’da pozitif duvar yapısı veya kuyruk yapısı olarak da adlandırılabilen yapının genişliğinin yaklaşık 1.3 um olduğu görülmektedir. Öte yandan aynı şeklin b kısmında verilen kuyruk yapısı yaklaşık 2.7 um olarak ölçülmüştür. İki örnek arasındaki desenlendirmede soğurulan enerji, şiddet farkı ile oluşan bu durum desenlendirme sonrasında Şekil 5.19’de elde edilen sonucu ortaya çıkarmaktadır.

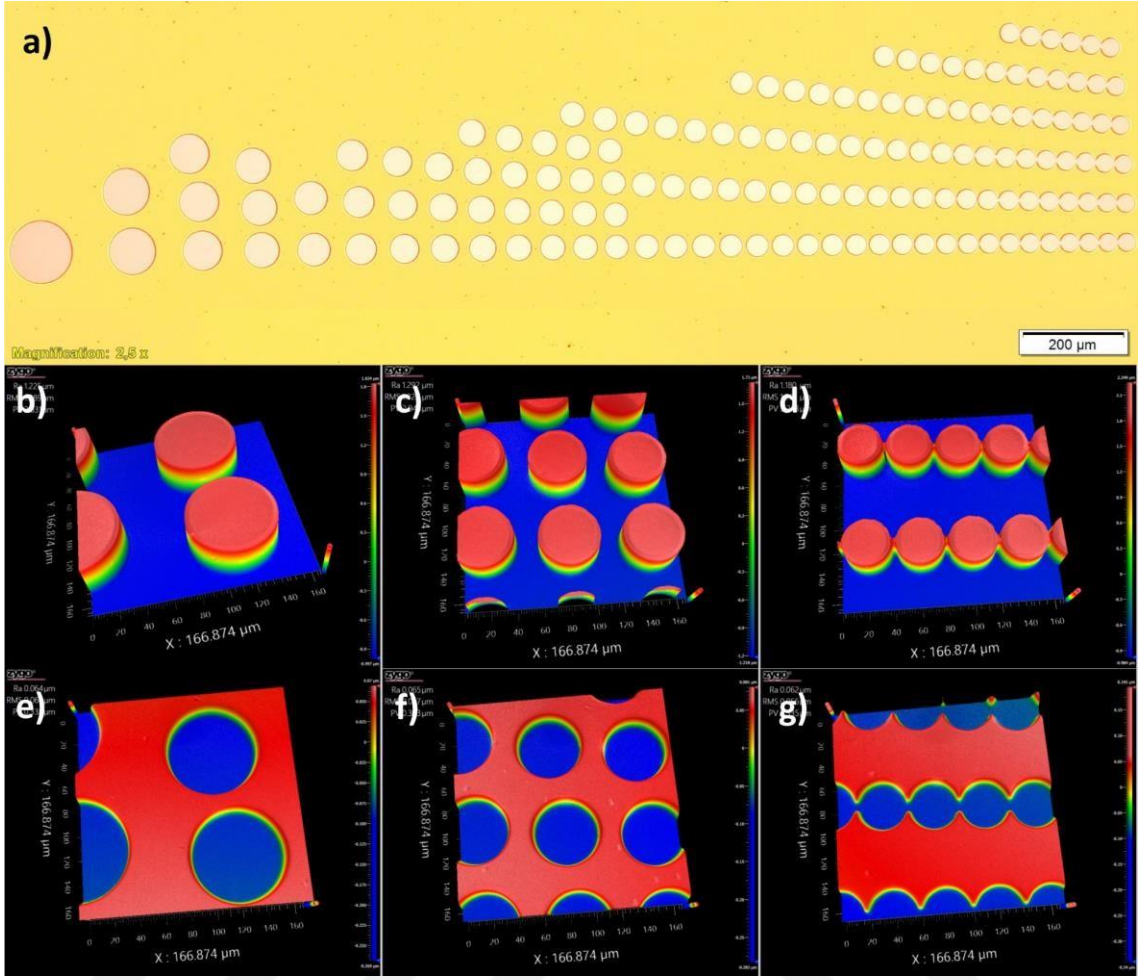




Şekil 5.20 Foton Eleği desenlendirmede işleminde tab etme süreci sonunda meydana gelen duvar eğimleri a)LOF25 örneği optik profilometre görüntüsü b) LOF26 örneği optik profilometre görüntüsü, (büyük delikler bölgesi, büyütme faktörü 20X).

LOF13 örneğindeki tüm deliklerin durumunda aynı şekilde genişleme olmasına rağmen birleşme sadece birbirine yakın olan deliklerde gerçekleşmektedir. Bunun temel sebebi yazım sırasında çizgi genişliğinin neredeyse tüm desenlendirilen bölgelerde eşit olmasıdır. Daha önceki bölümlerde verildiği gibi bu çizgi genişliğinin sabit tutulması amacıyla foton eleği parçası üç bölgeye ayrılmış ve bu bölgeler ayrı hızlar ve şiddetler ile desenlendirilmiştir. Şekil 5.21a’da düşürme sonrasında LOF13 örneğinin optik

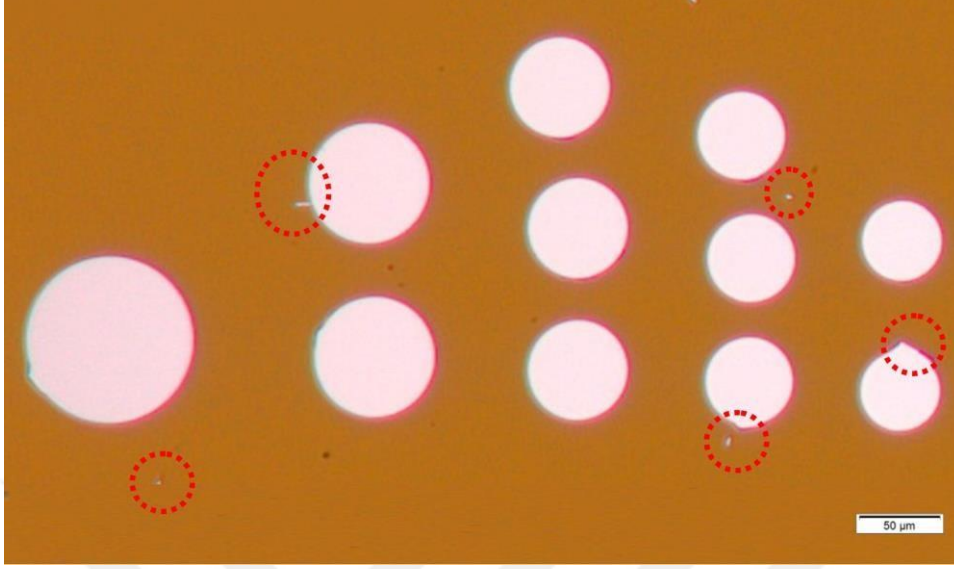
mikroskop görüntüsü verilmiştir. Foton eleği yapısının üç bölümde incelendiğinde en büyük deliklerin olduğu bölgede pozitif duvar yapısının sadece çaplarda büyümelere sebep olduğu orta bölgede de bu durumun tekrarlandığı fakat en küçük deliklerin olduğu bölgede birleşmelerin yaşandığı görülmektedir. Şekil 5.19'da verilen LOF13 örneğini en küçük delik bölgesindeki birleşmeye ait profilometre görüntüsü Şekil 5.21d'de verilmektedir. İnce film kaplama işlemi öncesinde alınan ve her bölgeye ait optik profilometre görüntüleri Şekil 5.21b, c ve d'de verilmektedir. Bu bölgelerde birleşme sadece en küçük bölgededir. İnce film kaplama ve düşürme sonrası optik profilometre görüntüleri de Şekil 5.21e, f ve g'de verilmektedir. Pozitif duvar yapısı genellikle şekillerde genişlemeye sebep olurken bu durum küçük delik bölgesinde birleşmelere sebep olduğu hem Şekil 5.21a hem de aynı şeklin g kısmında gösterilmektedir. Bu tip genişlemelerin önüne geçilmesi için tasarım ve üretim bilgileri birleştirilerek iyileştirmeler yapılmıştır.



Şekil 5.21 LOF13 düşürme sonrası a) optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm), düşürme işlemi öncesi optik profilometre görüntüleri (büyütme faktörü 50X) b) büyük delikler bölgesi c) orta delikler bölgesi d) küçük delikler bölgesi, düşürme işlemi sonrası optik profilometre görüntüleri (büyütme faktörü 50X) e) büyük delikler bölgesi f) orta delikler bölgesi g) küçük delikler bölgesi.

Düşürme işlemindeki diğer bir önemli mekanizma ise kirlilik mekanizmasıdır. Kirlilik mekanizmasında kalıntı fotoduyarlı malzeme en önemli parametredir. Daha önce Bölüm 5.4.'de verilen bilgilere kirlilik mekanizması ile oluşan yapısal bozukluklar foton eleklerinde ışığın geçebileceği ve istenmeyen alanlar olarak ortaya çıkmaktadır. Düşürme işleminde önceden kalan fotoduyarlı katmanlar birer desen gibi davranıp düşürme işlemi sonunda açılırlar. Bu davranışa örnek bir durum Şekil 5.22'de verilmektedir. Şekil 5.22'de LOF1 örneğine ait 20X büyütme ve alttan aydınlatma ile alınan bir optik mikroskop görüntüsü verilmektedir. Bu görüntüde işaretlenmiş bölgeler istenmeyen ışık

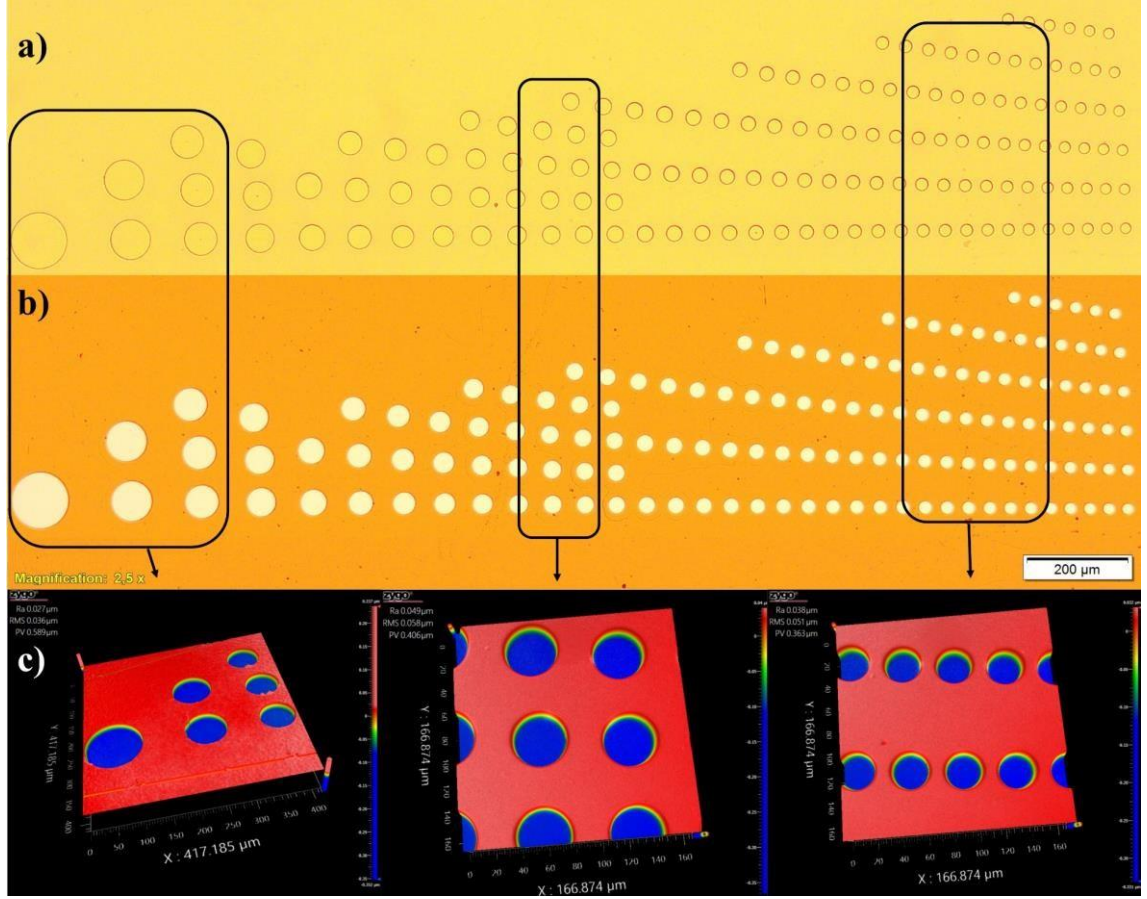
kaynaklarıdır. Bunların oluşum mekanizması bu bölgede kalıntı olarak kalan fotoduyarlı malzemeleridir.



Şekil 5.22 LOF1 örneği kirlilik mekanizması ile oluşan istenmeyen ışık alanları optik mikroskop görüntüsü (alttan aydınlatma altında, büyütme faktörü 20X skala 50μm).

Elde edilen görüntüler ve parametreler üzerinde geliştirme çalışmaları yapılmıştır. İlk olarak desenlendirme parametreleri üzerinde çalışılmıştır, üzerinde çalışılan tüm parametreler Ek 1'deki çizelgelerde verilmektedir. Desenlendirme çalışmalarında elde edilen odak, hız şiddet gibi parametrelerden sonra yapılan çalışmalar ile ön ısıtma, ısıtma, tab etme ve tab etme süresi çalışmaları yapılmıştır. Üretim safhasında elde edilen bilgilerden oluşan set ile tasarıma geri bildirim sağlanarak üretilen foton eleklerindeki çap dağılımının geliştirilmesi için çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen iki farklı parametre seti ile, desenlendirme ve litografi adımları, optimum yapıların elde edilmesi için örnekler üretilmiştir. Üretilen geliştirme örneklerinde yapıların düzgünlüğü, çapsal dağılım ve yapı temizlikleri göz önünde bulundurularak bir foton eleğinin çalışmasını etkileyen tüm parametreler düşürme yöntemi için optimize edilmiştir. Düşürme yöntemi ile elde edilen en iyi sonuçlara ait görseller Şekil 5.23'te verilmiştir. Sırasıyla tüm işlem adımlarında geliştirme sağlanması için ilk olarak desenlendirme çalışmaları ve işlemi takiben litografi süreci adımları ve son olarak da düşürme işlemi yapılmıştır. Şekil 5.23'te bir foton eleği parçasının desenlendirme sonucundaki optik mikroskop görüntüsü (Şekil 5.23a), düşürme

işlemi sonrasındaki optik mikroskop görüntüsü (Şekil 5.23b) ve her bölgeye ait optik profilometre görüntüleri Şekil 5.23c’de verilmiştir.



Şekil 5.23 Üretim süreçleri optimize edilmiş foton eleği parçası a) düşürme işlemi öncesi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X skala 200µm) b) düşürme işlemi sonrası optik mikroskop görüntüsü (alttan aydınlatma altında, büyütm faktörü 2.5X skala 200µm) c) düşürme işlemi sonrası optik profilometre görüntüleri (büyük delikler bölgesi, orta delikler bölgesi ve küçük delikler bölgesi, büyütm faktörü 50X).

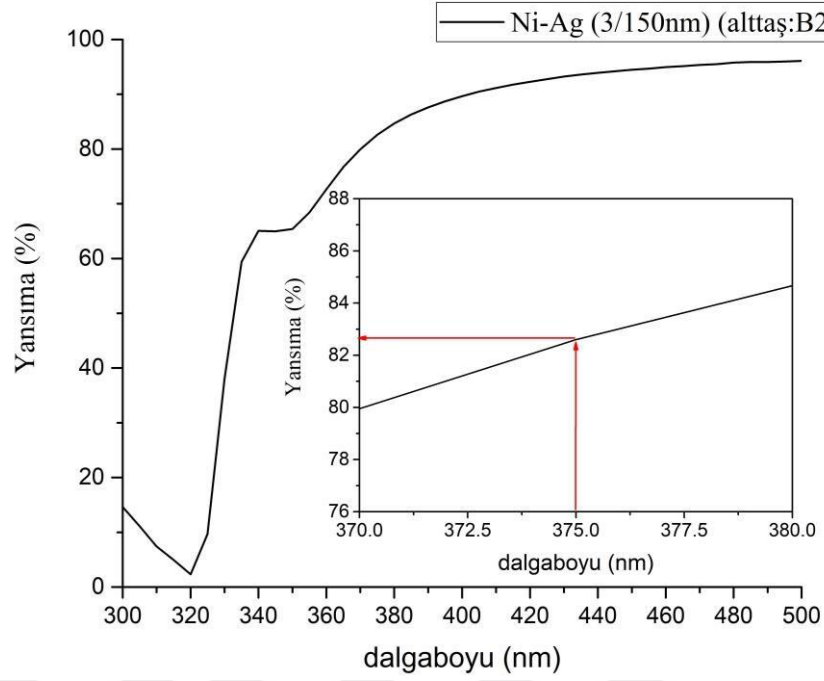
5.4.2. Kimyasal Aşındırma Yöntemi Deneyisel Üretim Sonuçları

Kimyasal aşındırma yöntemi ile foton eleklerinin üretimde izlenen yollar ve uygulanan işlemler düşürme tekniğine göre farklılık göstermektedir. Özellikle desenlendirmenin geçirgen bir alttaş yerine yansıtıcı bir yüzeyde yapılması desenlendirme parametrelerinde değişime sebep olmaktadır. Fotoduyarlı malzemenin de değişmesi geliştirme çalışmalarını malzemeye göre tekrar iyileştirmeye zorlamaktadır. Islak kimyasal aşındırma yöntemi daha önce kullanılmamış olan bir aşındırıcı olan nitrik (HNO_3) asittir.

HNO₃'ün değişik molaritede çözeltilerinin kullanıldığı üretim tekniğinde çözeltiler saf su ve HNO₃'ün çeşitli oranlarda karışımları ile üretimler gerçekleştirilmiştir. Aşındırma işleminde desenlendirme hataları haricinde oluşan bir diğer hata mekanizması az veya fazla aşındırma durumlarından gelmektedir. Bu durum için aşındırma kimyasalı ve süresinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Düşürme yönteminde olduğu gibi fotoduyarlı kalınlığı burada da önemli bir hata mekanizmasıdır. Hata mekanizması olarak oldukça sık rastlanan diğer bir durum ise yapılardaki asit aşındırması ve bunların mertebesidir. Bu bölümde tartışılacak hata mekanizmaları maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

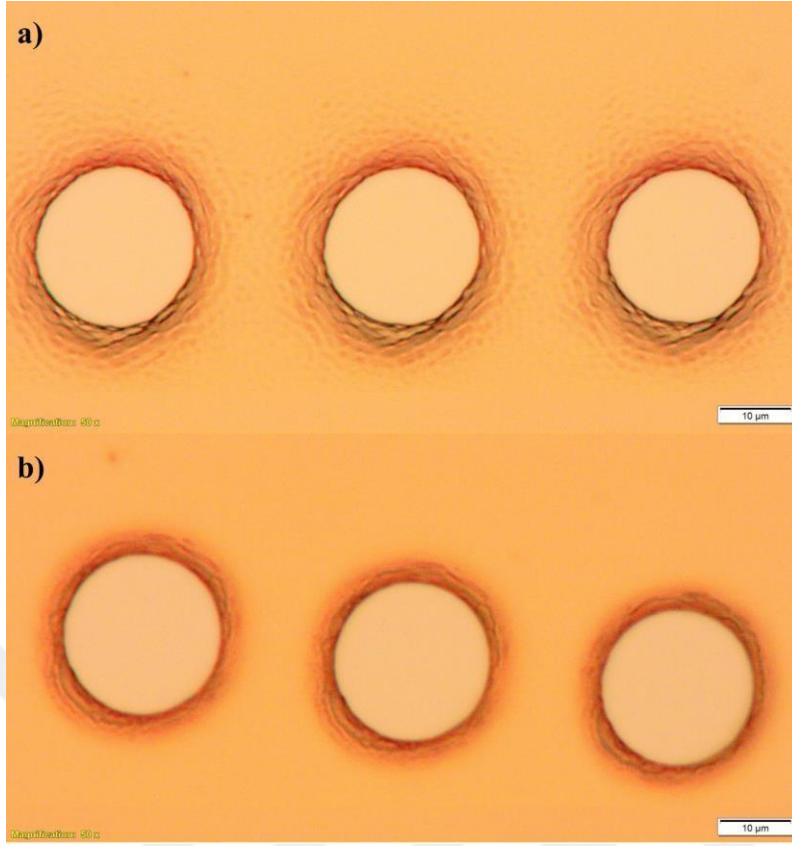
- Desenlendirme mekanizmaları
- Aşındırma tipi ve süresi
- Metalik film yansıma mekanizması
- Yapı bozuklukları

Deneysel süreçte kullanılan pozitif fotoduyarlı malzeme AZ1518, düşürme yönteminde kullanılan negatif fotoduyarlıya (nLOF2020) göre işlem açısından daha kolay işlem adımlarına sahiptir, örnek olarak desenlendirme işlem sonrası ısıtma işlemine ihtiyaç duymamaktadır. AZ1518 fotoduyarlı malzeme kullanılırken arada herhangi bir yapıştırma kuvvetlendiriciye ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun temel sebebi küçük delikler desenlendirilirken tab etme sırasında bu bölgelerin silinip maskelenen alanın yapışık olarak kalmasıdır. Delik alanları ile kapalı alanlar arasındaki yüzey alanı farkı sayesinde fotoduyarlı malzeme alttaşa daha iyi tutunabilmektedir. Bu yöntemin diğer iki avantajından biri desenlendirme sonrası ısıtma işleminin yapılmaması, diğeri ise ince film kaplama sırasında fotoduyarlının ortamda olmaması sebebiyle sıcaklık faktörünün ortadan kalkmasıdır. Bu avantajlarına rağmen en büyük dezavantajı ise metalik filmin desenlendirme dalga boyunda oldukça yüksek yansıtıcı özellik göstermesidir. Litografi işleminde kullanılan dalgaboyu 375 nm'dir. UV bölgesinin bu dalgaboyunda kullanılan filmin oldukça yüksek yansıtıcılağa sahip olması desenlendirme işlemin çok dikkatli yapılmasını gerektirir. Kullanılan ince film katmanının spektrofotometre ile alınan yansıtma grafiği Şekil 5.24'te verilmektedir.



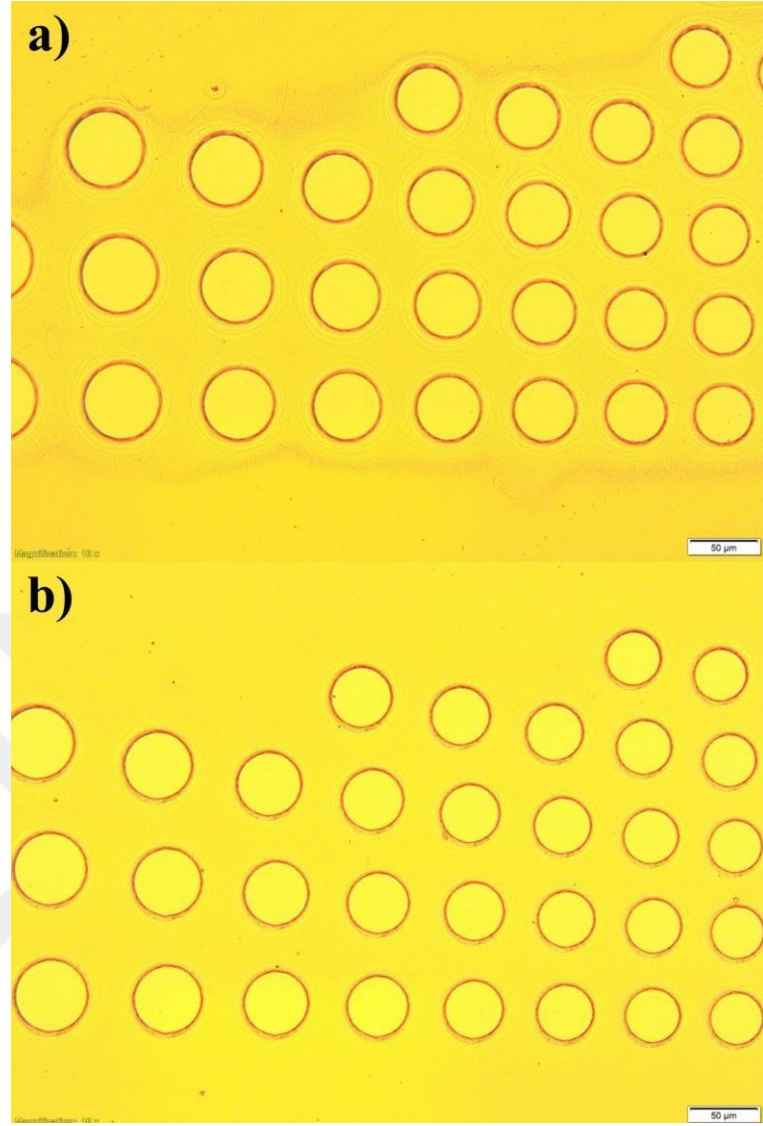
Şekil 5.24 B270 alttaş üzerine kaplanmış Ni/Ag ince film yansıtma grafiği.

