

**FARKLI BOYUTLARDA CİSİMLERİN ÜÇ  
BOYUTLU YÜZEY PROFİLLERİNİN  
BELİRLENMESİ İÇİN TEMEL IZGARA  
YANSITMA YÖNTEMİ**

**Çağla DURMUŞ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ**

**2018**

**T.C.**

**NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FARKLI BOYUTLARDA CİSİMLERİN ÜÇ BOYUTLU YÜZEY  
PROFİLLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN TEMEL IZGARA YANSITMA  
YÖNTEMİ**

**Çağla DURMUŞ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. ÖZLEM KOCAHAN YILMAZ**

**TEKİRDAĞ-2018**

**Her Hakkı Saklıdır.**

**Bu tez TÜBİTAK tarafından 115f168 numaralı proje ile desteklenmiştir.**

Yrd. Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ danışmanlığında, Çağla DURMUŞ tarafından hazırlanan “Farklı Boyutlarda Cisimlerin Üç Boyutlu Yüzey Profillerinin Belirlenmesi için Temel Izgara Yansıtma Yöntemi ” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Serbüent YILDIRIM

*İmza :*

Üye: Doç. Dr. Hüseyin ÇAVUŞ

*İmza :*

Üye: Yrd. Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ

*İmza :*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU  
**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### FARKLI BOYUTLARDA CİSİMLERİN ÜÇ BOYUTLU YÜZEY PROFİLLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN TEMEL IZGARA YANSITMA YÖNTEMİ

**Çağla DURMUŞ**

Namık Kemal Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ

Bu çalışmanın hedefi, farklı ölçeklere ( $cm$ ,  $mm$ ,  $\mu m$ ) sahip cisimlerin üç boyutlu (3D) yüzey profillerinin ölçümü için temel ızgara yansıtma yönteminin kullanıldığı deney kurulumları gerçekleştirmektir. Projeksiyon, interferometre, CCD ve mikroskop kullanılarak iki ayrı kurulum denenerek cisimlerin ızgara desenli görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntülerden faz hesaplama amacıyla, 1D Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) faz yöntemi kullanılmıştır. Ana dalgacık olarak Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı (GMD) seçilmiştir. Morlet ve Paul dalgacıkları kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda  $cm$ ,  $mm$  ve  $\mu m$  ölçeklerinde cisimlerin her noktada yüksekliği bilinen, dinamik yapıda profilleri başarıyla elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** ızgara deseni, ızgara yansıtma tekniğı, interferometri, dalgacık dönüşümü profilometrisi, genelleştirilmiş morse dalgacığı

**2018, 45 Sayfa**

## ABSTRACT

Master Thesis

### FRINGE PROJECTION METHOD FOR THE DETERMINATION OF 3D SURFACE PROFILE OF DIFFERENT SIZE SAMPLES

Çağla DURMUŞ

Namık Kemal University  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics

Supervisor: Ass. Prof. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ

Aim of this thesis is set up different experiments about fringe projection technique to measure three dimensional (3D) profiles of objects in *cm, mm and  $\mu m$*  size. Projection or interferometer, CCD and microscope were combined to obtain images of sample objects with fringe pattern. From these images, the phase values were retrieved by using 1D continuous wavelet transform (CWT). In the analysis of CWT, generalized morse wavelet (GMW) is chosen as a mother wavelet. Experimental results of the GMW phase method were compared with the results of Morlet and Paul wavelets. At the end of the study, dynamic 3D profiles in *cm, mm and  $\mu m$*  size were achieved.