Parametrelerin iyileştirilmesi sırasında meydana gelen desen yazımları yansımaların desenlerin çevresinde hareler oluştuğunu göstermektedir. Bu harelerin boyutlarının kullanılan şiddet veya hız-şiddet korelasyonu ile değişmekte olduğu saptanmıştır. Soğurulan ışık miktarı haricinde yapılan çalışmalarda büyük sayısal açıklığa sahip objektif ile yazılan desenlerde daha önce anlatıldığı gibi odak kaymasının daha fazla yaşanmasına ve delik çevresi fotoduyarlı davranışının değişmesine sebep olmuştur. Bu yapıların kimyasal aşındırma sürecindeki davranışları ayrıca tartışılacaktır. Islak kimyasal aşındırma yönteminde kullanılan desenlendirme parametreleri genellikle şiddet miktarının değiştirilmesine bağlıdır. Düşürme tekniğinde elde edilen hız bilgileri ve şekillerin yapısal ölçümleri ile delik desenlerinin düzgünlüğü ve özellikle daireselliği kullanılan hızlar ile saptanmıştır. Bu yöntemde ise aynı hızlar kullanılarak dairesellik korunmuş sadece yapı düzgünlüğü için şiddet değişimlerinden yararlanılmıştır.



Şekil 5.25 Farklı şiddet modülasyonları ile desenlendirilmiş ETC örnekleri mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) a) ETC21 örneği, b) ETC20 örneği.

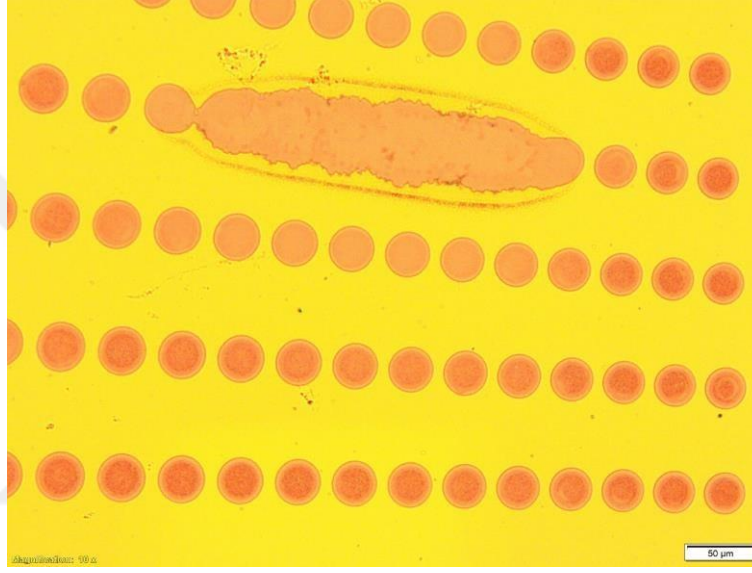
Şekil 5.25'te farklı şiddetlerde yazılmış iki ETC örneğindeki desenlendirme sonrasında oluşan harenme görülmektedir. Burada verilen delikler foton eleği yapısındaki en küçük ve birbirine en yakın olan deliklerdir. Bu örneklerdeki oluşan harenmeler delik çevresindeki fotoduyarlılığın kalınlığındaki değişimlerden meydana gelmektedir. Bu değişimler ıslak kimyasal aşındırma işlemi sonucunda çeşitli hata mekanizmalarını getirmektedir. Şekil 5.25a'da yüksek desenlendirme şiddetine sahip örneğin optik mikroskop görüntüsü verilirken aynı şeklin b kısmında bağıl olarak daha düşük bir şiddet kullanılmıştır. Kimyasal aşındırma örneklerinin desenlendirme sırasında kullanılan odak mesafesinin etkisi de Şekil 5.25'te verilen optik mikroskop görüntülerine benzemektedir. Odak dışı desenlendirilen örneklerde meydana gelen ince fotoduyarlı katmanları aşındırma sırasında delik yapılarının genişlemesine ve şekil bozukluklarına da sebep olmaktadır. Şekil 5.26'da iki farklı ETC örneği (ETC15 ve ETC16) verilmektedir. Bu örneklerin arasındaki fark odak mesafesinin iyileştirilmiş olmasıdır.



Şekil 5.26 Farklı odak mesafelerinde desenlendirilen ETC örneklerinin optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 10X, skala 50µm) a) ETC 15 örneği b) ETC 16 örneği.

İlk odak mesafesi çalışması olan ETC15 (Şekil 5.26a) örneğinde litografi sistemi kamerası ile fotoduyarlıya odaklanılarak çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçların tekrar odaklama yapılarak desenlendirilen ETC16 örneği ile karşılaştırılmıştır. Tekrar odaklamanın temel sebebi litografi sisteminde kullanılan kameranın kullandığı dalgaboyu ile desenlendirme dalgaboyu arasındaki farktır. Her iki dalgaboyu da tam olarak aynı noktada odaklanmamaktadır. ETC15 örneğindeki deliklerin ETC16 örneğine göre daha büyük çaplı olması yapıların genişlediğini göstermektedir. Diğer tüm parametreler sabit bırakılarak yapılan deneylerde şiddetin sabit olmasına rağmen delikler arası bölgelerde de pozlanan bölgeler olduğu Şekil 5.26a’da görülmektedir. Odak mesafesinde düzeltme yapılarak yazılan ETC16 örneğinde hem ara bölge pozlanmalarının hem de yapısal

genişlemenin önüne geçilmiştir. Ara bölgelerdeki pozlanmalar genellikle o bölgedeki fotoduyarlılığın tab işleme sonucunda incilmesi ve asite karşı olan dayanımın azalmasına sebep olmaktadır. İncelen fotoduyarlı katmanı sonrasında yapılan asit aşındırma işleminden sonra istenmeyen bölgelerde metal aşındırmalarına rastlanmaktadır. Bu tip bir örnek olan ETC21'deki fazla pozlanan alanların yarattığı harelî yapı Şekil 5.25'te verilmiştir. ETC21'in farklı bir bölgesinde oluşan harelî bölgenin asit ile aşındırılması sonucu ortaya çıkan yapısı optik mikroskop ile görüntülenmiş ve Şekil 5.27'de verilmiştir.



Şekil 5.27 ETC21 örneği ıslak kimyasal aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 10X, skala 50µm).

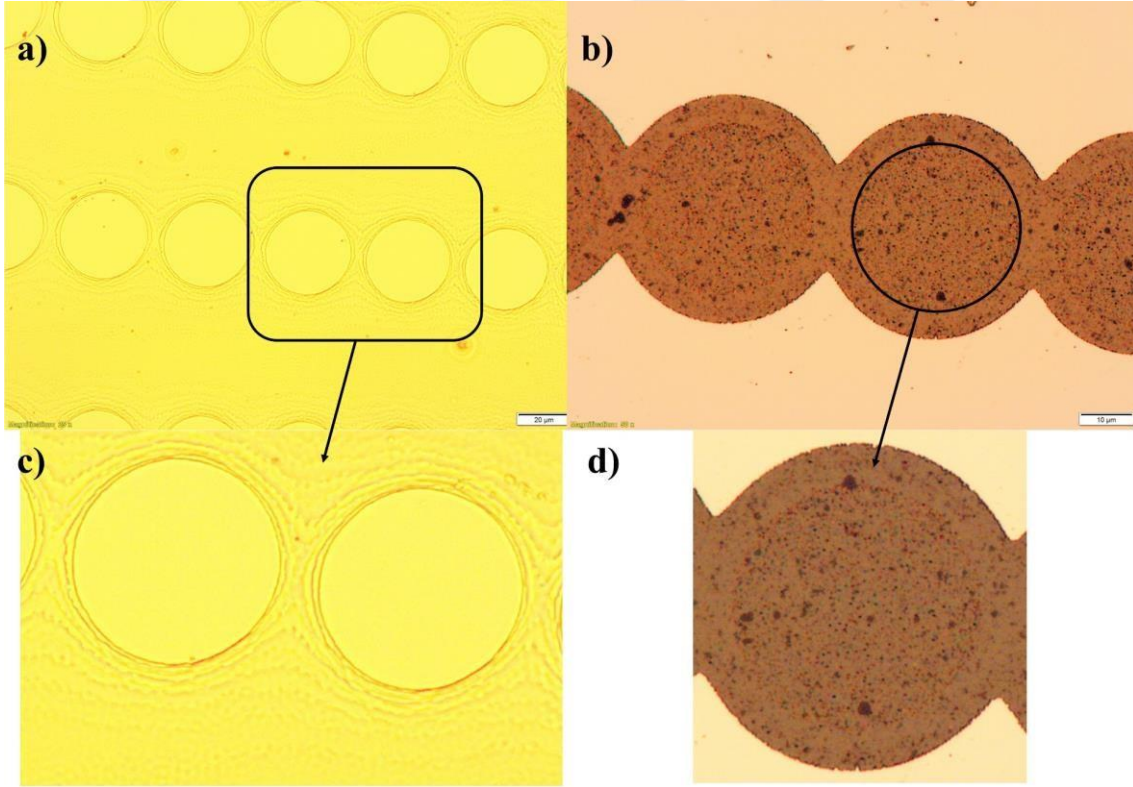
Desenlendirme işlemleri kullanılan optimum parametreler ile kimyasal aşındırma işleminde meydana gelecek olan hata mekanizmalarının önüne geçilebilmektedir. İlk karşılaşılan mekanizma incelen fotoduyarlı tabaka kalınlığıdır. Fotolitografi tekniğinde kullanılan fotoduyarlıların kimyasal aşındırıcılara karşı dirençleri yüksek olmakla birlikte [81] kullanılan kimyasal aşındırma reçetesi de iyileştirilmelidir. Kimyasal aşındırma çalışmaları sırasında kullanılan aşındırıcı nitrik asit (EMPARTA ACS Nitric acid %69, MERCK) ve bu asidin farklı molaritelerdeki çözeltileridir. Çözeltiler ultra saf su ile hazırlanmış ve her biri sabit ve değişken zaman aralıklarında test edilmişlerdir. Literatürde metallerin asit aşındırmalarına karşı dayanımları ile birlikte ne kadar sürede ne kadar malzemenin aşındırılabilceğine dair birçok reçete bulmak mümkündür. Bu

reçeteler ortam sıcaklığına, kullanılan kimyasalların saflığına ve aşındırılacak olan metalik katmanlara göre değişim göstermektedir. Üretim çalışması kapsamında bulunan tüm değerler test edilerek saptanmış ve reçete oluşturulmuştur. Asit aşındırma işleminde kullanılan çözeltilere ait parametreler Çizelge 5.1’de verilmektedir.

Çizelge 5.1 Islak kimyasal aşındırma işlemi süreç parametreleri.

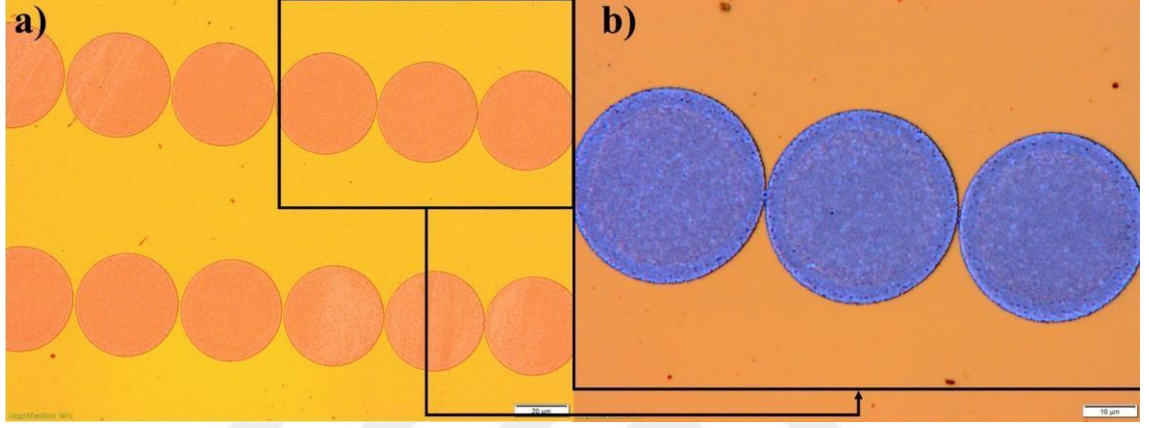
Örnek	Asit Miktarı (hacim)	Su Miktarı (hacim)	Molarite	Süre (s)
ETC1	1	1	7,8	120
ETC 4	1	2	5.23	6
ETC6*	2	1	10,5	5
ETC7	2	1	10,5	6
ETC9	2	1	10,5	4
ETC8	2	1	10.5	6
ETC10	2	1	10.5	10
ETC11	2	1	10.5	3
ETC12	2	1	10.5	3
ETC13	2	1	10.5	3
ETC 14	1	1	7.8	3
ETC 15	1,5	1	9.42	1
ETC 16	1,5	1	9.42	3
ETC 17	1,5	1	9.42	3
ETC 18	1,5	1	9.42	1
ETC 19	1.5	1	9.42	2
ETC 20	1.5	1	9.42	2
ETC 21	1.5	1	9.42	2
ETC 22	1.5	1	9.42	5

Çizelge 5.1'den elde edilen sonuçlarda sabit zaman sabit molaritedeki aşındırma süreçlerinde yapıların sonuçları farklı çıkmaktadır. Yapılan tüm aşındırma işlemlerinde sıcaklık sabit tutulmuştur (22°C). Yapısal sonuçların aynı parametrelerdeki aşındırma işlemine rağmen farklı çıkmasının sebebi desenlendirme çalışmalarında ortaya çıkan hata mekanizmalarıdır. Örneklerde gözlenen aşındırma çalışmalarında üç tip farklı sonuç vardır. Bu sonuçlar i) dairesel desenlerdeki kenarlardaki pürüzlü yapılar, ii) genişleyen yapılar ve iii) aşındırılmamış bölgelerdir. İncelen fotoduyarlı tabakalar sebebiyle asite karşı direnci azalan yapılarda genişleme ve deliklerde birleşmeler görülmektedir. Şekil 5.28'de verilen optik mikroskop görüntülerinde desenlendirme mekanizmaları ile tab etme işleminde oluşan ince fotoduyarlı tabakalarının asit aşındırma sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 5.28 ETC12 örneği küçük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüleri a) aşındırma öncesi desenlendirme görüntüleri (büyütme faktörü 25X, skala 20µm), b) ıslak kimyasal aşındırma işlemi sonrası (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) c) a şeklinde işaretlenen bölgenin dijital olarak büyütülmüş görüntüsü d) b şeklinde işaretlenen bölgenin dijital olarak büyütülmüş görüntüsü.

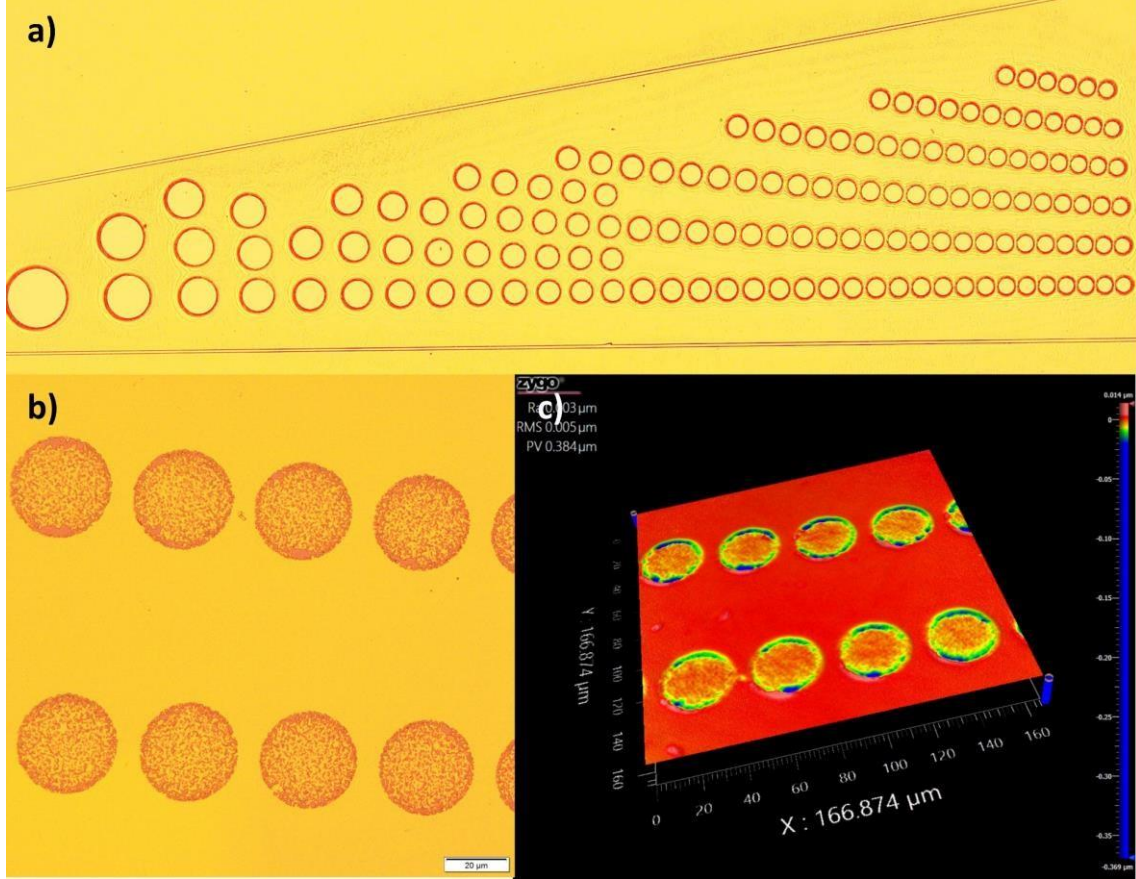
Şekil 5.28’de verilen optik mikroskop görüntülerinde a ve c kısımlarında yüksek şiddet ve yansımalar sonucunda oluşan yapı genişlemesi ve harelenme verilmektedir. Bu örnekte (ETC12) kullanılan asit derişimi 10.5 M ve aşındırma süresi 3 s’dir. Aynı reçetenin kullanıldığı diğ er bir örnek olan ETC11’de ise bu derişim ve sürede yapıda birleşme yaşanmadığı gözlenmektedir. Bu olayın temel sebebi yazma parametreleri farkından dolayı yapıdaki genişlemelerin olması fakat incelen fotoduyarlı malzemenin ortadan kaldırılmasıdır. ETC11’e ait optik mikroskop görünt eleri Şekil 5.29’de verilmektedir.



Şekil 5.29 ETC11 örneği küçük delikler bölgesi optik mikroskop görünt eleri a) en küçük delik yapıları (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) b) a şeklinde verilmiş bölgenin optik olarak büyü t lm ş görüntüsü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm).

Desenlendirme hata mekanizmaları haricinde asit derişimi ve süresi üzerinde yapılan çalışmalarda da ardışık deliklerde birleşmeler gözlenmiştir. Bu tür yapılar da asitin metalle çok hızlı reaksiyona girmesi sebebiyle hızlı aşındırma mekanizması oluşmuştur. Bu durumda yapılan süreli testlerde reaktif davranışın delik çeperlerini hasara uğrattığı görülmektedir. Yüksek derişimlerde kullanılan asitlerde uzun sürelerde yapılan aşındırma işlemi sonucunda yapılar da birleşme ve genişleme gözlenirken kısa sürede yapılan aşındırma işlemlerinde kalıntılara ve dairesel çeperlerde yapı bozukluklarına rastlanmaktadır. S renin sabit tutulduğı testlerde ise yüksek derişimlerde aşındırmanın kontrolsüz ve hızlı olduğı görülmektedir. Öte yandan düşük derişimlerde sabit sürelerde ise bazı bölgelerde metalik kalıntılar gözlemlenmiştir. Deliklerin orta bölgesinde yer alan bu kalıntılar foton eleklerindeki ışık geçişini engellemekte ve odak noktasında şiddetin düşük olmasını sağlamaktadır. Bu durumun diğ er bir dezavantajı ise dairesel açıklıktan

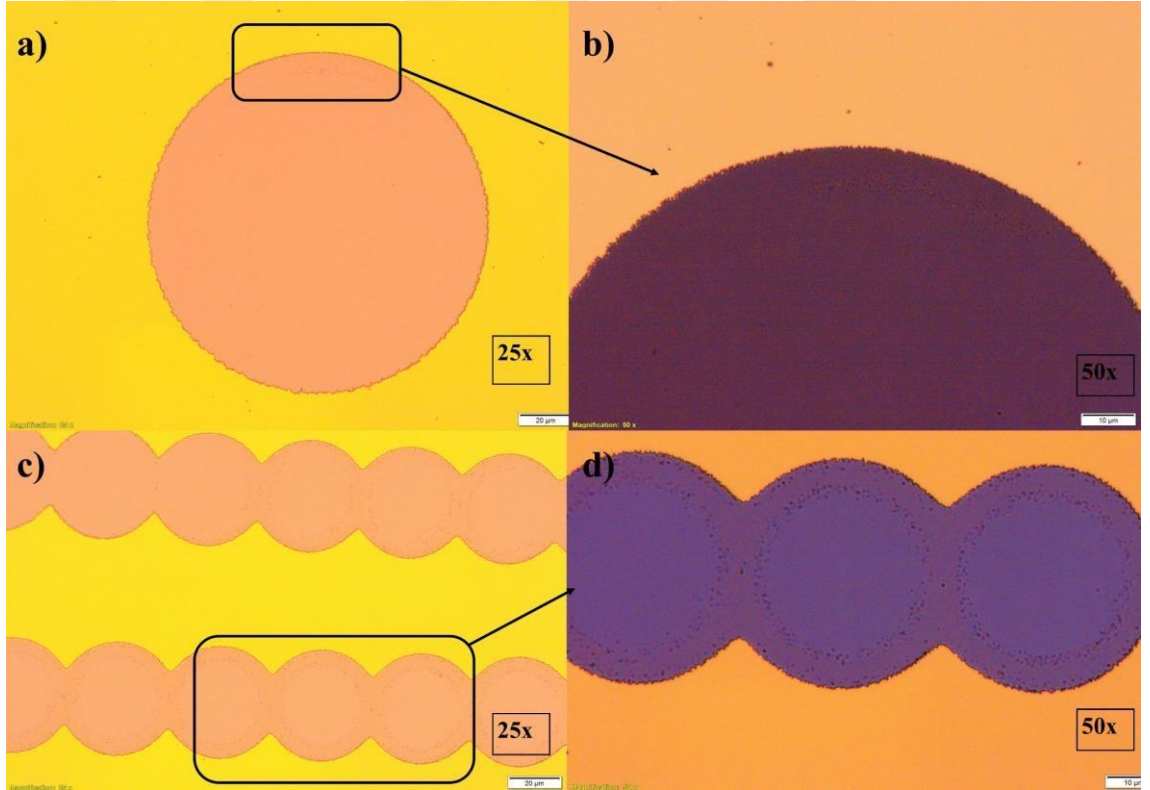
kırınım prensibini etkilemesidir. Düşük derişim sabit zaman testlerinde ortaya çıkan yapısal bozukluk Şekil 5.30'da verilmektedir. Şekil 5.30a ve b'de örneğin optik mikroskop görüntüleri c'de ise optik profilometre görüntüsü verilmektedir. Kimyasal aşındırma ile üretilen örneklerde genellikle metalik film kalıntıları görülmektedir. Bu problemin çözümü için hem derişim hem de süre iyileştirilmesi yapılmalıdır.



Şekil 5.30 ETC4 örneği a) ıslak kimyasal aşındırma öncesi foton eleği parçası optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) b) ıslak kimyasal aşındırma sonrası küçük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) c) ıslak kimyasal aşındırma sonrası optik profilometre görüntüsü (büyütme faktörü 50X).

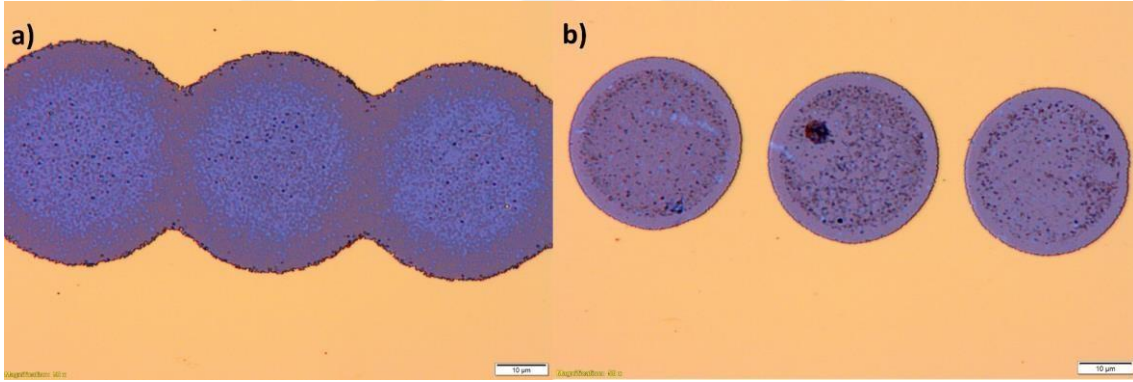
ETC 4 örneğinde desenlendirme mekanizmasından gelen problemler sabit bırakılarak aşındırma işlemi yapılmıştır (Bkz Şekil 5.30a). Yüksek şiddet ile incelen fotoduyarlı yapısına rağmen aşındırma işlemi sonrasında iç içe giren delikler oluşmamış bunun aksine

aşındırılabilen bölgeler oluşmuştur. Bu örnekte kimyasal ile aşındırma ile oluşan etkilere bakıldığında düşük molarite (5.23 M) kullanılarak yapılan aşındırmada ince fotoduyarlı tabakanın etkilenmediği, açık bölgede ise kalıntılar bırakan tam aşınmamış bölgenin oluştuğu gözlenmektedir. Metalik kalıntılar hem optik mikroskop (Şekil 5.30b) hem de optik profilometre (Şekil 5.30c) görüntüleri ile gösterilmiştir. Yüksek derişim sabit sürede yapılan testlerde meydana gelen yapısal değişiklik en iyi ETC8 örneğinde gözlenmektedir. Literatür bilgilerinden ve yapılan deneylerden yola çıkarak yüksek derişimin reaktif davranması ve yapıda hızlı bir aşındırma işlemi sağlaması beklenmektedir. ETC4 örneği ile aynı aşındırma süresine fakat iki kat fazla asit miktarına sahip reçete ile aşındırılmış olan ETC8 örneğinin iki farklı bölge ve bu bölgelere ait farklı büyütme faktörleri ile alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.31’de verilmektedir.



Şekil 5.31 ETC8 örneği ıslak kimyasal aşındırma süreci sonrası optik mikroskop görüntüleri a) büyük delikler bölgesi (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) b) a şeklinde işaretlenen bölgenin yüksek optik büyütme altına görünümü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) c) küçük delikler bölgesi (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) d) c şeklinde işaretlenen bölgenin yüksek optik büyütme altına görünümü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm).

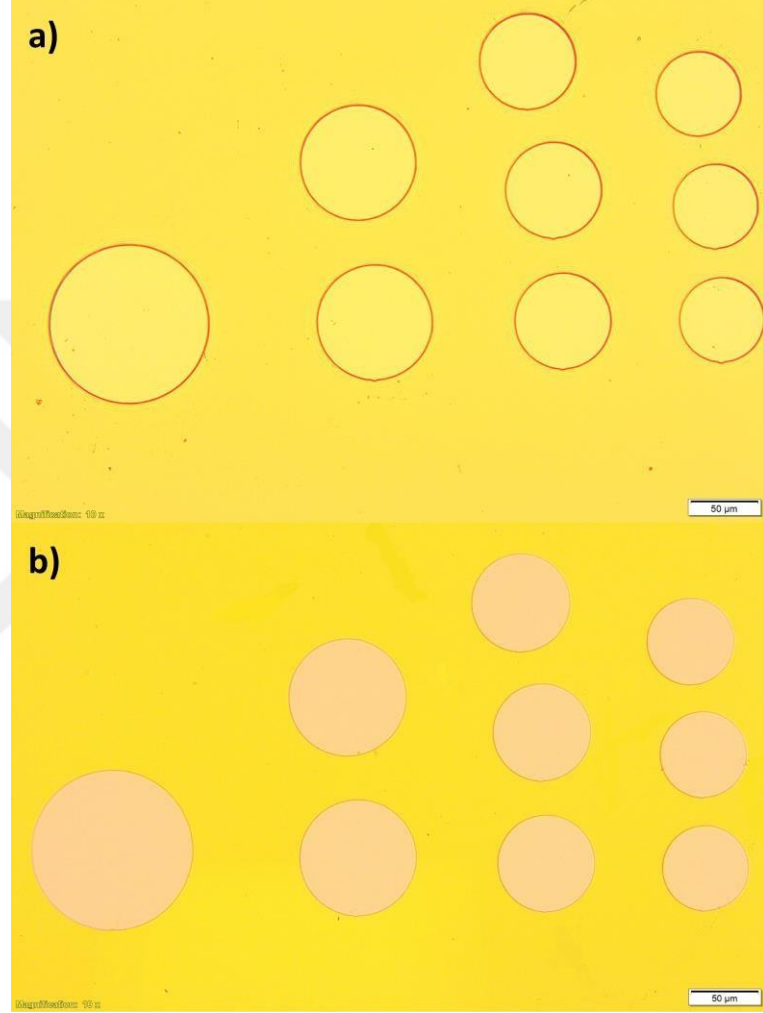
Şekil 5.31’da verilen görüntülerde a şeklinde en büyük deliklerin olduğu bölgeden alınan ve 25X optik büyütme kullanılan bir optik mikroskop görüntüsü verilmektedir. Aynı deliğin görüntüsü b şeklinde 50X optik büyütme ile alınmış ve yapı kenarındaki pürüzler verilmiştir. Şekil 5.31c şeklinde verilen görüntü en küçük deliklerin olduğu bölgede ve 25X optik büyütme ile alınan görüntüdür. Bu görüntünün daha detaylı anlaşılması amacıyla aynı şeklin d kısmında aynı bölgenin 50X optik büyütme ile alınan görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde deliklerin gerçek konumları ile reaktif olarak aşınan ve genişleyen bölge renk farkıyla ayırt edilebilmektedir. Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’deki ETC4 ve ETC8 örneklerinin aynı aşındırma sürelerinde farklı sonuçlar vermesinin temel sebebi aşındırıcının derişimidir. Aynı aşındırma derişimi ve farklı sürelerle ait örnekler ise Şekil 5.32’de verilmektedir. Bu örneklerin her ikisi de (ETC17 ve ETC18) aynı derişim değeri olan 9.42 M ve farklı aşındırma sürelerinde aşındırılmışlardır.



Şekil 5.32 ETC örnekleri optik mikroskop (büyütme faktörü 50X, skala 10 µm) a)ETC17 örneği (aşındırma: 9.42 M 3 s) b) ETC18 örneği (aşındırma: 9.42 M 1s).

Aynı derişime sahip farklı sürelerde aşındırılan örnekler üzerinde yapılan yapısal ölçümlerde uzun sürede aşındırılmış örnekte pürüzlenmeler ve yapı birleşmeleri yaşanırken kısa süreli aşındırmalarda herhangi bir genişleme izine rastlanmamıştır. Kısa sürede elde edilen pürüzlülüklerin daha az olmasına rağmen her iki yapıda da tam aşındırılmayan bölgelerin olduğu saptanmıştır. Hem sabit zaman farklı derişim hem de sabit derişim farklı zaman örneklerinde ortaya çıkan sonuç her iki parametrenin de aynı anda iyileştirilmesi gerekliliğini göstermektedir. Aşındırma parametrelerinin iyileştirilmesi için önceki işlem adımlarından gelen yapısal kusurların iyileştirildiği

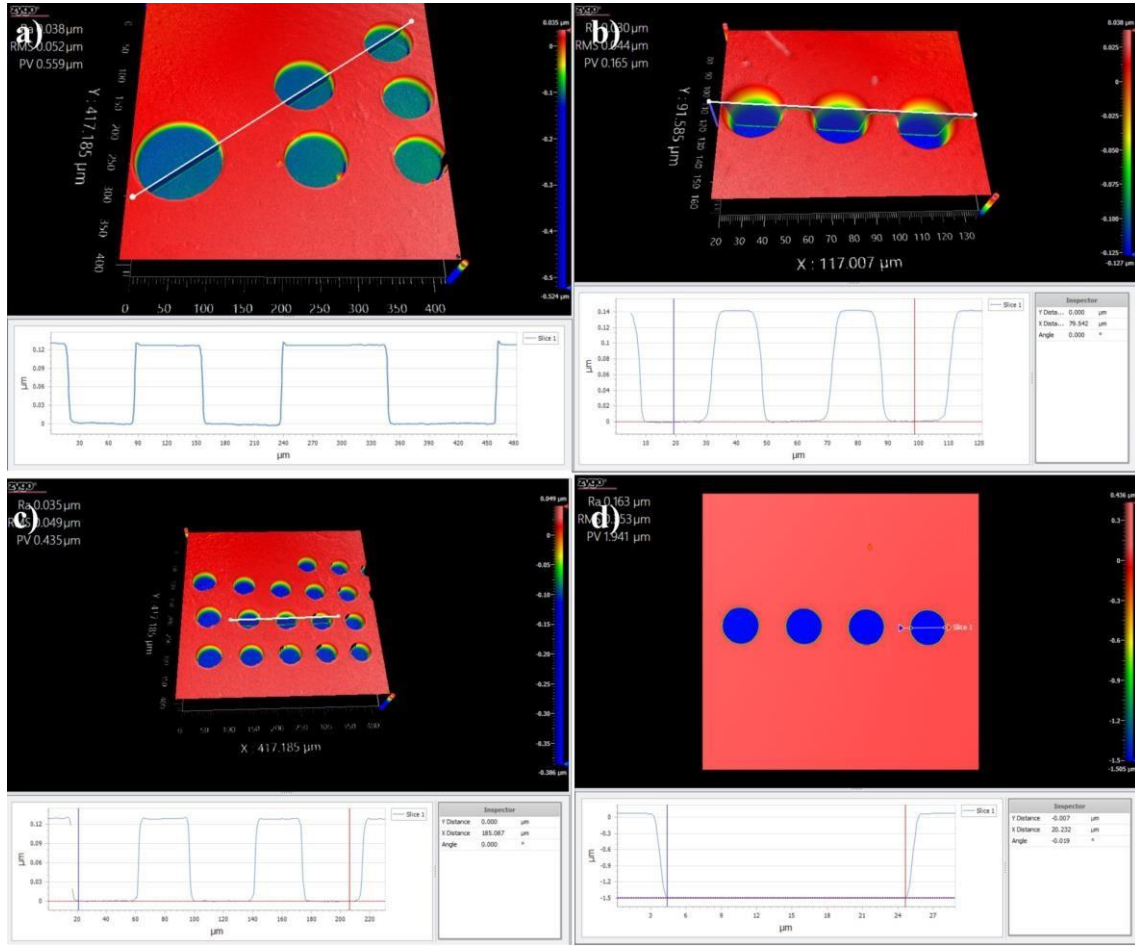
örnekler seçilmiştir. Bu örnekler ile yapılan iyileştirmelerde hem desenlendirme hem de kimyasal işlem adımlarının iyileştirmenin sağlanması amaçlanmaktadır. Her iki adım da başarılı sonuçlar veren örneklerden ETC6'nın kimyasal aşındırma öncesindeki desenlendirme görüntüsü ve aşındırma sonucunda oluşan delik görüntüleri Şekil 5.33'te verilmektedir.



Şekil 5.33 ETC6 örneği büyük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüleri (büyütme faktörü 10X, skala 50µm) a)ıslak kimyasal aşındırma öncesi b) ıslak kimyasal aşındırma sonrası.

Üretilen foton elekleri içinde kimyasal aşındırma ile en iyi sonuçları veren yapı ETC6 örneği olmuştur. Şekil 5.33'te verildiği gibi hem aşındırma öncesi sonuçlar hem de aşındırma sonrası sonuçlarda iyileştirmeler sağlanmıştır. ETC6 örneğinde delik yapıları ve delik içi kalıntıların da ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Delik içi yapılardaki

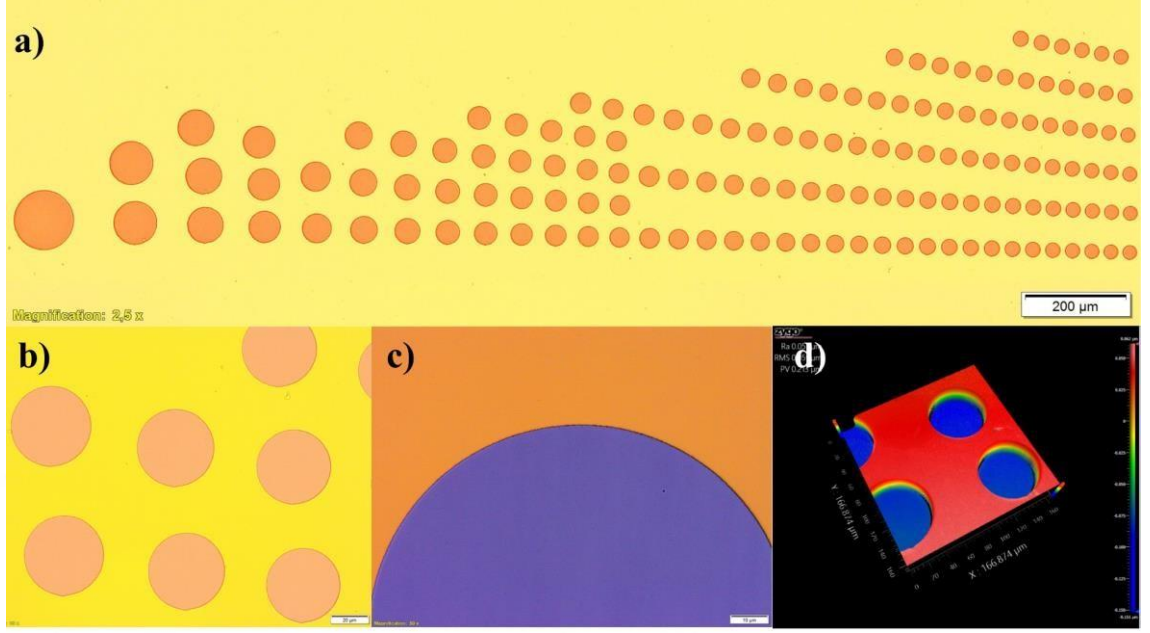
kalıntıları ve her deliğin derinliğindeki farkı ölçmek amacıyla optik profilometre cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.34 Aşındırma süreçleri optimize edilmiş farklı ETC örneklerden alınan optik profilometre görüntüleri a) büyük delikler bölgesi (büyütme faktörü 20X) b) küçük delikler bölgesi (büyütme faktörü 50X) c) orta delikler bölgesi (büyütme faktörü 20X) d) küçük delikler bölgesi (büyütme faktörü 50X).

Optimum örneklerin farklı bölgelerinden alınan ve metal kalıntıları incelenen görüntüler Şekil 5.34'te verilmiştir. Optimum kimyasal aşındırma süreçlerine sahip olan ETC6 örneğinin aşındırma sonrasında tüm foton eleği parçasının optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.35a'da verilmiştir. Aynı foton eleği parçasına ait orta boyutlu deliklerin (Bkz. Şekil 5.1) olduğu bölgenin aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüleri farklı büyütme faktörleri ile birlikte Şekil 5.35b ve c'de verilmektedir. 100X objektif ile alınan ve

pürüzlerin incelendiği optik mikroskop görüntüsü ve bu bölgeye ait profilometre görüntüleri sırasıyla Şekil 5.35c ve d’de verilmektedir.



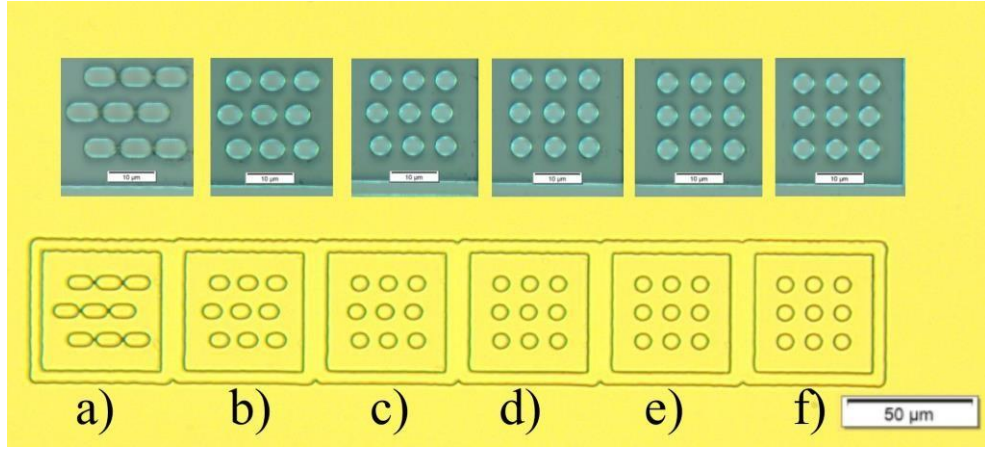
Şekil 5.35 Aşındırma süreci optimize edilmiş ETC örneği a) aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm) b) orta delikler bölgesi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 25X, skala 20µm) c) büyük delikler bölgesi optik mikroskop görüntüsü (büyütme faktörü 50X, skala 10µm) d) orta delikler bölgesi optik profilometre görüntüsü (büyütme faktörü 50X).

5.5. Maskesiz Yazıcı Hızlı Üretim Tekniği

Bu tez kapsamında yapılan tüm üretim testlerinden elde edilen bilgilerden yararlanarak, maskesiz yazıcı tekniğinde foton eleklerinin hızlı üretimi içi geleneksel yöntemlerden farklı bir yazım tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik ile kullanılan yöntemlerden daha küçük yapılara ulaşılması mümkün hale getirilmekle birlikte küçük delik yapılarının yazımı hızlandırılmıştır. Bu teknikte maskesiz yazıcı üretim parametrelerine bir yenisi eklenerek delik desenlendirme işlemi hızlı hale getirilmeye odaklanılmıştır. Bu geliştirme sürecinde temelde yapılan işlem maskesiz yazıcının optik yolundaki her bir elemanın dairesel demet ile çalışma özelliğinin kullanılmasıdır.

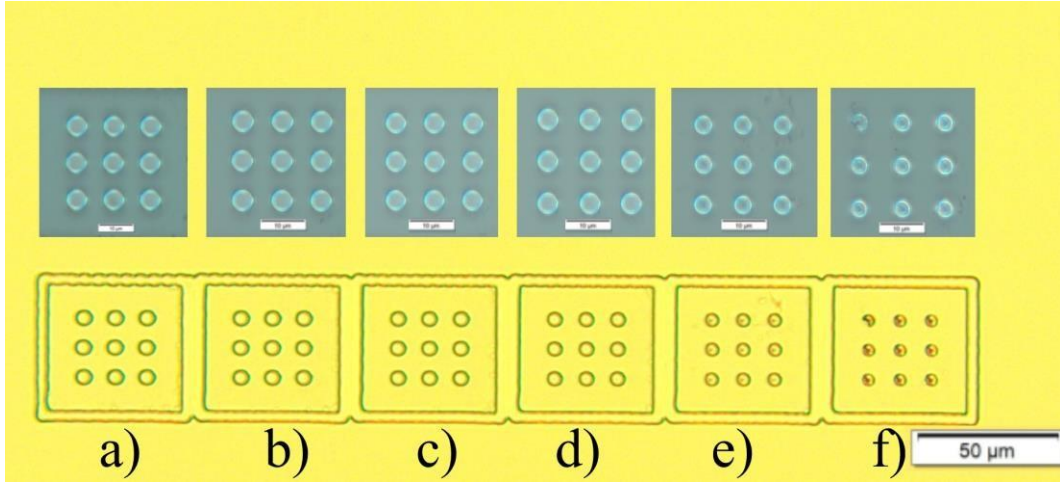
Foton eleklerinin üretiminde kullanılan dairesel alandan yola çıkılarak geliştirilen hızlı üretim tekniği, foton elekleri gibi dairesel alana sahip yapıların hızlı üretimine olanak

sağlamaktadır. Kullanılan tüm optiklerin dairesel bir açıklık içermesi bu çalışmanın temel fikridir. Genellikle hareketli tablanın hareketi ile oluşturulan dairesel yapılar tablanın hızına oldukça bağlıdır. Bu tür bir bağlılık düzgün şekillerde oluşturulması gereken mikron mertebesindeki yapıların yazımında güçlük oluşturmaktadır. Şekil 5.3'ten de görüleceği üzere yüksek hızlardan düşük hızlara gidildikçe daire şekline yakınlık artmaktadır. Öte yandan hızdaki bu düşüş binlerce deliğin yazımını oldukça yavaşlatmaktadır. Foton eleklerindeki en düşük hızlarla yazılan bölümler genellikle en küçük deliklerin bölgesidir. Bu belgelerdeki yüksek hız deliklerin daireselliğini bozmaktadır. Öte yandan küçük delik bölgelerindeki delik yoğunluğu büyük delik bölgelerine oranla genellikle oldukça fazladır. Bu iki faktör küçük delikler bölgesinin çok uzun sürelerde desenlendirildiğini göstermektedir. Maskeli litografide maske yazımında tez kapsamında kullanılan maskesiz yazıcılarda ise her foton eleği yazımında bu süre kaybedilmektedir. Üretim çalışmaları kapsamında hızlı yazım tekniği sistem parametreleri kullanılmış ve her parametre ayrı ayrı optimize edilmiştir. Hızlı yazım tekniğindeki temel fikir, tüm optik sistemin dairesel olmasından gelir. Her bir foton eleği deliğinin bu dairesel özellik ile yazılması için çalışmalar yapılmıştır. Bu teknikte dairesel alan çeşitli desenlendirme teknikleri (Bkz. Şekil 4.20) kullanılarak değil tek atış tekniği ile desenlendirilmektedir. Tek atış tekniğinde şiddet ve tabla hızı ve odak mesafesinin yanında atım süresi denilen sürekli yazım tekniklerinde kullanılmayan bir parametre olarak kullanılmaktadır. Optimum süreç parametrelerini oluşturmak üzere her seferinde tek bir parametre değiştirilerek bir dizi deney yapılmıştır. İlk olarak istenen özellik yüksek hızlarda desenlendirme olduğundan tabla hareket hızları üzerinde deneyler yapılmıştır. Tabla hareket hızları değiştirilerek odak mesafesi pozlama süresi ve şiddet sabit şekilde yapılan üretilere ait optik mikroskop ölçümleri Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5.36 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirme hızları a) 0.1 b) 0.05 c) 0.025 d) 0.01 e) 0.005 ve f) 0.0025 mm/s (şiddet 100 (bağıl) ve pozlama süresi tüm örneklerde eşit ve 0.05 s'dir, altta verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütme faktörü 10X, skala 50µm, üstte verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütme faktörü 50X, skala 10µm'dir).