**Keywords:** fringe pattern, fringe projection techniques, interferometry, wavelet transform profilometry, generalized morse wavelet

**2018, 45 Pages**

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ii</b>
<b>ŞEKİL DİZİNİ.....</b>	<b>iv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR.....</b>	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ.....</b>	<b>6</b>
2.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü.....	7
2.2 Morlet Dalgacığı.....	9
2.3 Paul Dalgacığı .....	9
2.4 Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı.....	10
<b>3. 1D SDD FAZ YÖNTEMİ.....</b>	<b>12</b>
<b>4. IZGARA YANSITMA TEKNİĞİ.....</b>	<b>13</b>
4.1 Santimetre ve Milimetre Ölçeğinde Cisimlerin Ölçümü İçin Izgara Yansıtma Sistemi.....	16
4.2 Mikrometre Ölçeğinde Cisimlerin Ölçümü İçin Kırınım Faz Mikroskobisi.....	18
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>	<b>22</b>
5.1 Izgara Yansıtma Tekniğı Kullanılarak Milimetre Mertebesinde Cisimlerin İncelenmesi.....	22
5.2 Izgara Yansıtma Tekniğı Kullanılarak Santimetre Mertebesinde Cisimlerin İncelenmesi.....	24
5.3 Izgara Yansıtma Tekniğı Kullanılarak Mikrometre Mertebesinde Cisimlerin İncelenmesi.....	25
5.3.1 İnce Film Yüzey Morfolojisi İncelenmesi.....	28
5.3.2 Epitel Hücrelerin Morfolojisinin Belirlenmesi .....	29
5.3.3 Kırmızı Kan Hücrelerinin Morfolojisinin incelenmesi.....	30
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>32</b>
<b>7. SONUÇ.....</b>	<b>39</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>41</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>43</b>

## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. Dalgacık, dönüşüm ve sinyal.....	7
Şekil 2.2. (a) Üç farklı b değeri için, x eksenini boyunca sinyal üzerinde ilerleyen analiz dalgacığı; (b) bxa boyutlu SDD sonuç matrisi.....	8
Şekil 2.3. c=5 ve b=4 için (a) Morlet dalgacığı (çizgi ve kesikli çizgi sırasıyla fonksiyonun gerçel ve sanal kısımlarını göstermektedir); (b) (a)'daki Morlet analiz dalgacığının Fourier dönüşümü.....	9
Şekil 2.4. b=3 için (çizgi ve kesikli çizgi sırasıyla fonksiyonun gerçel ve sanal kısımlarını göstermektedir) (a) n=2 için Paul dalgacığı; (b) n=2 için Paul dalgacığının Fourier dönüşümü.....	10
Şekil 2.5. Morse analiz dalgacığının Fourier dönüşümü.....	11
Şekil 4.1. Beyaz ışık interferometresi kurulumu (white light spectral supercontinuum interferometer) .....	14
Şekil 4.2. Faz basamaklama yöntemi için görüntü oluşturmak üzere ızgara yansıtma projektörü, CCD kamera ve mikroskoptan oluşan deney düzeneği .....	14
Şekil 4.3. 3D profil ve yer değiştirme ölçümü için kurulan optik mikroskop.....	15
Şekil 4.4. Kurulan temel ızgara yansıtma deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	16
Şekil 4.5. Bilgisayar programıyla çizdirilen ızgara sinyalinin fourierinin şekli.....	17
Şekil 4.6. Deney de kullanılan örnek cisim.....	18
Şekil 4.7. a) Cismin yüksekliğinden dolayı cisimdeki eğrilmeler b) cismin referans görüntüsü .....	18
Şekil 4.8. Genelleştirilmiş morse dalgacığı kullanılarak balık rölyefi için ulaşılan 3D profil a) $(\gamma, \beta) = (3,3)$ aldığımızda b) $(\gamma, \beta) = (3,10)$ .....	18
Şekil 4.9. Beyaz ışık faz kırınım mikroskobisi (BKFM) kurulumu .....	19
Şekil 4.10. a) interferometre kurulum şeması b) fourier düzlemine geçen görüntünün karakteri ve filtrelenmesi c) kullanılmış olan filtrenin genel görüntüsü.....	20
Şekil 4.11. BKFM sisteminden elde edilen ve CDD' den gözlenen örnek girişim deseni a) örnekteki eğrilmeler b) referans görüntüsü.....	20
Şekil 4.12. Deney kurulumundan elde edilen kan hücresinin genelleştirilmiş morse dalgacığıyla analiz edilerek elde edilen üç boyutlu yüzey profili.....	21
Şekil 5.1. Milimetre boyutunda bir cismin ölçümü için kurulan düzeneğin görüntüsü.....	22
Şekil 5.2. a) Polo şekerin görüntüsü b)Polo şekeri üzerine x yönünde tek taşıyıcı frekansla ( $f_0 = 0,2$ cm) oluşturulmuş ızgara deseninin yansıtılmasıyla elde edilen görüntü ve c) referansı .....	23