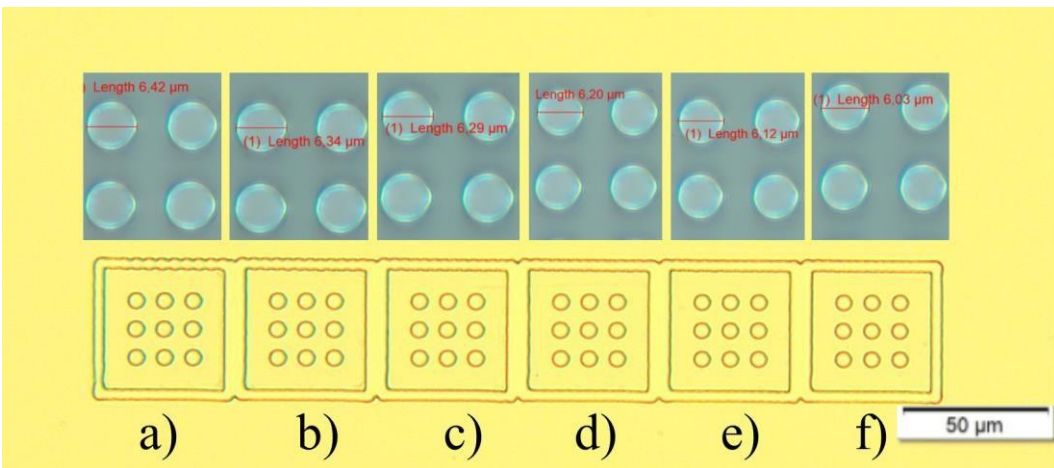
Yapılan deneysel üretimler ile pozlama süresi sabit tutulan örneklerde tabla hızının etkili olduğu görülmektedir. Desenlerin çizilerek içinin doldurulduğu deneysel üretim sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Değişken pozlama süresi ve sabit tabla hızlarına sahip deneyler ile üretimdeki hız parametresinin birincil önemi düşürülmeye çalışılmıştır. Temelde istenen iki özellik bu testlerin temel amacıdır. Bunlardan biri desenlendirme hızının artırılması ikinci ise bu hızların farklı çaptaki delikler için de kullanılabilmesidir. Sadece sabit çapta yapılan geliştirmenin foton eleği delik yazımını yeterince hızlandırmayacağı görüşü ile özellikle farklı çaplarda hızlı yazım tekniği geliştirilmeye çalışılmıştır. Farklı pozlama süresi ve sabit tabla hızına sahip deneysel üretimlerin sonuçları Şekil 5.37'de verilmektedir.



Şekil 5.37 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirmede kullanılan pozlama süresi a) 0.05, b) 0.04, c) 0.03, d) 0.04, e) 0.01 ve f) 0.005 s, (şiddet 40 (bağıl) ve hız tüm örneklerde eşit ve 0.005 mm/s'dir, altta verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütme faktörü 10X, skala 50µm, üstte verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütme faktörü 50X, skala 10µm'dir).

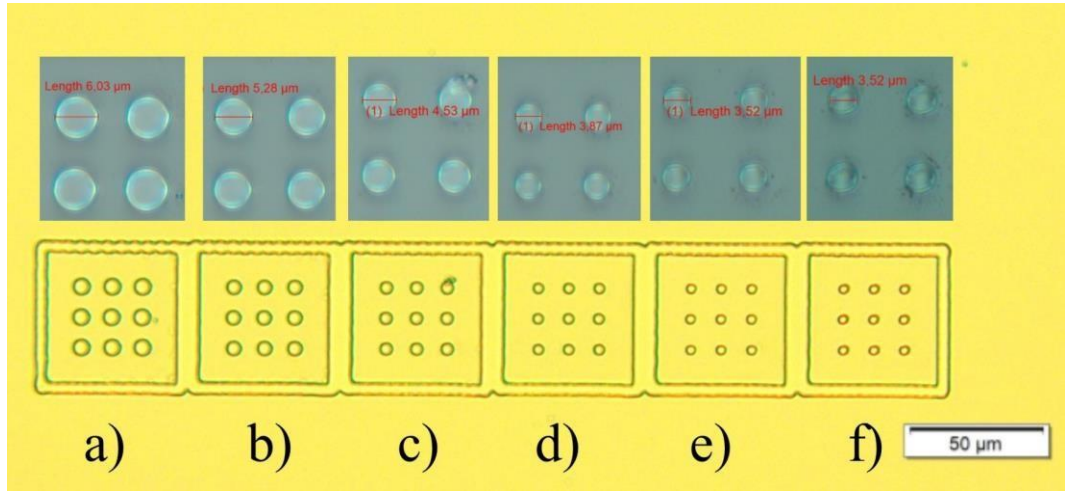
Şekil 5.37'de verilen sonuçlar ile pozlama süresinin azalması ile desenleri oluşturmak için yeterli pozlama enerjisinin sağlanamadığı görülmektedir. Burada yapılacak iyileştirme ile pozlama süresinin daha da azaltılabileceği ve tabla hızından etkilenmeyecek seviyeye ineceği planlanarak deneylere devam edilmiştir. İlk olarak farklı şiddet seviyelerinde, sabit pozlama süresi ve tabla hızlarında deneysel üretimler yapılarak yeterli minimum pozlama süresi için yeterli şiddet seviyeleri saptanmaya çalışılmıştır.

Yapılan deneysel üretim sonuçları Şekil 5.38'de verilmektedir.



Şekil 5.38 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirmede kullanılan ışık kaynağı şiddetleri a) 100, b) 90, c) 80, d) 70, e) 60 ve f) 50, (pozlama süresi tüm desenler için eşit ve 0.005s'dir. hız tüm örneklerde eşit ve 0.005mm/s'dir, altta verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütme faktörü 10X, skala 50µm, üstte verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütme faktörü 50X, skala 10µm'dir).

Deneysel üretim setinde yapılan temel araştırma minimum delik çapı ve minimum pozlama süresi gibi parametrelerdeki etkin pozlanma şiddetinin saptanmasıdır. Saptanan bu şiddet değeri sonraki çap değişim işlemlerinde kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Önceki bölümlerde verilen odak mesafesi demet çapı değişimi bilgileri bu bölümde aktif olarak kullanılmaktadır. Değişen çaplara göre gerekli enerji/şiddet miktarını hesaplamak üzere önceki bölümlerde verilen Eşitlik 5.1 kullanılmaktadır. Tüm değerlerin hesaplanıp iyileştirilmesi için odak değişimi ile çap değişiminin de hesaplanması gerekmektedir. Elde edilen çap değerleri ile yeterli pozlama enerjileri hesaplanması gereklidir. Farklı odak mesafelerinde diğer tüm parametreler sabit tutularak yapılan deneysel üretim sonuçları Şekil 5.39'de verilmektedir.



Şekil 5.39 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirmede kullanılan odak mesafeleri a) +5 µm, b) +4 µm, c) +3 µm, d) +2 µm, e) +1 µm ve f) en iyi odak ($f=0\mu\text{m}$), (pozlama süresi tüm desenler için eşit ve 0.005s'dir. Hız tüm örneklerde eşit ve 0.005mm/s'dir, şiddet 100, (bağıl) altta verilen mikroskop

görüntülerinde büyütme faktörü 10X, skala 50 μ m, üstte verilen optik mikroskop görüntülerinde büyütme faktörü 50X, skala 10 μ m'dir).

Yapılan tüm deneysel üretimler sonucunda çeşitli çapların yazılması için şiddet değerleri saptanmış ve bu şiddet değerlerinde tam pozlanmış yapılar elde edilmiştir. Yapılan test üretimlerinde sabit şiddet ve sabit odak mesafelerinde elde edilen yapı boyutları Çizelge 5.2'de verilmektedir.



Çizelge 5.2 Hızlı yazım tekniği parametrelendirme çalışmalarında elde edilen parametrik delik çapları.

Odak Mesafesi (μ m)	Şiddet (bağıl)	Delik Çapları (μ m)
+5	50	6.42
+5	60	6.34
+5	70	6.29
+5	80	6.20
+5	90	6.12
+5	100	6.03
+0	100	3.52
+1	100	3.52
+2	100	3.87
+3	100	4.53
+4	100	5.28

+5	100	6.03
----	-----	------

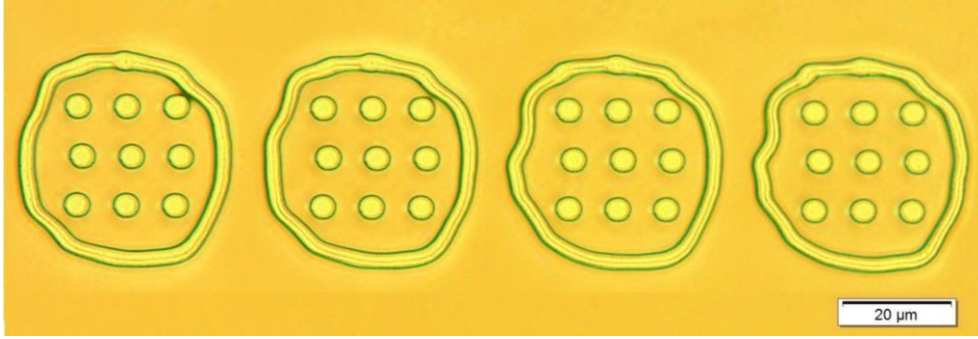
Çizelge 5.2’de elde edilen sonuçlar ile oluşturulan şiddet dağılımı ve bu dağılım sonucunda elde edilen delik çaplarının odak mesafesine bağlı değişimi Çizelge 5.3’de verilmektedir.



Çizelge 5.3 Hızlı yazım tekniği parametrelendirme çalışmalarında elde edilen odak mesafesi ve şiddete bağlı delik çapları.

Odak Mesafesi (μm)	Çap (μm)	Şiddet (bağıl)	Odak Mesafesi (μm)	Çap (μm)	Şiddet (bağıl)
0	4.18	5.65	+8	11.44	42.34
+1	4.84	7.58	+9	12.34	49.27
+2	5.5	9.79	+10	12.98	54.51
+3	5.96	11.50	+11	13.64	60.20
+4	7.04	16.04	+12	14.52	68.22
+5	8.36	22.61	+13	15.62	78.94
+6	8.81	25.11	+14	16.51	88.20
+7	10.34	34.59	+15	17.58	100

Tüm deneyler sonucunda hızlı yazım tekniği parametrelendirilmiş ve foton elekleri en dış Fresnel bölgelerindeki sayıları oldukça fazla olan deliklerin hızlı yazımı için uygun hale getirilmiştir. Elde edilen parametreler kullanılarak yüksek hızlarda delik desenleri geleneksel yöntemlerdeki düşük hızlara benzer kalitede üretilmiştir. Üretim sonuçlarından örnek bir mikroskop görüntüsü Şekil 5.40'da verilmektedir. Şekil 5.40'da verilen optik mikroskop görüntüsünde geleneksel teknik ile sürekli olarak yazılan dış çember ile bu çemberlerin içinde yer alan deliklerin yazım hızı aynıdır. Aralarındaki fark pozlama süresinin dış çemberde sürekli iç deliklerde ise 3 ms olmasından kaynaklıdır. Verilen tüm desenlerde aynı odak ve şiddet değeri kullanılmıştır. Yapılan tüm iyileştirmeler sonucunda aynı özelliklere sahip çember ve delikler arasındaki geliştirilmiş düzgün dairesel geometri farkı Şekil 5.40'ta görülebilmektedir.



Şekil 5.40 Tek atımlı desenlendirme tekniği optik mikroskop görüntüleri. Delik yapıları desenlendirmede kullanılan hız 1mm's'dir, (pozlama süresi tüm desenler için eşit ve 0.003s'tür, kullanılan şiddet 100 (bağıl). (büyütme faktörü 25X, skala 20µm).

5.6. Üretimin Optik Performansa Etkisi

Tez çalışmaları kapsamında iki farklı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda foton eleklerinin tasarımı ve üretimi konusuna odaklanılmıştır. Yapılan üretim çalışmalarında sıklıkla karşılaşılan bir durum olan üretim toleransları ve yapısal bozulmalar bu bölümün ana konusudur. Foton elekleri hassas üretim gerektiren optik bir elemandır. Işığın kırınımına dayalı çalışma prensibi olan bu tip optiklerde yapı şekilleri ve boyutları birincil önceliktir. Yapılan çalışmalar ile ilk olarak foton eleği konusunda çalışılmış ve üretim için çeşitli geometriler oluşturulmuştur. Öte yandan tasarlanan optiklerin optik özellikleri

olan şiddet ve çözünürlük değerleri simülasyonlar ile belirlenmiştir. Tezin ikinci çalışma bölümünde iki farklı yöntem ile foton elekleri üretilmiş ve yapısal ölçümler alınmıştır. Herhangi bir geri bildirim mekanizması olmadan yapılan çalışmaların hepsinde ortak bir davranış gözlenmektedir. Bu davranış yapı şekillerinde değişiklik olmadan deliklerin büyümesi olayıdır. Deneysel üretimlerde hızlı çalışan bir geri bildirim mekanizması olmasına rağmen yüksek sayılı üretimlerde toleransların göz önüne alınması gerekmektedir. Bu bölümde üretim toleranslarının ve işlem adımlarının, foton eleğinin optik performansına etkisi araştırılmıştır. Yapılan örnek bir tasarım ile her bölgedeki deliklerin yapısal ölçümleri yapılmış ve farklı üretim teknikleri için sonuçlar incelenmiştir. İncelenen örnekler içinden genel olarak dağılımı yansıtan altı adet örneğin yazım parametreleri Çizelge 5.4’te verilmektedir.

Çizelge 5.4 Kimyasal aşındırma ve düşürme yöntemi örneklerine ait desenlendirme parametreleri.

Örnek	1-4 Bölgeleri		5-13 Bölgeleri		14-35 Bölgeleri	
	V(mm/s)	I(bağıl)	V(mm/s)	I(bağıl)	V(mm/s)	I(bağıl)
LOF 18	0.025	0,1	0.015	0.01	0.0085	0.002
LOF 3	0.035	0.1	0.025	0.01	0.01	0.002
LOF 24	0.025	0.1	0.015	0.008	0.0085	0.001
ETC 6	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
ETC 5	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.001
ETC 16	0.025	0.1	0.015	0.005	0.0085	0.001

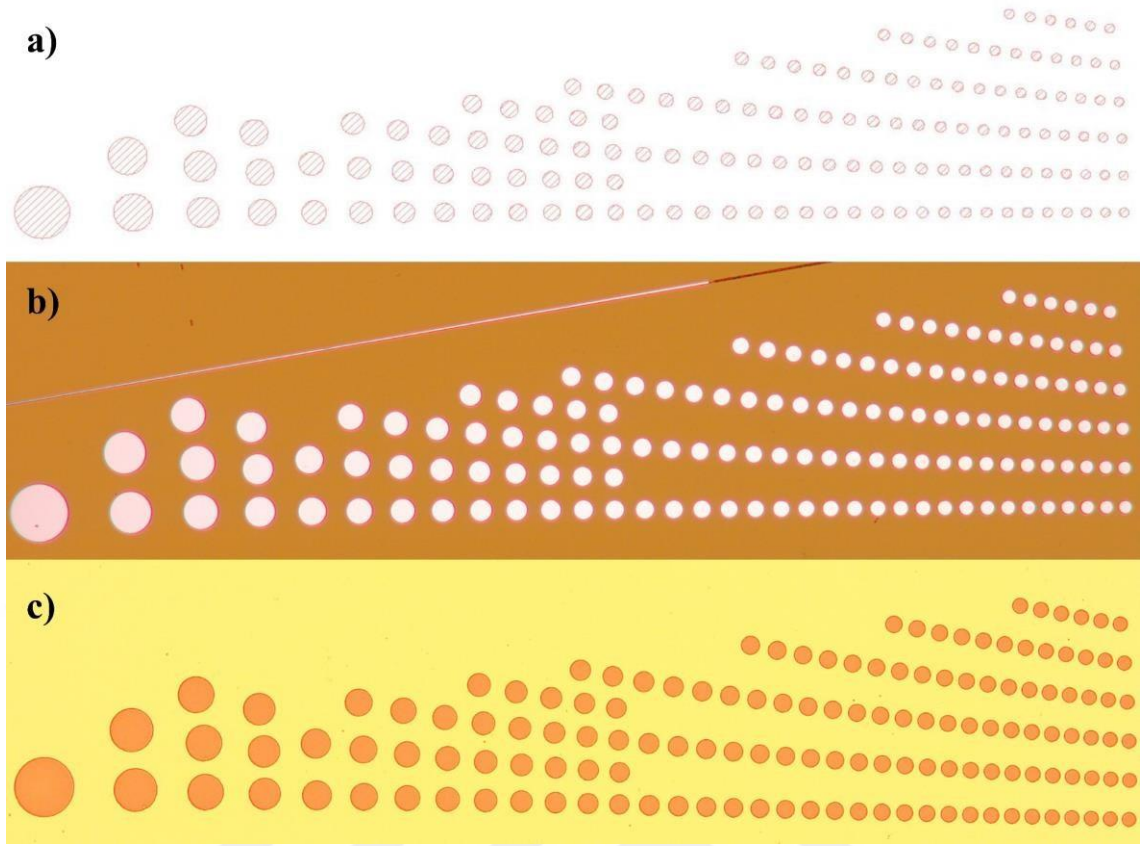
Verilen üretim örneklerinin her biri farklı parametrelere sahiptir. Bu örneklerin seçilmesindeki temel sebep üretimde oluşan davranışın yöntemden ve parametrelerden bağımsız olarak incelenmesidir. Yapılan ilk üretimlerde bir foton eleği parçası incelenmiş ve tasarım değerlerinden farklı delik çapları saptanmıştır. Tüm üretimler incelendiğinde

geri bildirim mekanizmaları ile tekrarlanan üretimler olmadan her üretimde aynı davranışa ulaşıldığı görülmüştür. Çizelge 5.4’te verilen tüm örnekler kendi desenlendirme parametrelerinde optimize aşındırma ve düşürme işlemine sahip başarılı yapısal sonuçlar veren örneklerdir. Tasarlanan foton eleğine ait özellikler Çizelge 5.5’te verilmektedir.

Çizelge 5.5 Üretim etkilerinin incelenmesi amacıyla tasarlanan foton eleği parametreleri.

Parametre	Değer
Tasarım dalgaboyu	632.8 nm
Odak uzaklığı	0.15 m
Bölge sayısı	35
Delik sayısı	7660
Minimum delik çapı	~20 μm
Maksimum delik çapı	~110 μm
d/w oranı	1 - 1.53

Üretilen foton eleği parçalarının tasarım ve iki farklı yöntemle üretimine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.41’de gösterilmektedir.

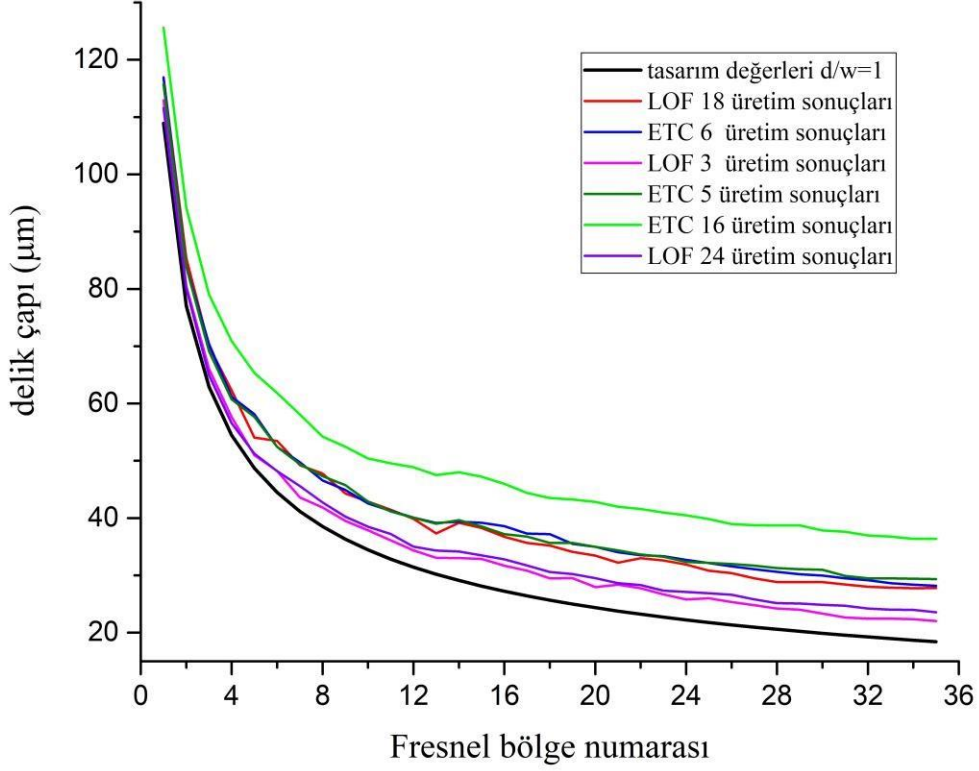


Şekil 5.41 a) Üretim etkilerini belirlemek amacıyla tasarlanan foton eleği parçası tasarım görüntüsü b) düşürme yöntemi ile üretilmiş foton eleği parçası optik mikroskop görüntüsü c) ıslak kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiş foton eleği parçası optik mikroskop görüntüsü, (büyütme faktörü 2.5X, skala 200 μm).

İncelenen örneklerdeki boyutsal analiz sonucu her bölgede delik çaplarının değiştiği fakat bu değişimin sabit veya lineer olmadığını göstermektedir. Tasarımda elde edilen bilgilerden yola çıkarak delik çaplarındaki değişimin foton eleğinin şiddet verimini ve bölgesel olarak değişimin ise çözünürlüğü etkilediği bilinmektedir (Bkz. Bölüm 3).

Üretilen örneklerdeki dairesel yapılar incelendiğinde, geometrik yapıda bozulmaların olmadan boyutsal artışın gerçekleştiği görülmüştür. Deney seti içerisindeki her örnek için optik mikroskop yardımıyla 35 bölgeden ölçümler alınmıştır. 35 Fresnel bölgesi içindeki her deliğin kendi bölgesi içinde tüm dairesel dağılımda çapları sabittir. Alınan optik mikroskop görüntüleri ile yapılan ölçümlerin yanında bu bölgelere ait bölge genişlikleri de kaydedilmiş ve d/w oranları hesaplanmıştır. Bu oranın hesaplanmasındaki temel sebep şiddetin ve çözünürlüğün bu oran ile değişmesidir. İlk ölçümlerde toplam altı örnek için delik çapları ölçülmüştür. Delik çaplarının bölge numarasına göre değişimi Şekil 5.42’de

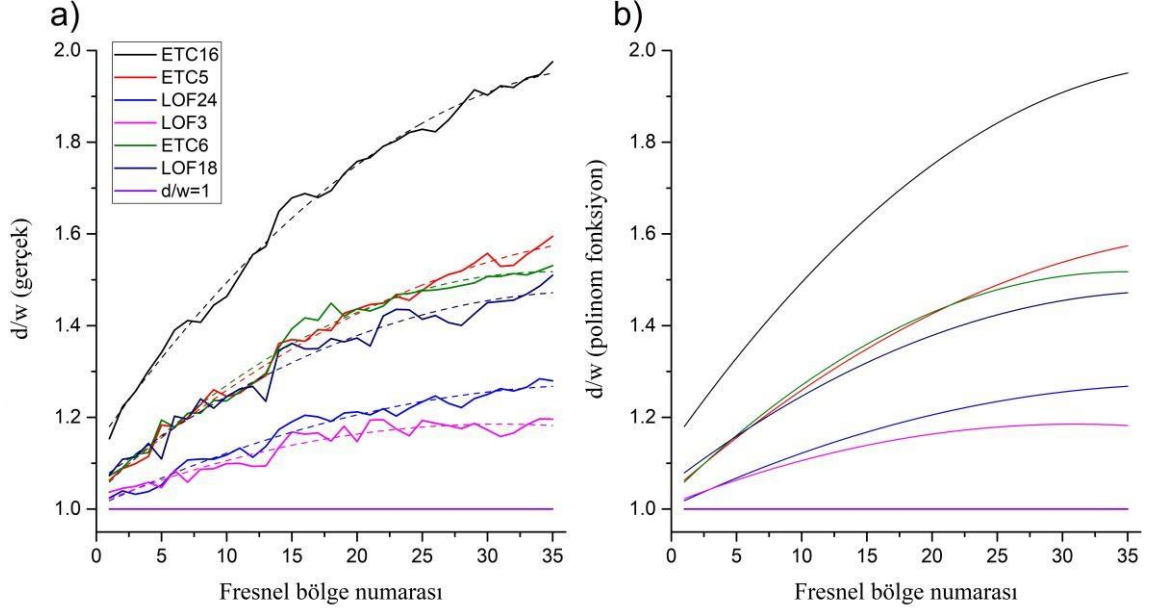
verilmiştir. Tasarlanan örnekte olan teorik boyutsal davranış aynı şekilde verilmektedir. Diğer yandan optik mikroskop ile alınan ölçümler sonucunda çapsal değişimin genel davranışı değişmemiş fakat tasarımdan farklı boyutlar elde edilmiştir.



Şekil 5.42 Tasarlanan ($d/w=1$) foton eleği delik çapları ile üretilen örneklerin delik çaplarının Fresnel bölge numarasına göre dağılım grafiği

İncelenen örneklerdeki boyutsal değişim ayrıca her bölgenin bölge genişliği (w) ile oranlanarak d/w oranları elde edilmiştir. Üretimde beklenen davranış her bölgedeki deliğin yalnızca desenlendirmede kullanılan çizgi genişliği kadar değişmesidir. En içteki deliklerdeki büyüme oranı delik çapı ile çizgi genişliğinin büyük olmasından dolayı oldukça düşükken küçük deliklerde bu oran artmaktadır. Bu durum beklenen bir durumdur ve tüm foton eleği üretim tekniklerine genellenebilir. Genellikle üretimi sınırlayan faktör minimum yapı boyutları olduğundan göreceli büyük yapılar her teknik için kolay bir üretim sürecini getirmektedir. Öte yandan istenmeyen bu genişlemeler bölgesel olarak incelendiğinde, en dış deliklerin oranlarındaki büyüme dikkat çekmektedir. Bu büyümenin anlamı yüksek çözünürlüğe katkı getiren bölgelerin artmasıdır. Bu bölgelerdeki artış doğal olarak şiddeti de artırmaktadır. Bölüm 3'te teorik olarak bilgilerin verildiği d/w oranı üretim alanında da sonuçlara etki eden bir faktör

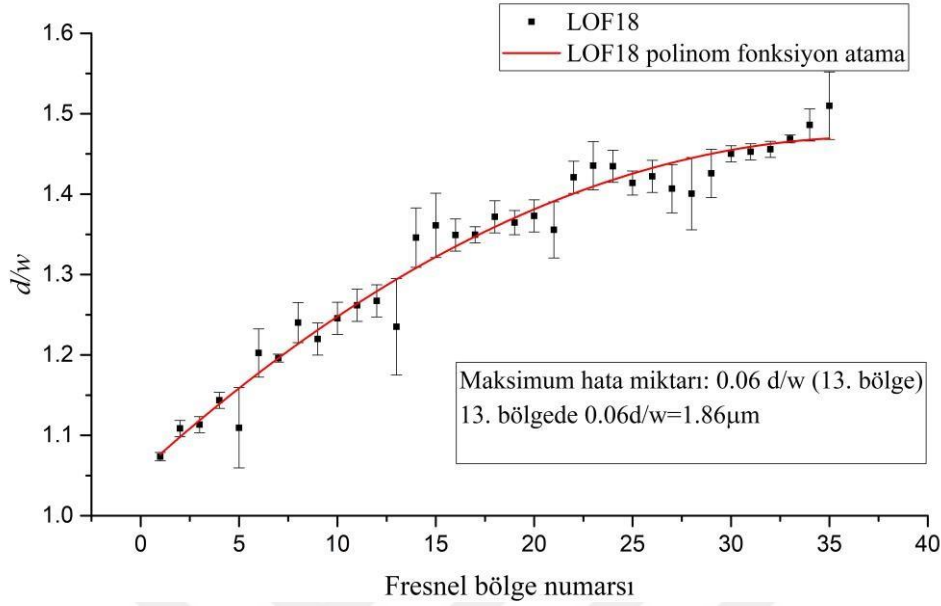
olarak görülmüştür. Tüm bölgelerdeki çapsal büyümelerin incelenmesi için alınan ölçümler sonucunda d/w oranlarının bölgelere göre dağılımları incelenmiş ve belirli bir düzen şeklinde değiştiği saptanmıştır.



Şekil 5.43 a) Tasarlanan ($d/w=1$) ve üretilen foton eleği parçalarındaki d/w oranlarının Fresnel bölgelerine dağılım grafiği b) d/w oranları için atanan polinom fonksiyonları grafiği.

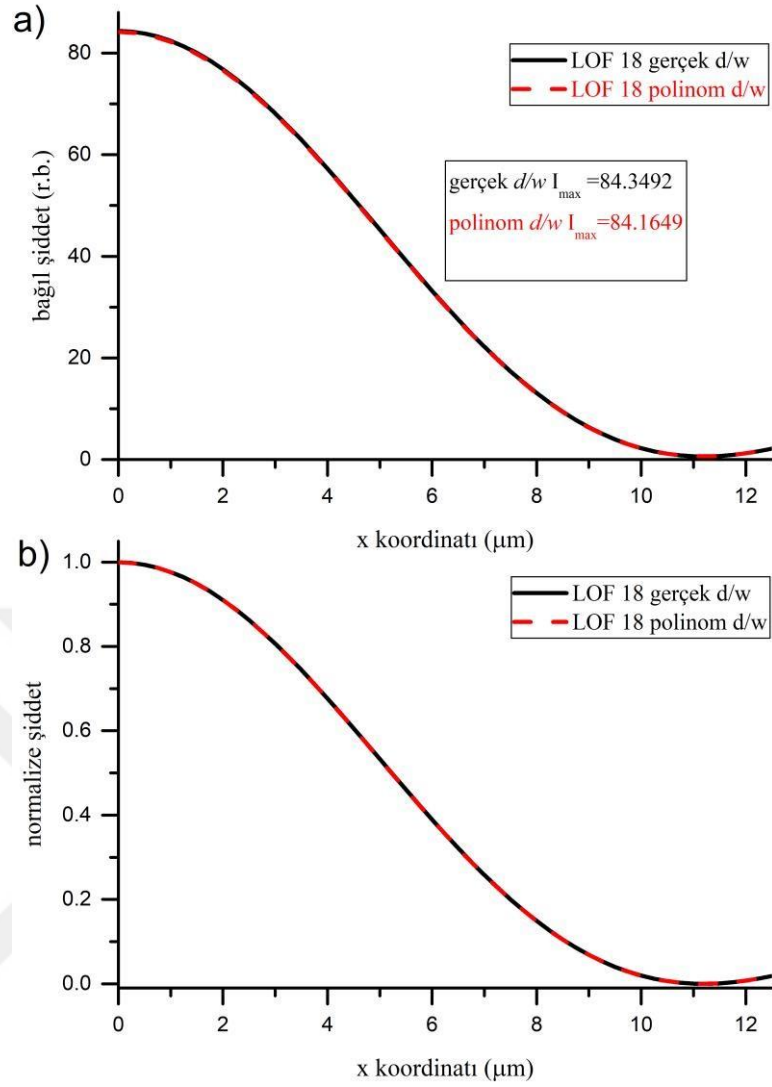
Şekil 5.43’de d/w oranlarının dağılımı ve polinom fonksiyon ataması sonuçları verilmiştir. Üretilen örneklerdeki çapsal değişim uyumunun belli bir düzende olması, hem geri bildirim mekanizmasını hem de üretim sonuçlarının simülasyonlar ile hızlı belirlenmesini sağlamaktadır. Üretilen örneklerdeki değişimler ve bu değişimlerin hata payları belirlenerek üretim ile değişen yapıların formülize edilmesi düşünülmüştür. Belli bir düzende değişen üretim etkisinin genelleştirilmesi ile hem üretimdeki değişimlerin optik performansa etkisi hem de geri bildirim mekanizmaları üzerinde geliştirilmelerin sağlanması olanaklı hale gelmektedir. İlk olarak üretilen örneklerdeki üretim sonucunda ortaya çıkan delik çapları sonrasında da d/w oranları hesaplanmış, ortaya çıkan sonuçlar matematiksel bir eğriye uydurulmuşlardır. Bu uydurma işlemi sırasında gerçek değerler ve sapma miktarları hesaplanmıştır. Gerçek oransal dağılım ile atanan matematiksel fonksiyon arasındaki farklar incelenmiş ve elde edilen değerlerin oldukça küçük olduğu anlaşılmıştır. Buradaki değişim miktarları en büyük sapma için yaklaşık olarak $0.06d/w$ kadardır. Bu değer sapmanın en büyük bölge olduğu 13. Bölge için $1.86 \mu\text{m}$ ’dir (LOF18

örneği). LOF 18 örneği için deneysel olarak elde edilen d/w oranları ile atanan polinom fonksiyon grafiği Şekil 5.44'te verilmektedir.



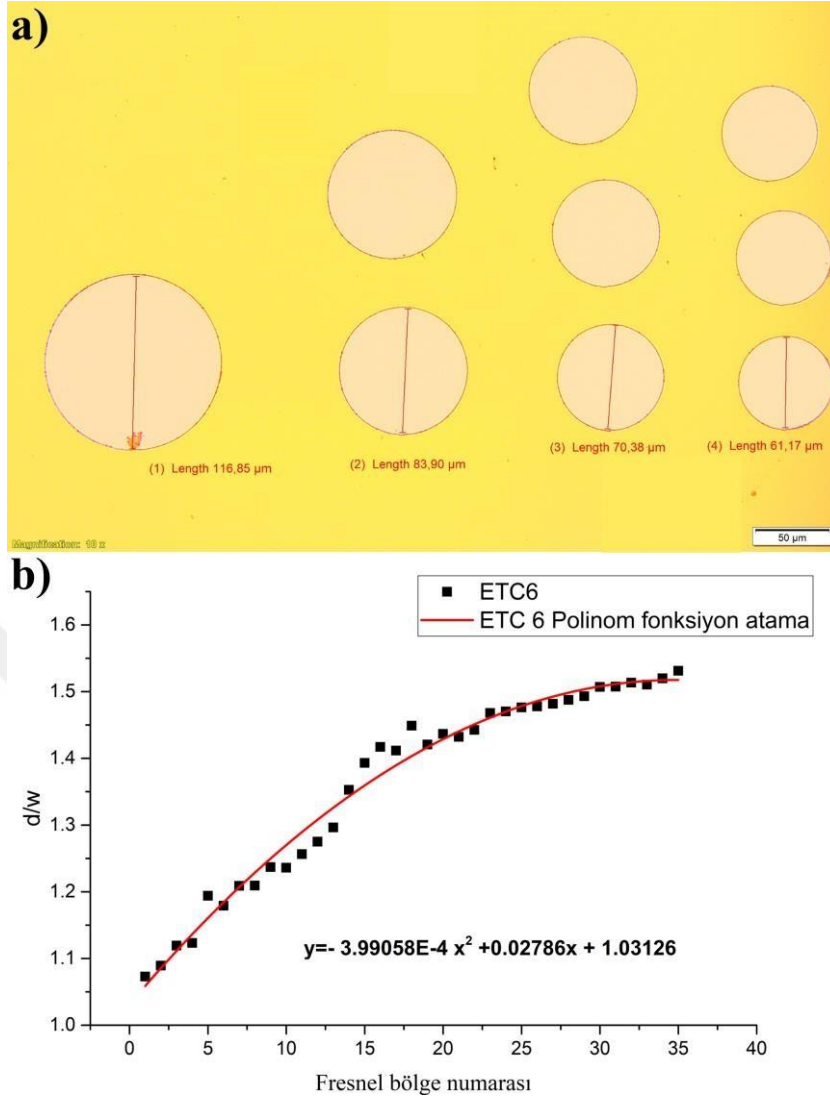
Şekil 5.44 LOF18 örneği ölçülen d/w oranları ile polinom fonksiyon atama yöntemi d/w oranları karşılaştırması.

LOF18 örneğinde yapılan ölçümler ve atanan fonksiyon ile oluşturulan d/w oranları, tezin 3. bölümünde teorisi verilen ve tez kapsamında geliştirilen simülasyon programına girdi olarak sağlanmıştır. Her bir d/w oranı tasarımı yapılan $d/w=1$ oranı yerine sisteme girilmiştir. Simülasyon programına girdi işlemi iki şekilde yapılmıştır. İlk durumda sisteme her bir deliğin çapı manuel olarak ölçülen gerçek d/w oranları girilerek hesaplama yaptırılmıştır. İkinci girdi durumunda ise LOF18 örneğindeki d/w oranına atanan polinom fonksiyonu sisteme tanıtılarak her bölge için bu polinom fonksiyona uygun d/w oranı üretilmesi sağlanmıştır. İki şekilde oluşturulan d/w oranları (ölçülen ve hesaplanan) ile elde edilen şiddet ve çözünürlük simülasyonları Şekil 5.45'te verilmiştir. Şekil 5.45'te verilen grafiklerde şiddet değişiminin daha iyi anlaşılması için bağıl şiddet ve şeklin b kısmında ise çözünürlük değişiminin daha net görülebilmesi için normalize şiddet grafikleri verilmiştir. Verilen grafiklerde neredeyse hiç fark olmayışı polinom modeli ile gerçek d/w oranları ile oluşturulan d/w oranlarının uyumunu göstermektedir.



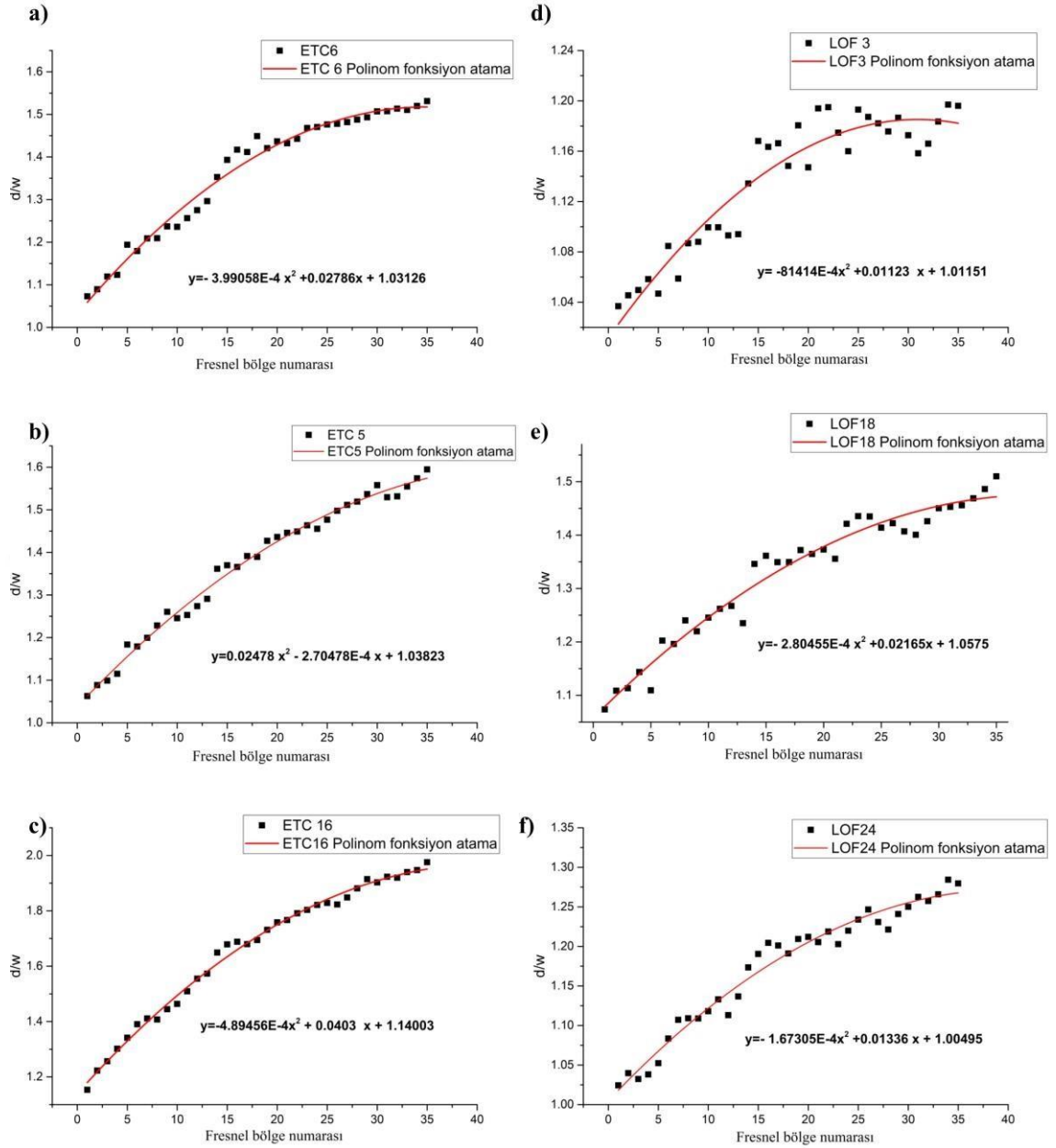
Şekil 5.45 LOF18 gerçek d/w oranları ile polinom atama yöntemi ile oluşturulan d/w oranları simülasyon sonuçları a) bağıl şiddet grafiği b) normalize şiddet grafiği.

Düşürme örnekleri olan LOF örnekleri için yapılan çalışmalar aşındırma örnekleri için de yapılmıştır. İlk olarak üretilen deliklerin boyutları ölçülmüş ve bu boyutlar yardımı ile d/w oranları gerçek çap değerlerinden hesaplanmıştır. Aşındırma örnekleri için de gerçek d/w değerlerine en yakın sonucu veren polinom fonksiyon atama işlemi yapılmıştır. Ölçülen boyutların gösterildiği optik mikroskop görüntüsü ile ölçümler ve hesaplamalar sonucunda çizilen d/w oran grafiği Şekil 5.46'da verilmiştir. Şekil 5.46'da ETC6 örneğinden alınan optik mikroskop görüntüleri gibi diğer üretim örneklerinden de her deliğin çapı için ölçümler alınmıştır. Öte yandan yapılan hesaplamalarda ETC örneklerindeki sapma miktarlarının LOF18 örneğinde verilen sapmalardan daha küçük sapmalar olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.46 a) kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilen foton eleği parçası ilk dört bölge optik mikroskop ölçüm sonuçları (büyütme faktörü 10X, skala 50 μm) b) ölçülen d/w oranları ile atanan fonksiyon Fresnel bölge numarasına karşı d/w oranı grafiği.

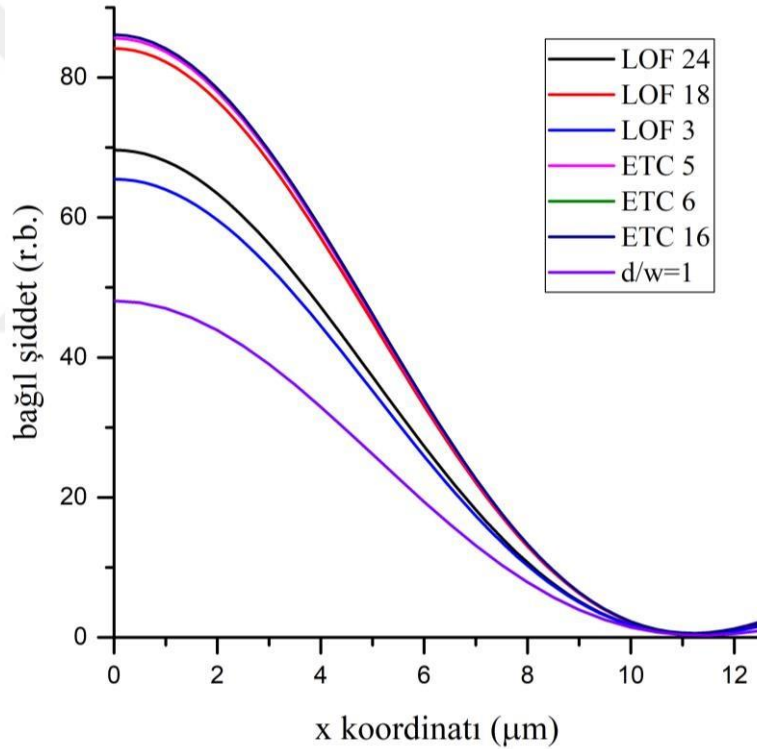
Tüm örnekler ile yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar Şekil 5.47’de verilmektedir. Özellikle altı farklı örnek üzerinde yapılan ölçümlerde gerçek çapsal oranlar ile atanan fonksiyonlardaki oranlar karşılaştırılmış ve sonuçların Şekil 5.45’te olduğu gibi birbirinin yaklaşık olarak aynısı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.47 Üretim örneklerinden ölçülen d/w oranlarını ile oluşturulmuş fonksiyon atama grafikleri, (noktalı grafikler gerçek d/w oranlarını kırmızı çizgiler ise atanan ikinci derece polinom fonksiyonları göstermektedir). Islak kimyasal aşındırma örnekleri a)ETC6 b) ETC5 c) ETC16, düşürme örnekleri d)LOF3 e)LOF18 f)LOF24 örneklerini göstermektedir.