Şekil 5.3. a) Legonun görüntüsü b) Lego üzerine x yönünde tek taşıyıcı frekansla ( $f_0 = 0,2 \text{ mm}$ ) oluşturulmuş ızgara deseninin yansıtılmasıyla elde edilen görüntü ve c) referansı .....	23
Şekil 5.4. Çapraz optik eksenli geometride kurulan deney düzeneğinin kurulumu.....	24
Şekil 5.5 Çiçek rölyefi üzerine x yönünde tek taşıyıcı frekansla oluşturulmuş ızgara deseninin yansıtılmasıyla elde edilen görüntü ve referansı.....	25
Şekil 5.6. Beyaz ışık faz kırınım mikroskopisi (BKFM) kurulumu.....	26
Şekil 5.7. Mikroskoptan alınan görüntü ile oluşan kırınım deseni.....	26
Şekil 5.8. Filtreleme işlemi için kırınım deseninin filtre (Pinhole) üzerine düşürülmesi.....	27
Şekil 5.9. Laboratuvar ortamında hazırlanan filtre.....	28
Şekil 5.10. BKFM deney kurulumundan elde edilen a) Cds ince film üzerindeki birikinti b) cismin referans görüntüsü.....	29
Şekil 5.11. a) Ağız dokusundan alınan epitel doku örneği görüntüsü b) görüntünün referansı.....	30
Şekil 5.12. BKFM deney kurulumundan elde edilen a) kan hücresi örneğinin görüntüsü b) bu örneğin referans görüntüsü.....	31
Şekil 5.13. BKFM deney kurulumundan elde edilen iki lamel arasına konulan a) kan hücresi örneğinin görüntüsü b) bu örneğin referans görüntüsü.....	31
Şekil 6.1. Izgara yansıtma tekniğinde santimetre ölçeğinde analiz edilen çiçek rölyefinin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi; b) karşıdan görüntüsü c) $y = 350$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (mavi), GMD (yeşil) ( $\beta = 10, \gamma = 3$ )).....	33
Şekil 6.2. BKFM ölçüm sisteminden görüntülenen Cds ince filmin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi; b) karşıdan görüntüsü c) $y = 350$ . satır için çizilen faz değerleri ( Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (yeşil), GMD (mavi) ( $\beta = 9, \gamma = 3$ )) .....	34
Şekil 6.3. BKFM ölçüm sisteminden görüntülenen kan hücrelerinin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi b) karşıdan görüntüsü c) $y = 600$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (yeşil), GMD (mavi) ( $\beta = 10, \gamma = 4$ )).....	35
Şekil 6.4. BKFM ölçüm sisteminden görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi b) karşıdan görüntüsü c) $y = 300$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (yeşil), GMD (mavi) ( $\beta = 3, \gamma = 3$ )).....	36
Şekil 6.5. SEM' den alınan kan hücrelerinin mikrometre ölçeğinde görüntüsü.....	37
Şekil 6.6. BKFM ölçüm sisteminden görüntülenen epitel hücrelerinin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi b) karşıdan görüntüsü c) $y = 300$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (yeşil), GMD (mavi) ( $\beta = 9, \gamma = 3$ )).....	38