Şekil 5.47’de verilen tüm polinomlar ikinci derece bir fonksiyona uygun polinomlardır. Atanan polinomlardaki sapma miktarları tek tek hesaplanmış ve hepsindeki sapmanın LOF18 örneğindeki sapmadan az olduğu belirlenmiştir. Örneklerin simülasyonlarla incelenmesi amacıyla Şekil 5.45’te verildiği gibi her iki teknik ile hesaplamalar yapılmış

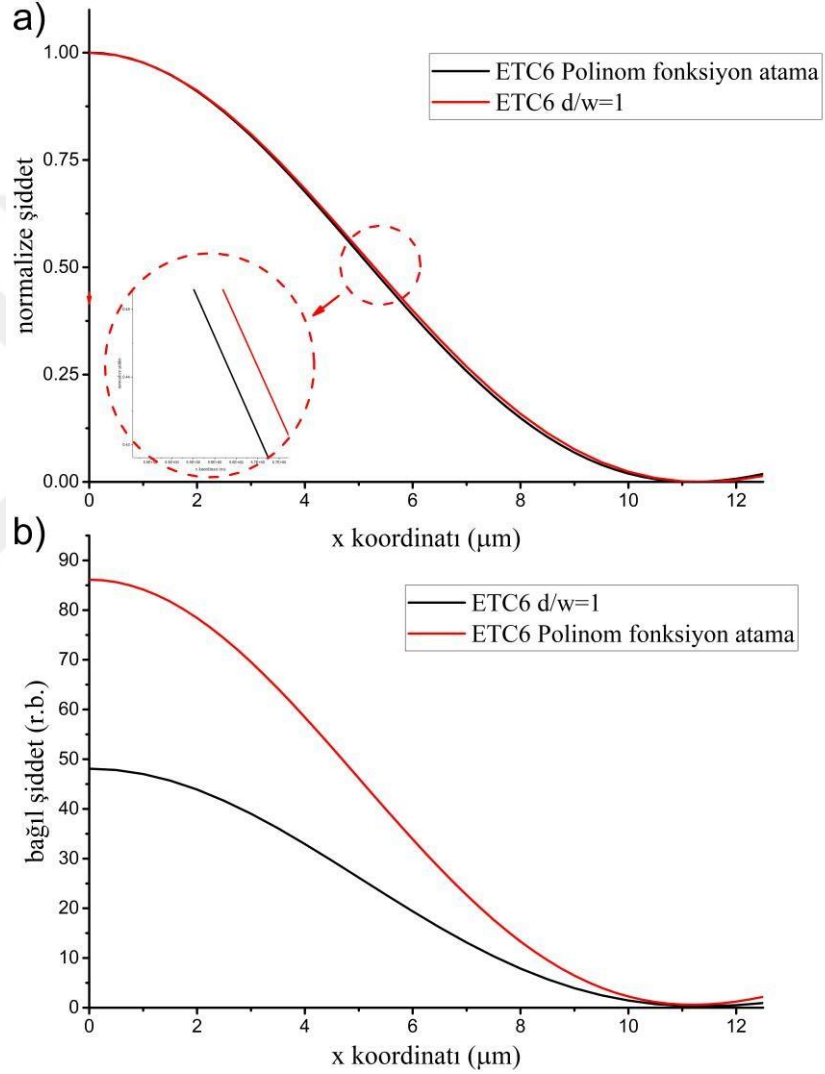
ve ikinci derece polinomların simülasyonlarda gerçek değerler yerine kullanılabileceği görülmüştür. Tasarımda verilen d/w oranı her bölgede 1'dir. Üretim sonuçlarından elde edilen polinom eğrilerinin simülasyona girdi olarak sağlanması ile her örnek için tasarım ve üretimdeki şiddet ve çözünürlük değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin yer aldığı grafik Şekil 5.48'de verilmektedir. Hesaplanan değerlerde tüm örneklerin odak noktasında oluşturduğu şiddet değerlerinin tasarımdan fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan yararlanılarak üretim etkisinin şiddet üzerinde olumlu etki gösterdiği sonucuna varılabilir. Öte yandan diğer önemli bir özellik ise çözünürlüktür. Çözünürlük ve şiddet genellikle birbirine göreceli olarak bağlı iki foton eleği özelliğidir. Her iki özelliğin de aynı anda geliştirilmesi kazanç kayıp mekanizması, şiddet-çözünürlük, sebebiyle mümkün olmamaktadır.



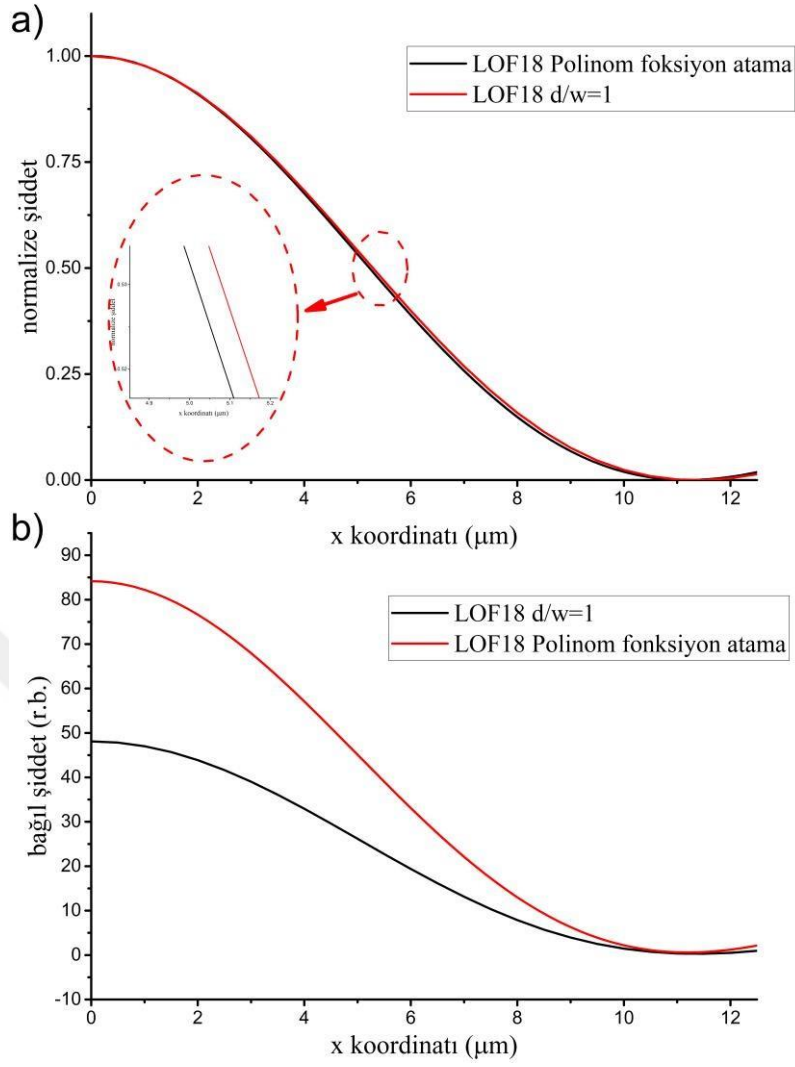
Şekil 5.48 Üretilen örneklerden alınan delik çapı ölçüm sonuçları ile atanan fonksiyonlar yardımıyla simüle edilen bağıl şiddet grafiği.

Tasarımda verilen d/w oranının 1 olması sebebiyle şiddet artışının görülmesi olanaklıdır. Diğer yandan çözünürlük değerlerinin artışı da söz konusudur. Bu artışın sebebi en dış deliklerdeki büyüme faktörünün içtekilere oranla daha fazla olmasıdır. Dıştaki, küçük deliklerin çözünürlüğe katkısı daha fazladır. Bu tasarımda kullanılan sabit d/w oranının 1.5

olması üretim sonuçlarından gelen katkıların negatif yönde olmasını sağlayabilecek özelliktedir. LOF18 ve ETC6 örneklerinin şiddet ve çözünürlük açısından incelenmeleri sonucunda şiddet değerlerinin net bir artış içinde olduğu ve çözünürlük değerlerinin ise neredeyse sabit kaldığı, çok detaylı incelemelerde ise hafifçe arttığı görülmektedir. Her iki örnek için de simülasyon sonuçları Şekil 5.49 ve Şekil 5.50’de verilmektedir. Ayrıca tüm örnekler için elde edilen çözünürlük ve şiddet sonuçları da Çizelge 5.6’da verilmektedir.



Şekil 5.49 ETC6 örneği tasarım ($d/w=1$) ve fonksiyon atama yöntemi ile oluşturulan a) normalize şiddet b) bağıl şiddet grafikleri.



Şekil 5.50 LOF18 örneği tasarım ($d/w=1$) ve fonksiyon atama yöntemi ile oluşturulan a) normalize şiddet b) bağlı şiddet grafikleri

Çizelge 5.6 Düşürme ve ıslak kimyasal aşındırma yöntemleri ile üretilen örneklerin hesaplanmış şiddet ve FWHM değerleri.

Örnek	Şiddet (bağlı)	FWHM (m)
$d/w=1$ (tasarım)	48.0979	5.289^{-6}
LOF3	65.4891	5.238^{-6}
LOF24	69.6623	5.225^{-6}
LOF18	84.1650	5.223^{-6}
ETC6	86.1183	5.226^{-6}
ETC5	85.6416	5.210^{-6}

ETC16	86.1243	5.213 ⁻⁶
-------	---------	---------------------

Tasarımlarda ayrıca daha yüksek şiddet elde etmek amacıyla sıklıkla kullanılan d/w oranı 1.53'e ayarlanmıştır. Sonuçlar, eleklerin uygun bir geometrik düzeltme geri bildirimi kullanılmadan üretimde problemlerin oluştuğunu ve art arda deliklerin iç içe geçmesinin kaçınılmaz olduğunu göstermiştir. Bu durumda, ne deliklerin doğru boyutu ne de optik performansa katkıları tahmin edilebilirdir. Sabit $d/w = 1$ oranlı bir tasarım yapmak, geri bildirim kullanmadan, sadece kabul edilebilir bir optik performans için değil, aynı zamanda hızlı bir üretim için de çok faydalıdır. Bu çalışma, üretimin herhangi bir geri bildirim olmadan, optik performans üzerinde olumlu etkiler olabileceğini göstermektedir. Bu çalışmanın bir diğer özelliği, bir defalık geri bildirim ile sıkı toleranslar için üretimin geliştirilmesidir. Bu işlem, üretim-hata mekanizmasını geliştirmek için matematiksel hesaplamaların avantajlarını göstermektedir. Bir kerelik tasarım geri bildirimi ile ikinci dereceden polinom modeli kullanarak, tasarım parametresi değişiklikleri yapılabilir ve deliklerin genişleme etkilerini çözmek için hızlı mekanizma elde edilebilir.

Bu çalışmada, foton eleği üretiminde deliklerin plansız genişlemesi olayı maskesiz litografi yöntemiyle incelenmiştir. Özellikle daha yüksek sayılı üretimler için delik çapındaki genişlemeler faydaya dönüştürülebileceği tartışılmıştır. Simülasyonların ilk önemli sonucu, eleklerin çözünürlüğü tasarım modeline göre artırılmış olmasıdır. İkinci sonuç, odak düzlemindeki göreceli şiddetinin 1.70 kattan daha fazla artmasıdır. Bu çalışma, foton elek üretim süreci için farklı bir sonuç göstermektedir. İlk gelişme, kanıtlanmış analitik model ile herhangi bir deneysel ölçüm yapılmadan foton eleğinin performans hesaplamasıdır. Bu çalışma, foton elek üretimi için üretim etkileri ve geri bildirim mekanizması hakkında yeni bilgiler sunmaktadır. Üretim modelleri, süreçleri genelleştirmek ve geliştirmek için farklı üretim işlemlerinde kullanılabilir.

Sonuç olarak, üretimdeki deliğin genişleme etkisi her zaman optik performansı olumsuz yönde etkilemez. Aksine, üretim sırasındaki bu etkiler, bazı durumlarda foton eleklerinin optik performansını arttırmak için kullanılabilir. Bu çalışma, foton eleklerinin üretim aşamalarına herhangi bir geri bildirim düzeltmesi yapmadan optik performansın korunabileceğini ve hatta geliştirilebileceğini göstermektedir. Bu çalışmanın bir başka faydası, daha iyi bir tolerans gerektiğinde genişlemenin büyüklüğünün geri besleme mekanizması olarak kullanılabileceği sonucudur. Daha hızlı bir üretim için, delik

boyutları uygun bir ikinci dereceden polinom geri besleme fonksiyonu kullanılarak ayarlanabilir.

6. GENEL SONUÇLAR VE YORUM

Mikro ve Nano Yapılı Süper Çözünürlük Kırınım Optiklerinin Tasarımı ve Simülasyonları tez çalışmasında foton eleği tipindeki mikro optiklerin tasarlanması ve bu optiklerin üretilmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır. İlk çalışma MATLAB tabanlı bir tasarım programının geliştirilmesi ve geliştirilen bu program ile foton eleklerinin özelliklerini taşıyan geometrik modellerin oluşturulmasıdır. Geliştirilen bu modellerde dikkat edilen parametrelerin başında üretilebilirlik gelirken, diğer önemli özelliklerden olan şiddet ve çözünürlük değerlerinin de korunması hatta geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tez kapsamında üretilebilir ve optik özellikler bakımından geliştirilmiş tasarımlar yapılmıştır. Tasarlanan her foton eleğinin simülasyon kodu ile optik özellikleri incelenmiş ve bu özellikler kullanım alanına göre sınıflandırılmıştır. Geleneksel olarak üretilen foton eleklerinde sıkça rastlanan ve şiddet artırıcı faktör olarak kullanılan oransal çap değişimi, d/w oranı, bu çalışmada şiddet ve çözünürlüğün aynı anda modülasyonu için kullanılmış ve foton eleklerinin kullanım alanına göre geliştirilmesi sağlamıştır. Literatür bilgileri kullanılarak farklı bakış açıları geliştirilmiş üç tip foton eleği tasarımı tanıtılmıştır. Tanıtılan tasarımlardaki önemli gelişmelerden bir tanesi şiddet çözünürlük modülasyonları olurken diğeri ise her türlü foton eleği yapısına uygulanabilen bir yapıda bir esneklik içermesidir. Tasarlanan her bir modelin ilk tasarım parametreleri, delik sayısı, bölge sayısı ve deliklerin konumsal dağılımı tamamen aynı olmakla birlikte değiştirilen oransal dağılım ile kullanım alanına göre optimize edilmiş örnekler elde edilmiştir. Bu örneklerdeki değişik şiddet ve çözünürlük değerleri literatürde verilen sabit oransal dağılıma ($d/w=1$) göre şiddette %57 ve çözünürlükte % 10.5'e varan geliştirmelere ulaşmaktadır. Bu tip tasarımların farklı foton eleklerine uygulanabilmesi yanında yapılan tasarımlarda şiddet ile birlikte çözünürlüğün de geliştirilmesi önemli bir sonuçtur.

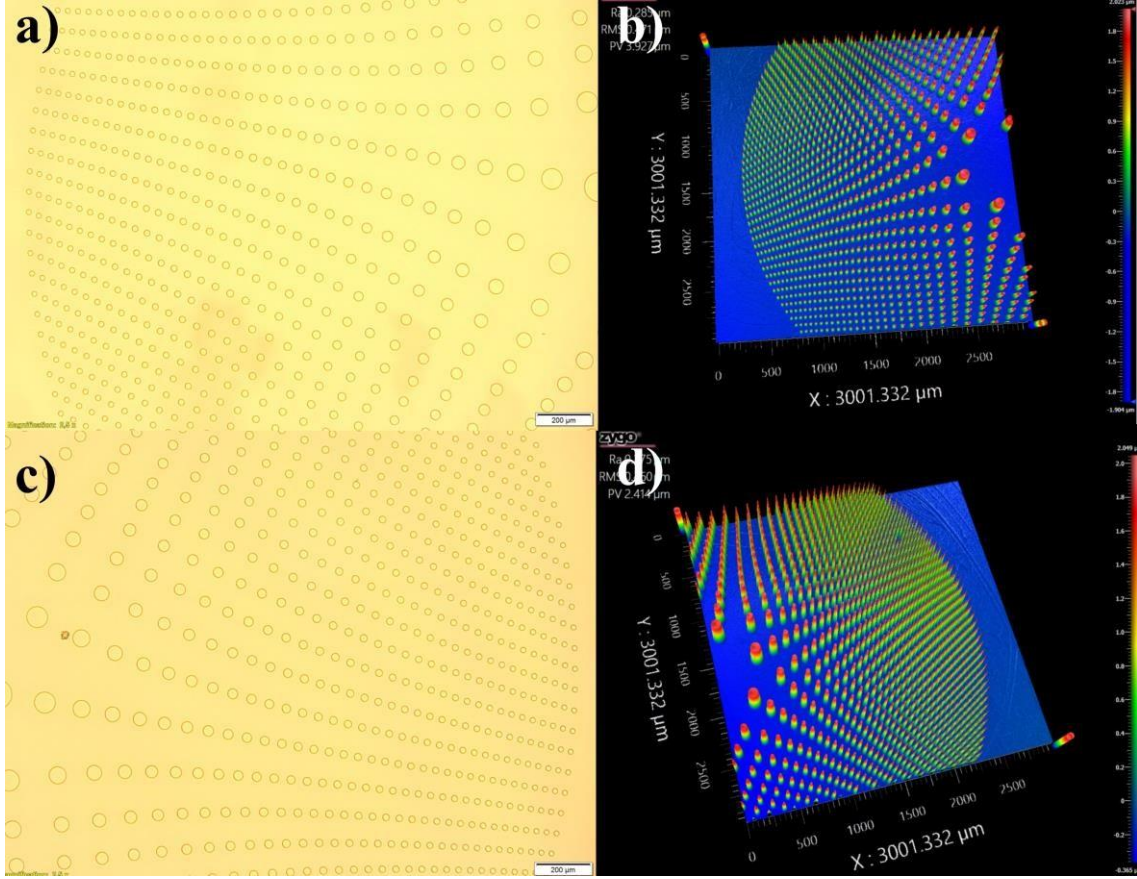
Tez çalışmaları sırasında üzerinde oldukça fazla çalışma yapılan diğer bir konu başlığı mikro optiklerin üretilmesidir. Temel yapısı önceki bölümlerde verilen foton eleklerinin üretilmesinde fotolitografi tekniği kullanılmıştır. Fotolitografi tekniğinin iki alt yöntemi

olan düşürme ve kimyasal aşındırma süreçlerinin her ikisi ile üretimler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen üretimler birkaç ana başlık altında incelemiş ve yöntem geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmalarda özellikle hata mekanizmaları üzerinde durulmuş ve foton eleklerinin üretimindeki hata mekanizmalarının çözümü için çeşitli geri bildirimler önerilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda başarılı düşürme işlemleri ve kimyasal aşındırma yöntemi için çeşitli parametre grupları üzerinde çalışılmış ve bu gruplar üretim için iyileştirmeler sağlanmıştır. Üretim sonucunda elde edilen sonuçlardan yapıların düşürme yöntemi ile daha düzgün yapılar elde edildiği görülmüştür. Aşındırma süreçlerinde iyileştirme işlemleri ile azalan yapıdaki pürüz seviyesi daha yüksek büyütme faktörleri altında görülmeye devam etmektedir.

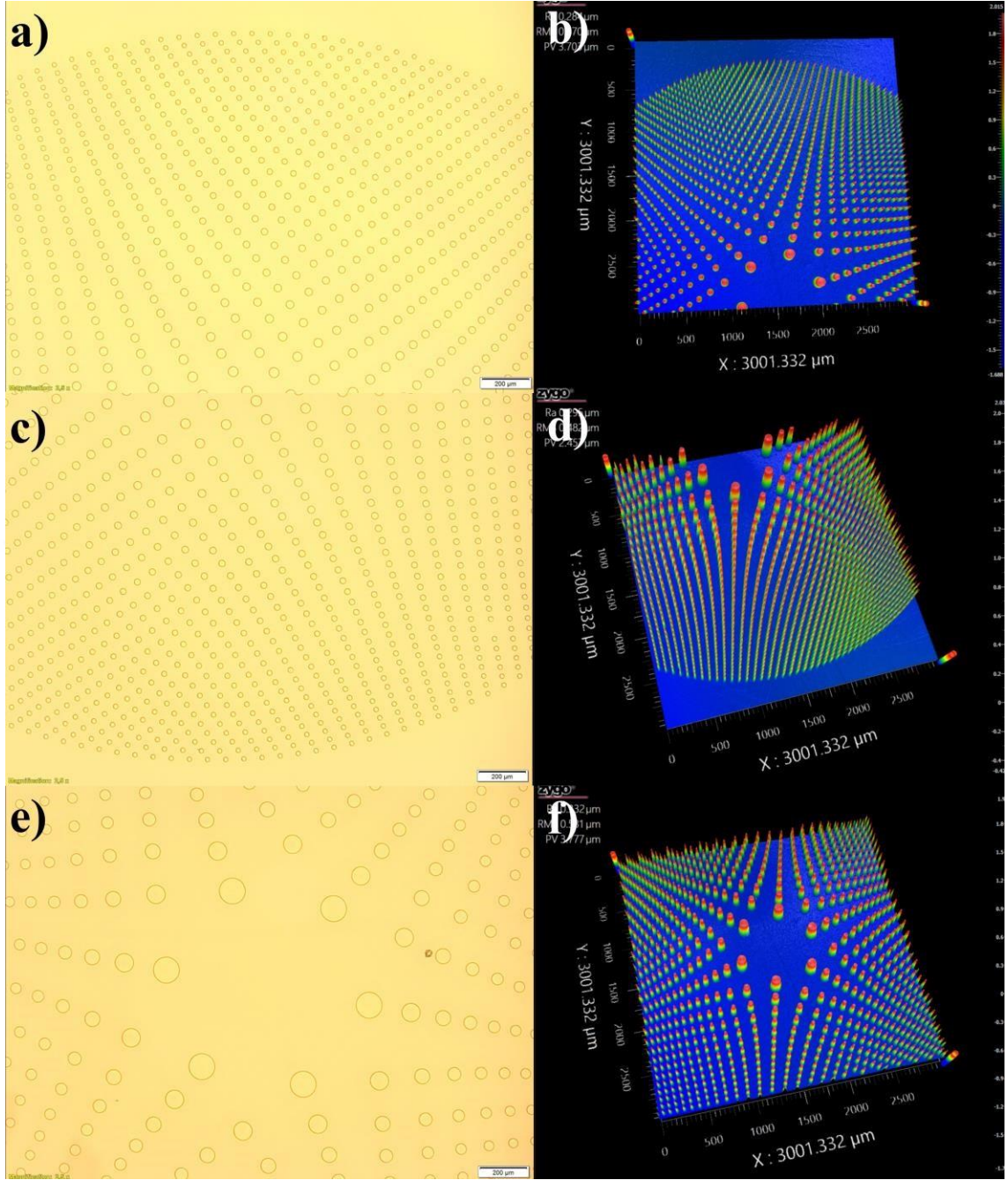
Yapılardaki pürüz seviyesini foton eleğinin kullanılacağı dalgaboyu bölgesine göre değişik etkiler meydana getirmektedir. Pürüz seviyelerinin foton eleklerindeki kabul sınırı, pürüzlü yapı boyutların kullanılan dalgaboyu ile etkileşmesine bağlıdır. Öte yandan bu problem, düşürme yönteminde görülmemektedir. Düşürme yönteminde sıcaklık parametreleri ve yüzey yapışma parametrelerin etkisi aşındırma yöntemine göre daha fazladır. Üretim sırasında kullanılan parametrelerin iyileştirilmesi ile her iki yöntem de foton eleği üretiminde başarılı olmaktadır. Islak kimyasal aşındırma tekniğinde, foton elekleri üretim aşamalarında kilit rolü, kullanılan aşındırıcı ve bu aşındırma işleminin diğer parametreleri, molarite ve aşındırma süresi gibi, almaktadır. Düşürme tekniğinde ise belirleyici olanın, desenlendirme ve tab etme süreçleri olarak görülmüştür.

Tez kapsamında yapılan bir diğer çalışma, üretim süreçlerinin optik performans üzerindeki etkilerin simüle edilmesidir. Yapılan çalışmada elde edilen bilgiler ile geliştirilen bir model olan üretim etkileri fonksiyonu hem üretimin optik performansına olan etkilerini hem de bu davranışın nasıl geri bildirim mekanizması olarak kullanılacağı konusunda yol göstermektedir. Sonuçta üretimlerin yapısal analizleri ile simülasyon kodları birleştirilerek üretim etkileri foton eleklerinin önemli özellikleri olan şiddet ve çözünürlük özelinde tartışılmıştır. Burada üretim etkilerinin performansı artırıcı yönde de etki edebileceği önerilmiş ve önerilen bu modeli içeren simülasyon kodu ile simüle edilmiştir. Sonuçlar foton eleğindeki performans artışı yanında kullanılan modellerin tasarımlara da geri bildirim mekanizması olarak kullanılabileceğini göstermektedir. İşlem adımları optimize edilmiş örneklerde tasarım geri bildirimi bu yolla tek seferde

yapılabilmekte ve tasarım üretim uyumu sağlanabilmektedir. Tüm çalışmalar sonucunda üretilen foton eleklerinin örnek bir görüntüsü Şekil 6.2’de verilmektedir.



Şekil 6.1 Tez çalışmaları kapsamında üretilmiş foton eleği a) sağ bölge optik mikroskop görüntüsü b) sol bölge optik profilometre görüntüsü c) sol bölge optik mikroskop görüntüsü d) sağ bölge optik profilometre görüntüsü (optik mikroskop görüntüleri büyütme faktörü 2.5X, skala 200 μm , optik profilometre görüntüleri büyütme faktörü 2.75X).

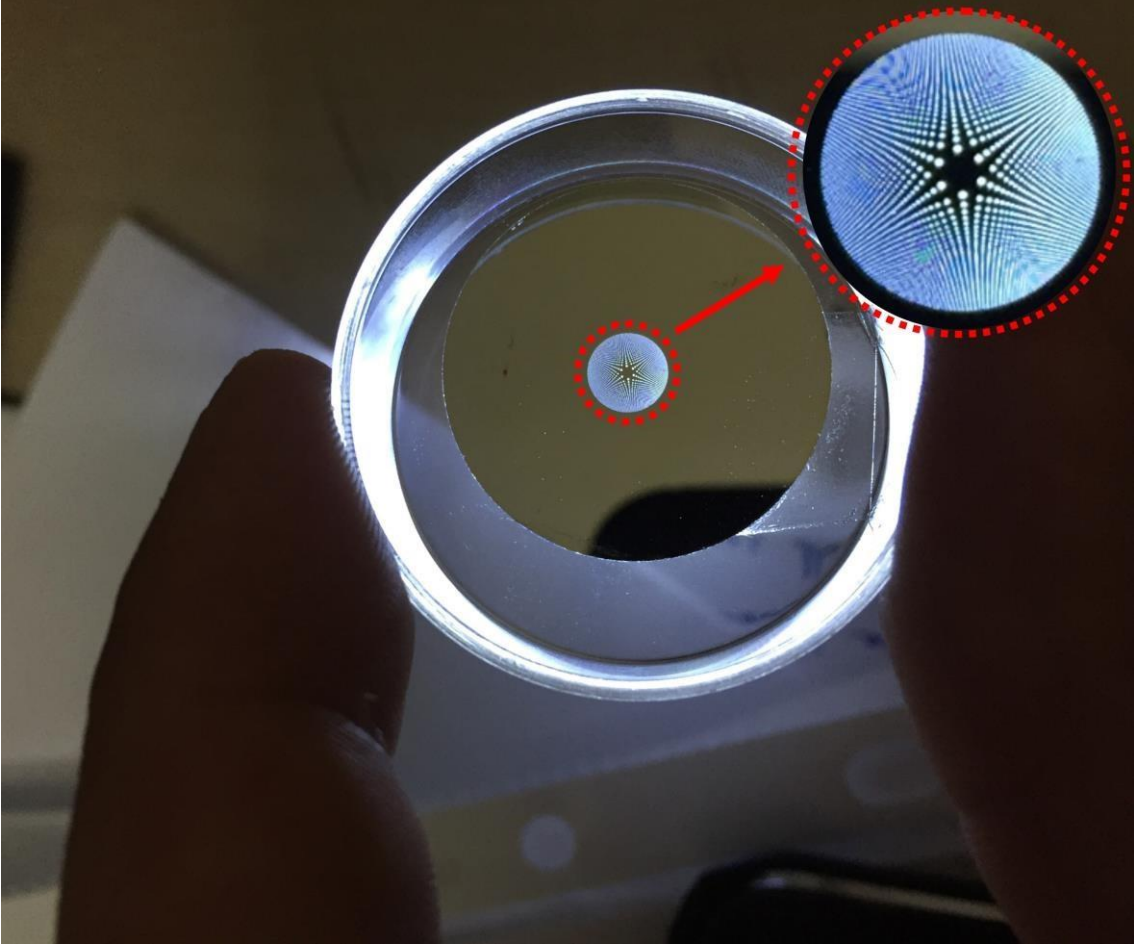


Şekil 6.2 Tez çalışmaları kapsamında üretilmiş foton eleği a) üst bölge optik mikroskop görüntüsü b) üst bölge optik profilometre görüntüsü c) alt bölge optik mikroskop görüntüsü d) alt bölge optik profilometre görüntüsü e) orta bölge optik mikroskop görüntüsü f) orta bölge optik profilometre görüntüsü, (optik mikroskop görüntüleri büyütme faktörü 2.5X, skala 200µm, optik profilometre görüntüleri büyütme faktörü 2.75X).

Tez çalışmaları kapsamında yapılan tasarım, simülasyon ve üretim sonuçları ile foton eleği tasarımı, teorik analiz yöntemi ve üretim konusunda bilgi birikimi oluşturulmuştur.

Yeni modeller tanıtılmış ve üretimdeki hata mekanizmaları ve çözümleri tartışılmıştır.

Foton elekleri süper çözünürlük konusunda gelecek vaat eden ve tasarım-üretim süreçleri ile hala geliştirilmeye devam eden bir konudur. Bu tez kapsamında hem tasarım hem de üretim konusunda çalışmalar yapılmış ve daha sonra üretilecek yeni çalışmalara ön bilgi sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 6.3 Tez çalışmaları kapsamında üretilmiş foton eleği fotoğrafı.

7. GELECEK ÇALIŞMALARI

Gelecek çalışmaları olarak özellikle hedeflenen iki uygulama üzerinde durulmaktadır. Bunlardan birincisi tez kapsamında elde edilen bilgiler ile tasarlanan kırınım optiklerinin optik performansının deneysel olarak ölçülebilmesi için ölçüm düzeneklerinin kurulmasıdır. Kurulacak olan ölçüm düzenekleri ile üretilen foton eleklerinin davranışlarını ve üretim etkileri deneysel olarak da ölçülebilecektir. Deneysel olarak

ölçülen performanslar ile geri bildirim mekanizmaları daha sağlıklı bir şekilde çalıştırılabilecektir.

İkinci hedef ise literatürde faz özellikli foton eleği olarak adlandırılan foton eleklerinin tasarımlarının ve üretimlerinin yapılmasıdır. Bu tip kırınım optiklerinin teorisi iyi bilinse de üretilmiş ve ölçülmüş olan bu tipteki foton eleklerinin literatür bilgisi oldukça kısıtlıdır. Özellikle şiddet artışı sağlamak için kullanılan ve tüm Fresnel bölgelerinden ışık toplayabilen bu tipteki kırınım optikleri tez kapsamında yapılan tasarım çalışmaları ile daha da geliştirilebileceği düşünülmektedir. İlk gelecek hedefi olan optik ölçüm düzeneği ile bu tip optiklerinde performanslarının belirlenmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] W. Chao, E. Anderson, G.P. Denbeaux, B. Harteneck, J.A. Liddle, D.L. Olynick, A.L. Pearson, F. Salmassi, C. Song, D.T. Attwood, 20-Nm-Resolution Soft X-Ray Microscopy Demonstrated By Use of Multilayer Test Structures: Erratum, Optics Letters, 28 (2003) 2530.
- [2] L. Kipp, M. Skibowski, R.L. Johnson, R. Berndt, R. Adelung, S. Harm, R. Seemann, Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves, Nature, 414 (2001) 184–188.
- [3] M. Kato, S. Maeda, F. Yamagishi, Wavelength independent grating lens system, Fujitsu Scientific and Technical Journal, 25 (1989) 297–305.
- [4] R. Ferriere, J.P. Goedgebuer, Achromatic system for far-field diffraction with broadband illumination, Applied Optics, 22 (1983) 1540.
- [5] S.J. Bennett, Achromatic combinations of hologram optical elements, Applied Optics, 15 (1976) 542.
- [6] Christopher M. Tulip, Photon Sieve Bandwidth Broadening By Reduction of Chromatic Aberration Effects Using Second-Stage Diffractive Optics, Doktora Tezi, Air Force Institute of Technology, 2015.
- [7] X. Zhao, J. Hu, Y. Lin, F. Xu, X. Zhu, D. Pu, L. Chen, C. Wang, Ultra-broadband achromatic imaging with diffractive photon sieves, Scientific Reports, 6 (2016).
- [8] X. Zhao, J. Hu, F. Xu, A. Zhu, C. Wang, Wide Field-of-View Imaging with Wavefront Coded Diffractive Photon Sieves, IEEE Photonics Journal, 8 (2016).
- [9] J. Jia, C.Q. Xie, Phase zone photon sieve, Chinese Physics B, 18 (2009) 183–188.
- [10] W. Sun, Y. Hu, D.G. MacDonnell, H.J. Kim, C. Weimer, R.R. Baize, Fully transparent photon sieve, Optics Express, 25 (2017) 17356.

- [11] W. Sun, Y. Hu, D.G. MacDonnell, H.J. Kim, C. Weimer, R.R. Baize, Fully reflective photon sieve, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 206 (2018) 101–104.
- [12] G. Andersen, D. Tullson, Broadband antihole photon sieve telescope, *Applied Optics*, 46 (2007) 3706–3708.
- [13] G. Andersen, Membrane photon sieve telescopes, *Applied Optics*, 49 (2010) 6391– 6394.
- [14] W. Jiang, S. Hu, J. Tan, X. Wen (Eds.), *Design of Nano-Lithographic System Based on Phase Photon Sieve*, Fifth International Symposium on Instrumentation Science and Technology, October 2, 2008, Shenyang, China, 2008, pp. 71333U.
- [15] D. Elfström, B. Guilhabert, J. McKendry, S. Poland, Z. Gong, D. Massoubre, E. Richardson, B.R. Rae, G. Valentine, G. Blanco-Gomez, E. Gu, J.M. Cooper, R.K. Henderson, M.D. Dawson, Mask-less ultraviolet photolithography based on CMOS-driven micro-pixel light emitting diodes, *Optics Express*, 17 (2009) 23522.
- [16] A.O. Yontem, D. Chu, Design Of Micro Photon Sieve Arrays For High Resolution Light-Field Capture In Plenoptic Cameras, 2018 - 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON), June 3, 2018, Helsinki, IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [17] M.N. Julian, D.G. MacDonnell, M.C. Gupta, Fabrication of photon sieves by laser ablation and optical properties, *Optics Express*, 25 (2017) 31528.
- [18] H.H. Chung, Fabrication and Testing of Dual-Wavelength Photon Sieves, *Doktora Tezi*, University of Florida, 2006.
- [19] W. Jiang, S. Hu, C. Xie, X. Zhu, L. Zhao, W. Xie, J. Wang, X. Dong, Fabrication of submicron photon sieve using E-beam lithography and X-ray lithography, *Microelectronic Engineering*, 88 (2011) 3178–3181.
- [20] R. Menon, D. Gil, G. Barbastathis, H.I. Smith, Photon-sieve lithography, *Journal of the Optical Society of America A*, 22 (2005) 342.
- [21] G. Sterbini, *Introduction to Optics Design*, 1st ed., Prentice-Hall, 30–36, 2019.
- [22] E.W. Weisstein, Fresnel Number, <http://scienceworld.wolfram.com/physics/FresnelNumber.html> (Accessed tarihi: July 17, 2019).
- [23] H.A. Radi, J.O. Rasmussen, *Interference, Diffraction and Polarization of Light*, <https://slideplayer.com/slide/5787788/> (Accessed tarihi: August 20, 2019).
- [24] J.R. Meyer-Arendt, J.W. Blaker, *Introduction to Classical and Modern Optics*, *American Journal of Physics*, 41 (1973) 148–149.
- [25] MathPages. Huygens' principle, <https://www.mathpages.com/home/kmath242/kmath242.htm> (Accessed tarihi: July 17, 2019).
- [26] E. Hecht, *Optics*, Addison Wesley, 443–446, 2002.

- [27] R.A. Kyle, M.A. Shampo, Gustav Robert Kirchhoff., <http://www-groups.dcs.stand.ac.uk/history/Biographies/Kirchhoff.html> (Accessed tarihi: September 17, 2019).
- [28] R. Heintzmann, U. Kubitscheck, Introduction to Optics, 3rd ed., Pearson, 1–22, **2017**.
- [29] HyperPhysics, Fraunhofer Single Slit, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/imgpho/sinslit.gif> (Accessed tarihi: February 11, 2016).
- [30] R. Nave, Single and Double Slit Comparison, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/sindoub.html> (Accessed tarihi: August 9, 2019).
- [31] I. Gris-Sánchez, D. Van Ras, T.A. Birks, The Airy fiber: an optical fiber that guides light diffracted by a circular aperture, Optica, 3 (**2016**) 270.
- [32] C.R. Nave, Comparison: Fraunhofer & Fresnel Slit, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/fresli.html#c2> (Accessed tarihi: July 17, 2019).
- [33] F.A. Jenkins, H.E. White, The Fundamentals of Optics, 3rd ed., McGraw-Hill, 160–180, **1981**.
- [34] Editorial: Beyond the diffraction limit, Nature Photonics, 3 (**2009**) 361.
- [35] S.M. Tang, L.R. Chow, Using rank hashing function to develop a data allocating scheme for a two-disk system, The Journal of Systems and Software, 22 (**1993**) 107–115.
- [36] D.C. Lindberg, Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus, et Iride . Francesco Maria Grimaldi , 119–119, **1969**.
- [37] C. Huygens, Traité de la lumière: où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la reflexion, & dans la refraction, et particulièrement dans l’etrange refraction du cistal d’Islande (Google eBook), Chez Pierre Vander Aa, (**1690**) 180.
- [38] E. Sezgin, Super-resolution optical microscopy for studying membrane structure and dynamics, Journal of Physics: Condensed Matter, 29 (**2017**) 273001.
- [39] E. Di Fabrizio, F. Romanato, M. Gentill, S. Cabrini, B. Kaulich, J. Susini, R. Barrett, High-efficiency multilevel zone plates for keV X-rays, Nature, 401 (**1999**) 895–898.
- [40] Q. Cao, J. Jahns, Nonparaxial model for the focusing of high-numerical-aperture photon sieves, Journal of the Optical Society of America A, 20 (**2003**) 1005.
- [41] J. Kirz, Phase Zone Plates for X Rays and the Extreme Uv., J Opt Soc Am, 64 (**1974**) 301–309.
- [42] P. Horan, Applied optics, module 7: diffractive optical elements lenses., [http://physics.dit.ie/resources/physicstech4/%0Aoptics/module 7 B&W.ppt](http://physics.dit.ie/resources/physicstech4/%0Aoptics/module%207%20B&W.ppt) (Accessed tarihi: July 18, 2019).
- [43] Q. Cao, J. Jahns, Focusing analysis of the pinhole photon sieve: individual far-field model, Journal of the Optical Society of America A, 19 (**2002**) 2387.

- [44] Q. Cao, J. Jahns, Modified Fresnel zone plates that produce sharp Gaussian focal spots, *Journal of the Optical Society of America A*, 20 (**2003**) 1576.
- [45] Q. Cao, J. Jahns, Comprehensive focusing analysis of various Fresnel zone plates, *Journal of the Optical Society of America A*, 21 (**2004**) 561.
- [46] Q. Cao, J. Jahns, Y. Sheng, S. Zhuang, Y. Zhang (Eds.), *Photon Sieves and Modified Fresnel Zone Plates*, ICO20: Optical Information Processing, August 21, 2005, Changchun, China, SPIE, 2005, pp. 602702.
- [47] Z. Lin, H. Wang, C. Song, W. Ji, B. Qi, L. Yang, S. Wen, Y. Chen, E.-B. Kley (Eds.), *Simulation of Paraxial Pinhole Photon Sieves Model Based on Fresnel Zone Plates*, 2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies, February 13, 2006, Xi'an, China, SPIE, 2006, pp. 61493A.
- [48] G. Andersen, Large optical photon sieve, *Optics Letters*, 30 (**2005**) 2976.
- [49] D.J. Schroeder, *Astronomical Optics*, 2nd ed., Academic Press, 436–439, **1939**.
- [50] D. Gil, R. Menon, H.I. Smith, The promise of diffractive optics in maskless lithography, *Microelectronic Engineering*, 73–74 (**2004**) 35–41.
- [51] C.D. Pfeifer, L.D. Ferris, W.M. Yen, Optical image formation with a Fresnel zone plate using vacuum-ultraviolet radiation, *Journal of the Optical Society of America*, 63 (**1973**) 91–93.
- [52] B. Niemann, D. Rudolph, G. Schmahl, Soft X-ray imaging zone plates with large zone numbers for microscopic and spectroscopic applications, *Optics Communications*, 12 (**1974**) 160–163.
- [53] C.R. Nave, Circular Aperture Diffraction, <http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/phyopt/cirapp2.html> (Accessed tarihi: July 19, 2019).
- [54] A. Sandford, T. Sarker, T. Bernier, Effects of geometric distortions, Gaussian blur, and contrast negation on recognition of familiar faces, *Visual Cognition*, 26 (**2018**) 207–222.
- [55] D.T. Graham, P. Cloke, M. Vosper, *Principles of Radiological Physics*, 5th ed., Elsevier, **2007**.
- [56] H.I. Smith, A proposal for maskless, zone-plate-array nanolithography, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 14 (**1996**) 4318–4322.
- [57] C. Zhou, X. Dong, L. Shi, C. Wang, C. Du, Experimental study of a multiwavelength photon sieve designed by random-area-divided approach, *Applied Optics*, 48 (**2009**) 1619–1623.
- [58] Z. Chen, C. Wang, D. Pu, J. Hu, L. Chen, Ultra-large multi-region photon sieves, *Optics Express*, 18 (**2010**) 16279.
- [59] R. Liu, F. Li, M.J. Padgett, D.B. Phillips, Generalized photon sieves: fine control of complex fields with simple pinhole arrays, *Optica*, 2 (**2015**) 1028.

- [60] Y. Li, C. Wang, X. Zhao, F. Xu, C. Wang, Multispectral and large bandwidth achromatic imaging with a single diffractive photon sieve, *Optics Express*, 26 (2018) 21141.
- [61] W. Jiang, S. Hu, L. Zhao, W. Yan, Y. Yang, Phase photon sieve, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 7 (2010) 228–231.
- [62] J.I. García-Sucerquia, R. Castañeda, F.F. Medina, G. Matteucci, Distinguishing between Fraunhofer and Fresnel diffraction by the Young's experiment, *Optics Communications*, 200 (2001) 15–22.
- [63] T. Liu, L. Wang, J. Zhang, Q. Fu, X. Zhang, Numerical simulation and design of an apodized diffractive optical element composed of open-ring zones and pinholes, *Applied Optics*, 57 (2018) 25.
- [64] C. Xie, X. Zhu, H. Li, L. Shi, Y. Wang, Feasibility study of hard-x-ray nanofocusing above 20 keV using compound photon sieves, *Optics Letters*, 35 (2010) 4048.
- [65] G. Andersen, O. Asmolova, M.G. McHarg, T. Quiller, C. Maldonado, H.A. MacEwen, G.G. Fazio, M. Lystrup, N. Batalha, N. Siegler, E.C. Tong (Eds.), *FalconSAT-7: A Membrane Space Solar Telescope*, *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, July 29, 2016, Edinburgh, United Kingdom, SPIE, 2016, pp. 99041P.
- [66] N.M. Bradman, *Design and Fabrication of Diffractive Lenses for Visible and Near Infrared Wavelengths*, Doktora Tezi, University of Florida, 2007.
- [67] G. Cheng, T. Xing, W. Lin, J. Zhou, C. Qiu, Z. Liao, Y. Yang, L. Hong, J. Ma, M.J. Lercel (Ed.), *Photon Sieve Array X-Ray Maskless Nanolithography*, *Emerging Lithographic Technologies XI*, March 16, 2007, SPIE, 2007, pp. 651736.
- [68] D.L. Andrews, R.H. Lipson, T. Nann, *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology*, 2nd ed., Elsevier, 1886, 2019.
- [69] P. Doctoral, E.N. Photonique, *Limitations of Proximity Lithography Printing : Simulations , Experiments , and Applications*, Doktora Tezi, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2017.
- [70] K. Rüzgar, A. Bacioğlu, Process optimization of parameterized single shot method for a rapid production of photon sieve with direct write lithography, *Microelectronic Engineering*, 209 (2019) 41–48.
- [71] C. Mack, *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*, 1–515, 2007.
- [72] C.A. Mack, *Field Guide to Optical Lithography*, SPIE Press, 2009.
- [73] HMDS, https://www.microchemicals.com/products/adhesion_promotion/hmds.html (Accessed tarihi: July 23, 2019).
- [74] C.A. Mack, *Lithography*, <http://www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html> (Accessed tarihi: July 21, 2019).

- [75] L. Shamsuddin, S.S. MdIzah, K. Mohamed, Comparative study of PMMA 120K and 996K for Electron Beam Lithography Application, *Aust. J. Basic & Appl. Sci.*, **(2015)**.
- [76] Microchem, Hardbake of Photoresist Structures, Application Notes, **(2013)** 1–2.
- [77] MicroChemicals GmbH, AZ nLOF™ 2000 Series, **(2016)**.
- [78] EUV Lithography, Second Edition, **2018**.
- [79] R. Leuschner, G. Pawlowski, Photolithography, Materials Science and Technology, 2013, 2013.
- [80] R. Zaouk, B.Y. Park, M.J. Madou, Introduction to microfabrication techniques., *Methods in Molecular Biology* (Clifton, N.J.), 321 **(2006)** 5–15.
- [81] Az1500 Tds,
https://www.microchemicals.com/micro/az_1500_series.pdf (Accessed tarihi: July 22, **2019**).
- [82] K.K. Schuegraf, K. Seshan, Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques: Principles, Methods, Equipment and Applications, 646, **2002**.
- [83] R.H. Hammond, Electron Beam Evaporation Synthesis,
<https://www.tungsten.com/wp-content/uploads/2014/03/tipsbeam.pdf> (Accessed tarihi: July 23, **2019**).
- [84] A. Zöller, R. Götzelmann, K. Matl, D. Cushing, Temperature-stable bandpass filters deposited with plasma ion-assisted deposition, *Applied Optics*, 35 **(1996)** 5609.
- [85] R. Process, P. Summary, AZ nLOF 2000 Series i-Line Photoresists, Film, **(2000)** 3–6.
- [86] Microchemicals Team, Lithography: Theory and Application of Photoresists, Developers, Solvents and Etchants, Microchemicals GmbH, 98, **2009**.
- [87] MicroChemicals, TI PRIME technical data sheet,
https://microchemicals.com/micro/tds_ti_prime.pdf (Accessed tarihi: July 23, **2019**).
- [88] K.F. Chan, Z. Feng, R. Yang, A. Ishikawa, W. Mei, High-resolution maskless lithography, *Journal of Microlithography, Microfabrication and Microsystems*, 2 **(2003)** 331–339.
- [89] C.S. Whelan, D.M. Tanenbaum, D.C. La Tulipe, M. Isaacson, H.G. Craighead, Low energy electron beam top surface image processing using chemically amplified AXT resist, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 15 **(1997)** 2555–2560.
- [90] P. Ware, Removing the mask, *OE Mag.*, 2 **(2002)** 26–27.
- [91] A. Majumdar, P.I. Oden, J.P. Carrejo, L.A. Nagahara, J.J. Graham, J. Alexander, Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope, *Applied Physics Letters*, 61 **(1992)** 2293–2295.

- [92] N. Choksi, D.S. Pickard, M. McCord, R.F.W. Pease, Y. Shroff, Y. Chen, W. Oldham, D. Markle, Maskless extreme ultraviolet lithography, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 17 (**1999**) 3047–3051.
- [93] D. Li, ed., *Gray-Scale Lithography*, *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, 2008, Boston, MA, Springer US, **2008**, pp. 789–790.
- [94] Microchemicals, Photoresist removal system, https://www.microchemicals.com/technical_information/photoresist_removal.pdf (Accessed tarihi: July 27, **2019**).
- [95] J. Bergström, *Mechanics of Solid Polymers: Theory and Computational Modeling*, Elsevier Inc., 1–509, **2015**.
- [96] Zygo, Optical Profiler Basics, <https://www.zygo.com/?/met/profilers/opticalprofilersabout.htm> (Accessed tarihi: July 27, **2019**).
- [97] O. Asmolova, G. Andersen, M.G. McHarg, T. Quiller, C. Maldonado, T. Dickinson, H.A. MacEwen, J.B. Breckinridge (Eds.), *Design and Test of a Novel Solar Imaging Payload for Small Satellites, UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VII*, September 22, 2015, San Diego, California, United States, 2015, pp. 96020F.