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$a$	: Sürekli dalgacık dönüşümünde ölçek parametresi
$A$	: Izgara fonksiyonunun genliği
$b$	: Sürekli dalgacık dönüşümünde öteleme parametresidir
$c$	: Morlet dalgacığında sabit uzaysal frekanstır ve 5 ya da 6 olarak seçilir
$d$	: Kamera-projektör arası uzaklık
$f_0$	: İzlenen ızgara görüntüsünün temel frekansı
$G(\alpha)$	: Ana dalgacık analiz fonksiyonunun Fourier dönüşümü
$h(x)$	: Izgara deseninin bir satırını gösteren (y-piksel), x yönünde değişen tek boyutlu ızgara sinyali
$H(\alpha)$	: $h(x)$ 'in Fourier dönüşümü
$I_0(x)$	: Arka plan parlaklığı
$L$	: Numunenin projektör ve kameraya olan uzaklığı
$L_k^c$	: Laguerre polinomu
$m(x)$	: Morlet dalgacığı
$M(\alpha)$	: Morlet dalgacığının Fourier dönüşümü
$n$	: Paul dalgacığının derecesi
$p(x)$	: Paul dalgacığı
$P(\alpha)$	: Paul dalgacığının Fourier dönüşümü
$p_0$	: Izgara genişliği
$U(\alpha)$	: Heaviside fonksiyonu
$V(x)$	: Izgara görünürlüğü
$\emptyset(x)$	: Izgaranın yükseklik değişimini gösteren faz
$\emptyset'(x)$	: Fazın gradyanı
$W(a, b)$	: Sürekli dalgacık dönüşümü fonksiyonu
$\beta$	: Projektör ile kamera arasındaki açı
$\beta$	: Genelleştirilmiş morse dalgacığı değişken parametresi
$\theta$	: Projektör ile kamera arasındaki açı

$\gamma$	: Genelleştirilmiş morse dalgacığı değişken parametresi
$SDD$	: Sürekli dalgacık dönüşümü
$\Psi_{a,b}(x)$	: Ana dalgacık fonksiyonu
$1D$	: Bir boyutlu
$\Gamma$	: Gama fonksiyonu

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada benden desteklerini esirgemeyen bu uzun ve yorucu çalışma sırasında her zaman yanımda olan baőta annem Sebahat DURMUŞ ve aileme; çalıőmamı yönlendiren, her zaman yanımda olarak bana bilgilerini aktaran, iyi ve kötü günümde de maddi manevi desteğini esirgemeyen, sadece bu çalışmada değil hayatımın her anında bana yol gösterip, akıl veren ve her konuda bana yardımcı olan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ' a teőekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca bu çalıőmayla birlikte yapılan 115f168 nolu proje için de TÜBİTAK kurumuna sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2018

Çağla DURMUŞ

## 1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasının hedefi farklı boyutlara sahip olan cisimlerin üç boyutlu yüzey profillerini oluşturabilmek için, Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı (GMD) ile 1D Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) algoritmasının faz hesaplamak için kullanılmasıdır. Öncelikle bu işlemi santimetre ve milimetre boyutundaki cisimler için Temel Izgara Yansıtma tekniğı kullanılarak bir ön çalışma olarak yapılacaktır. Daha sonra bu çalışmanın sonuçlarının referans alınmasıyla mikrometre boyutundaki cisimler için Beyaz Işık Faz Kırınım Mikroskop (BKFM) deney düzeneğı kurulumu gerçekleştirilecektir. Bu deney düzeneğı ile mikrometre mertebesinde, nanometre hassasiyetinde ölçüm yapabilen bir deney kurulumundan elde edilen sonuçların analizinde GMD kullanılacaktır.