EKLER:

EK 1-Çizelgeler:

Delik yapıları her örnek için boyutları baz alınarak toplamda üç bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler, büyük delikler, orta delikler ve küçük delikler bölgeleridir. Büyük delikler bölgesi 1-4 Fresnel bölgelerindeki delikleri, orta delikler 5-15 Fresnel bölgesi deliklerini ve küçük delikler 14-35 Fresnel bölgesi deliklerini göstermektedir. Düşürme ve ıslak kimyasal aşındırma örneklerine ait tüm bölgelerin desenlendirilmesinde şiddet düşürücü filtre olarak %2.16 (375nm) Thorlabs NE10A-A filtre kullanılmıştır. Desenlendirme işleminde ayrıca 0.5µm'lik optik yol ve 40X NA0.75 UPlanFLN UIS-2 Olympus objektif kullanılmıştır.

Çizelge 0.1 Düşürme örnekleri desenlendirme parametreleri.

	Büyük Delikler		Orta Delikler		Küçük Delikler	
	V(mm/s)	I (bağıl)	V(mm/s)	I (bağıl)	V(mm/s)	I (bağıl)
LOF1	0.025	0.2	0.02	0.075	0.01	0.025
LOF2	0.025	0.15	0.02	0.05	0.01	0.015
LOF3	0.025	0.1	0.015	0.025	0.01	0.02
LOF4	0.025	0.1	0.01	0.015	0.005	0.005
LOF5	0.025	0.1	0.01	0.01	0.0025	0.005
LOF6	0.025	0.1	0.015	0.005	0.001	0.001
LOF7	0.025	0.1	0.01	0.015	0.005	0.005
LOF8	0.025	0.1	0.015	0.025	0.0075	0.0075
LOF9	0.025	0.1	0.015	0.025	0.0075	0.0075
LOF10	0.025	0.1	0.015	0.025	0.0075	0.0075
LOF11	0.025	0.1	0.015	0.025	0.0075	0.005
LOF12	0.25	0.1	0.015	0.025	0.0075	0.005
LOF13	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015

LOF14	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
LOF15	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.002
LOF16	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
LOF17	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
LOF18	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.002
LOF19	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
LOF20	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
LOF21	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
LOF22	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
LOF23	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
LOF24	0.025	0.1	0.015	0.008	0.0085	0.001
LOF25	0.025	0.1	0.015	0.008	0.0085	0.001
LOF26	0.025	0.1	0.015	0.008	0.0085	0.001

Çizelge 0.2 Islak kimyasal aşındırma örnekleri desenlendirme parametreleri.

	Büyük Delikler		Orta Delikler		Küçük Delikler	
	V(mm/s)	I (bağıl)	V(mm/s)	I (bağıl)	V(mm/s)	I (bağıl)
ETC1	0.025	0.2	0.015	0.05	0.0085	0.005
ETC2	0.025	0.1	0.015	0.025	0.0085	0.0025
ETC3	0.025	0.1	0.015	0.02	0.0085	0.0015
ETC4	0.025	0.1	0.015	0.015	0.0085	0.0015
ETC5	0.025	0.1	0.015	0.015	0.0085	0.001
ETC6	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
ETC7	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
ETC8	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
ETC9	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
ETC10	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
ETC11	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
ETC12	0.025	0.1	0.015	0.01	0.0085	0.0015
ETC13	0.025	0.1	0.015	0.005	0.0085	0.001
ETC14	0.025	0.1	0.015	0.005	0.0085	0.001
ETC15	0.025	0.1	0.015	0.005	0.0085	0.001
ETC16	0.025	0.1	0.015	0.005	0.0085	0.001
ETC17	0.025	0.1	0.015	0.005	0.0085	0.001
ETC18	0.025	0.1	0.015	0.005	0.0085	0.001
ETC19	0.025	0.1	0.01	0.001	0.0085	0.0005
ETC20	0.025	0.05	0.01	0.001	0.0085	0.00025
ETC21	0.025	0.05	0.01	0.001	0.0085	0.00025
ETC22	0.025	0.05	0.01	0.001	0.0085	0.00025

ETC23	0.025	0.05	0.01	0.001	0.0085	0.0001
ETC24	0.025	0.05	0.01	0.001	0.0085	0.0001

EK 2 - Program Detayları-Simülasyon Kodu

Tasarım ve geometri oluşturma çalışmaları genelinde kullanılan matlab kodu:

```
clc
clear
all
close
all
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tic;
% lambda=632.8e-9; %programda kullan?lan dalgaboyu (m)
f=.05;%input('Odak Uzunluğunu giriniz (m): '); %odak mesafesi
D=.00300000000;%input('optik eleman apýný giriniz (m): '); %optik elaman
ap? fid=fopen('allrings.txt','w'); % sieve geometrisinin kaydedildi?i
dosya pp2=0;
%strcentral=['centralpoints and radius',' ','ring#=',strrin,'
%','ddd=',strddd,' ','l1l=',strl1l,'.txt'];
Atop=0;
Atop2=0;
kid=fopen('allrings2.txt','w'); %PINHOLLERIN MERKEZ NOKTALARINI VE
YARIÇAPLARININ KAYDEDILDI?I DOSYA fprintf(kid,'bu dosyada pinhollerin
merkezleri (x,y) ve yaraplar? verilmektedir\n');
fprintf(kid,'xn yn an arp\n');
fprintf(fid,'lambda= %s\t focal length= %s\t optic"s diameter= %s\t
\n',num2str(lambda),num2str(f),num2str(D));
fprintf(fid,'pinhole positions (x,y):\t\n'); %PINHOLE POZ?SYONLARININ
DOSYAYA YAZDIRILMASI ors=0.00000025; %RNEKLEM ARALI?I ora=0.0000125;
%RNEKLEM SINIRLARI
for rnd=1:1:35; %budğü pinhollerin a?sal da??l?m?na ve d/w
oranlar?n?n bilgilerini içerir if rnd==1; ddd=58; l1l=3; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); %aaa d/w
oran?d?r carp=1; elseif rnd==2; ddd=36; l1l=6; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058));
carp=1; elseif rnd==3; ddd=24;
l1l=6; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==4; ddd=28; l1l=5; ringnum=rnd;
```

```

aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==5; ddd=23; lll=5; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==6; ddd=24.5; lll=1; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==7; ddd=24; lll=4; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==8; ddd=23.5; lll=1; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==9; ddd=21.7; lll=6;
ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==10; ddd=23.2; lll=2; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==11; ddd=23.2; lll=4; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==12; ddd=23; lll=2; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==13; ddd=22.9; lll=1; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==14; ddd=22; lll=5; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==15; ddd=22.8; lll=2; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==16;
ddd=22; lll=8; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==17; ddd=22.8; lll=3; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==18; ddd=22.6; lll=3; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==19; ddd=24.6; lll=4; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==20; ddd=21.2; lll=8; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==21; ddd=21.2; lll=7; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==22; ddd=20.6; lll=4; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==23; ddd=21.3; lll=8; ringnum=rnd;

```

```

aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==24; ddd=20.2; lll=6; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==25; ddd=21.1; lll=2; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==26; ddd=20.4; lll=3; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==27; ddd=20.4; lll=2; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==28; ddd=20.4; lll=3; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==29; ddd=20.1; lll=6;
ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==30; ddd=20.1; lll=1; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==31; ddd=20.2; lll=6; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==32; ddd=20.2; lll=4; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==33; ddd=20.7; lll=5; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==34; ddd=21.1; lll=7; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; elseif
rnd==35; ddd=20.2; lll=3; ringnum=rnd;
aaa=1.03126+(rnd*0.027868)+(rnd*rnd*(-0.000399058)); carp=1; end
fprintf('ddd=%1.1f\t lll=%1.1f\t ring=%1.1f\n',ddd,lll,ringnum);
strrin=num2str(ringnum);

% GEOMETRI KESİMİ %
strddd=num2str(ddd);
strlll=num2str(lll);

strcentral2=['centralpoints    and    radius',' ','ring#=',strrin,
','ddd=',strddd,' ','lll=',strlll,' ','noktalar','.txt'];

strcentral=['centralpoints    and    radius',' ','ring#=',strrin,
','ddd=',strddd,' ','lll=',strlll,'.txt'];

bbb=30; %input('pinhole da??t?m aç?s?n? belirleyiniz (derece): ');

N=4*((D/2).^2)/(8*f*lambda); % maksimum çapa göre s?n?rland?rma
denklemini

```

```

kkkk=0:.2:10; % d deliklerin ap? c=d/w
Un=kkkk.*besselj(1,((pi/2).*kkkk)); %ekrandaki alanýn genliđini verir
pp=0;%initial pinhole number (total)

cid=fopen('zone_geometry.txt','w'); % zone geometrisini kaydedildiği
dosya
fprintf(cid,'zone center radius    zone width\n');
n=ringnum;
fprintf('%1.1f of %1.1f zone is complete\n',n,N)
Rn=sqrt((2*n*lambda*f)+(n.^2*lambda.^2)); %zone merkezi optik eksen
uzaklığı
w=(lambda*f/(2*Rn)); %zone kalınlığı
fprintf(cid,'%1.9f %1.8f \n',Rn,w);
if w<0.000001 %son zone kalınlığın işlenebilir seviyeden daha aşağıya
düşmesini engellemek için yazılan sınır koşulu fprintf('no more holes
can be machined\n'); fprintf(fid,'no more holes can be machined\n');
break else c=aaa;
fprintf('hole diameter: %1.5e
\n',c*w); cevre=2*pi*Rn;
bosluk=w*ddd/20;
aralik=(cevre)/(w+bosluk);
yuvarla=round(aralik);
fark=num2str(bosluk);
Nf=pi*((w/2)^2)/(lambda*f); % fresnel number
fprintf('Nf=%1.5f\n',Nf);
b2=111*.0025*360/w;
for ww=-w:w/2.5:w;
a=0:5:360;
xf1=(Rn+(ww/2)).*cosd(a);
yf1=(Rn+(ww/2)).*sind(a);
figure(1)
subplot('position',[.04 .06 .41 .91])
pbaspect([1 1 1])
plot(xf1,yf1,'b','linewidth',1.4)
; hold on end
p=0; %initial pinhole number
ran=rand;
for b=360/yuvarla+b2:360/yuvarla:360+b2;
x0=Rn*cosd(b); % x0 noktasý her bir deliđin x eksenindeki merkezini
verir

```

```

y0=Rn*sind(b); % y0 noktasý her bir deliðin y eksenindeki merkezini
verir

fprintf(kid,'%1.12f %1.12f %1.12f %1.3f\n',x0,y0,c*(w/2),carp);
%burada an olarak çýkacak sonuç w'nin yarýsýdýr

%bu kýsýmda merkezleri belirlenen deliklerin merkezinden w kadarlýk
bir %çapla iinin doldurulmasý saðlanýr.

p=p+1; m=w/2; g=0:5:360;
dw=num2str(c); %d/w yi stringe
cevirir.

str9=['d/w=',dw];

str11=[' c=',dw];

x=c*m*cosd(g)+x0; %foton e?e?indeki ?????n geebilece?i herbir
noktan?n X eksenindeki konumunu verir

y=c*m*sind(g)+y0; %oton e?e?indeki ?????n geebilece?i herbir noktan?n
Y eksenindeki konumunu verir

fprintf(fid,'%1.7f %1.7f \n',x,y); %x ve y noktalar? geometri
noktalar?n? verir Apin=pi*(c*(w/2)).^2; Atop=Atop+Apin; end

pp=pp+p; %# of total
pinhole end pp2=pp2+pp;

%Atop2=Atop2+Atop;
end

Atop2=Atop2+Atop;

ttt=mod (pp2,2);

%if ttt==1;

% break

%else

fclose(cid);

roptic=max(sqrt(x.^2+y.^2));

teta=0:1:360;

lensx=D/2*cosd(teta);

lensy=D/2*sind(teta);

Alan1=pi*roptic*roptic;

Alan2=pi*(D/2).^2;

str17=num2str(Alan2);

str18=['Aýklýk

alaný=',str17]; mm=1; for u=-

0:ors:ora; uu(mm)=u ;

r=(2*pi/lambda)*(D/2)*u/f

; k=(besselj(1,r))/r;

I=(2*k).^2; rr(mm)=r;

II(mm)=I; mm=mm+1;

```

```

fprintf('%1.7f\t
%1.7f\n',u,I); end
data(:,1)=uu; data(:,2)=II; x=
data(:,1); y= data(:,2); maxy =
max(y);
miny = min(y) ; % Imin i verir
fff = y==miny ;
cp = x(fff) ; % Imin in denk geldi?i xmin i
verir
fprintf('Pinhollerin toplam alaný:%1.5e \n',Atop2);
str19=['Pinhollerin Toplam Alaný=',num2str(Atop2)];
%annotation('textbox',[.37 .73 .2 .2],'String','Fresnel
%zones','fitboxtotext','on','Color','b','fontsize',11,'fontweight','bo
ld');
%annotation('textbox',[.37 .68 .2
%.2],'String','pinholes','fitboxtotext','on','Color','r','fontsize',11
,'fontweight','bold');
%annotation('textbox',[.37 .630 .2 .2],'String','full
%aperture','fitboxtotext','on','Color','k','fontsize',11,'fontweight',
'bold');
fprintf('# of total pinhole: %d\n',pp2);
fprintf('minimum hole diameter is %1.10e\n',c*w);
fprintf(fid,'minimum hole diameter is %1.10e\n',c*w);
fprintf(fid,'# of total pinhole: %d\n',pp2);
fprintf(kid,'# of total pinhole:\n'); fprintf(kid,'%d
%d %d\n',pp2,0,0); fprintf(kid,'focal point at z:\n');
fprintf(kid,'%d %d %d\n',f,0,0); fclose(fid); %dosya
kapa fclose(kid); %dosya kapa cw=num2str(c*w); %çapý
stringe çevirir str12=['Minimum hole Diameter
(m)=' ,cw]; pause(0.00000001)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% gidd=
fopen('allrings2.txt');
ca= textscan(gidd, '%s%s%s%s'); % dosyadan de?erleri okur
aa= ca{1}; % vektöre atar a=1;
%pbaspect([1 1 1]) title('Sieve
Geometry')

%axes('Position', [0.05 0.25 0.05 0.50])
plot(lensx,lensy,'-k','linewidth',2.4); %
legend('First','Second','Third') xlabel('x

```



```

coordinate (m)') ylabel('y coordinate (m)')
for i= 1:(length(ca{1})-4) if
isempty(str2num(ca{1}{i}))==0; storea(a)=
str2num(ca{1}{i}); %xn storeb(a)=
str2num(ca{2}{i}); %yn storec(a)=
str2num(ca{3}{i}); %an
stored(a)=str2num(ca{4}{i}); %carp
xn=storea(a); % xn pinhole center on x axis
yn=storeb(a) ;% yn pinhole center on y axis
an=storec(a); % n'th pinhole yar?çap?
t=0; for tet=0:5:360;
x=xn+an*cosd(tet);
y=yn+an*sind(tet);
plot(x,y,'r-
','LineWidth',1.5)
%legend('First','Seco
nd','Third') end
a=a+1; else end end
fclose(gidd); hold
off pause(.00000001)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% HESAPLAMA KES?M? %

qq=num2str(f); % oda??stringe ceviri
Fullw2=0;
fwhm2=num2str(Fullw2);
strfwhm2=['Photon Sieve FWHM=
',fwhm2]; aci=num2str(bbb); %AÇI
STRiNG str=[' f (m)=' ,qq]; % FOCUS
STRiNG ccc=num2str(pp2); %total
pinhole number str2=[' #
Pinhole=' ,ccc]; % pinhole say?s?
string str8=[' Açý (d)= ',aci];
diam=num2str(2*roptic);
strl4=[' Optical diameter
(m)= ',diam];
str43=num2str(rand);
str50=['
ddd=' ,num2str(ddd) ];
str47=[' açýklýk=' ,fark];

```

```

str44=['final
rand=',str43];
str3={str,str2,str9,str12,str14,strfwhm2,str18,str19,s
tr44,str47}; str5='focal '; str4=[str5,str,str2];
str7=' alldata.txt'; str6=[str,str2,str11,str7];
str51=[' lll=',num2str(lll)]; str52=[' ring
#=',num2str(n)];
str13=[str,str2,str11,str14,str52];
str61=[str13,'.txt'];
didd=fopen(str61,'w'); %Odak düzlemi ?iddet da??l?m dosyas?
fprintf(didd,'Odak düzlemindeki piddet dađýlýmý:\n');
fprintf(didd,'      X\t      Y\t      UXY\t      It\t
It^2\n'); jj=1;
for m=0:2:1; % ekranda Y de taramay? sa?lar
for l=-0:ors:ora; % ekranda X'de taramay?
sa?lar fidd= fopen('allrings2.txt');
ca= textscan(fidd, '%s%s%s%s'); % dosyadan de?erleri
okur aa= ca{1}; % vektöre atar a=1;
In=0; % ilk ?iddet
X=0;
Y=0;
UXY=0; %ilk alan (field)
q=f;
qq=num2str(f); % oda?? stringe çevirir
Ik=0;
UR=0;
fn=0;
for i= 1:(length(ca{1})-4) if
isempty(str2num(ca{1}{i}))==0 storea(a)=
str2num(ca{1}{i}); %xn storeb(a)=
str2num(ca{2}{i}); %yn storec(a)=
str2num(ca{3}{i}); %an
stored(a)=str2num(ca{4}{i}); %carp
xn=storea(a); % xn pinhole center on x
axis yn=storeb(a); % yn pinhole center
on y axis an=storec(a); % n'th pinhole
yar?çap?
carp=stored(a);
k=2*pi/lambda; j=sqrt(-
1);

```



```

XX(jj)= X;
YY(jj)=Y;
Itt(jj)= It;
Ittall(jj)=Itall;
Itt2(jj)=It2; UXYt(jj)=UXY;
ampt(jj)=amp; jj= jj+1; fclose(fid);
end end
fprintf(didd,'Aperture alan dađýlýmý\n'); fprintf(didd,'      X\t
I\n'); for u=-ora:ors:ora; uu(mm)=u ; r=(2*pi/lambda)*(D/2)*u/f;
k=(besselj(1,r))/r; I=(2*k).^2; rr(mm)=r; II(mm)=I; mm=mm+1;
fprintf(didd,'%1.7f\t %1.7f\n',u,I); end kata(:,1)=XX;
kata(:,2)=Itt; kata(:,3)=Itt2; kata(:,4)=UXYt;
kata(:,5)=Ittall; kata(:,6)=ampt; hh=kata(:,6); maxhh=max(hh);
zz=kata(:,5); oo= kata(:,1); gg= kata(:,2); yy=kata(:,3);
vv=kata(:,4); maxvv=max(vv); maxzz=max(zz);
maxyo = max(gg); % photon sieve max ?iddet maxyy=max(yy);
Itt2n=Itt2/maxyy; str62=['Max. Intensity=',num2str(maxyo)];
minyo=min(gg); % photon sieve min ?iddet fff = find(gg==minyo);
sss=find(gg==maxyo);
cpb=oo(sss);
cpa = oo(fff); % photon sieve min ?iddet x
konumu minyo; maxyo; eee=minyo/maxyo; %figure(2)
axes('Position', [0.45 0.45 0.55 0.50])
plot(XX,Itt*(1/maxyo),'-r',uu,II,'-k','LineWidth',2); %1/maxyo terimi
normalize ?iddet için eklenmiptir hold on
plot(XX,Itt2/maxyy,'-b','LineWidth',2); %plot(XX,UXYt/maxvv,'-
c','LineWidth',2);
legend('35 ring sieve field','3mm Aperture','35 ring sieve intensity')

%plot(XX,ima,'*g','LineWidth',2);
plot(XX,ampt/maxhh,'y','LineWidth',2); pbaspect([2 1 1])
title('intensity distribution') grid on; hold on
xlabel('x-y coordinate (m)')
ylabel('Normalized intensity (a.u)')
str63=['first secondary x=',num2str(cpa)];
str311={str,str2,str9,str12,str14,strfwhm2,str62,str18,str19,str47,str
63};

rh=annotation('textbox',[.5 .13 .2], 'String',str311,'fitboxtotext','on','Color','b','fontsize',11,'fon
tweight','bold');
%rl=annotation('textbox',[.825 .70 .2

```

```

%.2], 'String', strfwhm2, 'fitboxtotext', 'on', 'Color', 'r', 'fontsize', 8, 'fontweight', 'bold');

rc=annotation('textbox',[.9 .79 .0 .9], 'String', 'Circular Aperture PSF', 'fitboxtotext', 'on', 'Color', 'b', 'fontsize', 11, 'fontweight', 'bold');

%rl=annotation('textbox',[.825 .66 .2 .2], 'String', 'FZP %PSF', 'fitboxtotext', 'on', 'Color', 'b', 'fontsize', 8, 'fontweight', 'bold');

str133=[str62, str13];
h=figure(1);
fnm=[str133, '.fig'];
fnm2=[str133, '.jpg'];
saveas(h, fnm); saveas(h, fnm2);

tidd=fopen(str6, 'w'); % yeni dosyada tüm özellikler olacak fidt=fopen('sieve_geometry.txt'); ti=fread(fidt); fwrite(tidd, ti);
kidd=fopen('centralpoints and radius.txt');
li=fread(kidd); fwrite(tidd, li); didt=fopen(str61);
mi=fread(didt); fwrite(tidd, mi); hold off fclose(didt);
fclose(kidd); fclose(didt); fclose(tidd); pause(1) toc;
end

```

EK 3 - Tezden Türetilmiş Yayınlar

Process optimization of parameterized single shot method for a rapid production of photon sieve with direct write lithography

Abstract:

Photon sieves are promising elements for high-resolution optics. Fabrication of photon sieves is a raising topic of microscale optic fabrication. In order to fabricate photon sieves, many technics featured recently. Common production difficulties for fabrication are time consumption and complexity of process. This study provides direct write lithography process optimization for rapid and simple fabrication method. Using the direct write laser technology to pattern photoresist with parameterized single laser shot is the main idea of this study. Writing pattern with the parameterized single shot method gives good

structures for photon sieves. Parameterized single shot method uses variable focus distance and modulation to write patterns with direct write lithography. Rapid patterning with better geometrical structures is the most important result of this study. In microscopic scale, geometrical results and time consumption are some drawbacks of continuous exposure laser method. It is inadequate for small structures such as photon sieves outermost pinholes. The main approach of this study is the optimization of the writing process for rapid and well-shaped production of smaller structures for photon sieves. The process optimization for Kloe direct write lithography system serves better structure for photon sieve pinhole than conventional writing methods.

Dergi: Microelectronic Engineering

Sayı: 209

Tarih: 15.3.2019

Doi: 10.1016/j.mee.2019.03.014

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞINA

Tarih: 27

Tez Başlığı / Konusu: *Mikro ve Nano Yapılı Süper Çözünürlük Kırınım Optiklerinin Tasarımı ve Üretimi*

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümlerinden oluşan toplam **172** sayfalık kısmına ilişkin, 27/ 12 / 2019 tarihinde şahsım/ta tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % **1** 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar dahil
3. 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Uygulama Esaslarını inceledim ve bu Uygulama Esaslarında belirtilen azami benzerlik oranı çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğrudan hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve
27.12.

Adı Soyadı: Kemal Rüzgar

Öğrenci No: N14246336

Ana Bilim Dalı: Fizik Mühendisliği

Programı: Doktora

Statüsü: ☐Y.Lisans ☒Doktora ☐Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç.Dr. Akın Bacıoğlu
(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : KEMAL RÜZGAR
Doğum yeri : MAGUSA / KKTC
Doğum tarihi : 12.06.1989
Medeni hali : EVLİ
Yazışma adresi : EMEK KAZAKİSTAN CAD. 121/9 ÇANKAYA
ANKARA
Telefon : 05345501306
Elektronik posta adresi : kruzgar@hacettepe.edu.tr
Yabancı dili : İNGİLİZCE

EĞİTİM DURUMU

Lisans : HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ FİZİK MÜHENDİSLİĞİ
Yüksek Lisans : HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ FİZİK MÜHENDİSLİĞİ
Doktora : HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ FİZİK MÜHENDİSLİĞİ

İş Tecrübesi

2016- ----- TÜBİTAK UZAY TEKNOLOJİLERİ ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ

UZMAN ARAŞTIRMACI