Izgara deseninden faz dağılımının elde edilmesi için birçok farklı teknik kullanılır. Bunların en yaygın olanı Fourier dönüşümü tekniğıdir (Takeda ve Mutoh 1983, Watkins, Tan, ve Barnes 1999). Adını matematikçi Joseph Fourier' den alan 'Fourier dönüşümü' tanımı, bir fonksiyonu açarak, toplamı bu fonksiyonu verecek frekans bileşenlerinin elde edilmesi işlemi gerçekleştirir. Fourier dönüşüm profilometrisi (FDP) olarak adlandırılan matematiksel işlemler kullanılarak üç boyutlu profil belirleme işlemi ilk kez Takeda ve Mutoh tarafından önerilmiştir (Takeda ve Mutoh 1983). Bu yöntemde, faz dağılımını elde etmek için ızgara deseni, analitik bir sinyale dönüştürülür. Çapraz optik eksen geometrisi kullanılarak da deney kurulumunun geometrisinden cismin yüksekliğı elde edilir. Fakat bunu yaparken gerçek faz dağılımını elde etme işlemi sırasında faza, faz düzeltme işlemi de yapılmalıdır. Bu faz düzeltme problemine daha sonraki yıllarda Singh ve Sirkis, optik yöntemlerle üretilen sinüs ve kosinüs dağılımlarından faz gradyan dağılımını doğrudan hesaplayan bir diferansiyel çapraz çarpanı (DCM) algoritması geliştirerek çözümler getirmeye çalışmıştır (Singh ve Sirkis 1994). Daha sonra fourier dönüşüm profilometrisine yeni filtreler eklenmiş, profil belirleme işlemi daha iyi sonuçlarla başarılıdır (Nicchiotti n.d. 2014). Devam eden yıllarda çalışmalar sürmüş ve bu teknik için kullanım alanları genişletilmiştir (Berryman, Pynsent, ve Cubillo 2003, Kemaio 2007, Quan, Tay, ve Shang 1999, Su ve Chen 2001, Vanherzeele, Guillaume, ve Vanlanduit 2005). Yine devam eden süreçte ölçüm alınmada renkli ızgara desenleri kullanımı da yapılmıştır (Chen ve ark. 2007, Skydan, Lalor, ve Burton 2005). Sağlık alanında da özellikle sırt, göğüs yüzey profili belirlemesi ile ilgili yapılan çalışmalar mevcuttur (Leonardi, Rmiie, ve Lenarcic n.d. 2014, Moore ve ark. 2006).

Üç boyutlu profil belirleme için Fourier dönüşümünden başka Dalgacık dönüşümü de genelde tercih edilen integral dönüşümlerden biridir. Fourier dönüşümünün çözünürlük problemi ve frekans bilgisi eksiklikleri olduğundan 1980'lerin ortasında dalgacık dönüşümü geliştirilmeye başlanmıştır. 1990'larda ise bilim ve mühendislik alanlarında kullanılır olmuştur. Bunun başlıca sebepleri arasında çoklu çözünürlük özelliği sayesinde sinyalleri daha kesin inceleyebilmek, sinyali bozan gürültüyü elimine edebilmek ve veriyi oldukça küçük boyutlarda saklayabilmek gibi özellikleri vardır (Addison 2002). Yapılan çalışmalar arasında Fourier ve dalgacık dönüşümlerinin karşılaştırıldığı çalışmalar (Daubechies 1990) yanı sıra dalgacık dönüşümünün sinyal analizinde kullanıldığı çalışmalar da vardır (S D Meyers, Kelly, ve O'Brien 1993). Torrence ve Compo (1997)' nun çalışmasına göre, "dalgacık dönüşümü için zaman serilerinin, zaman-frekans uzayında gösterimini sağlayarak, değişimin baskın olduğu kipleri ve bu kiplerin zamanla nasıl değiştiğini gösterir". Aynı çalışmada, dalgacık dönüşümünün uygulama alanlarının yanında, Morlet, Paul ve DOG (Difference of Gaussian - özel bir durumda 'Meksika Şapkası' diye de adlandırılan) ana dalgacık fonksiyonları özetlenerek çözümleri verilmiştir. 1999 yılında, ilk olarak "faz-gradyan yöntemi" önerilmiştir ve interferometri ile oluşturulan ızgara deseni için sürekli dalgacık dönüşümü tekniğiyle çözümler elde edilmiştir (Watkins ve ark. 1999). Başka bir simülasyon çalışmasında, faz- gradyan yöntemi ile Paul ana dalgacığı kullanılarak faz dağılımı hesaplaması yapılmıştır (Afifi ve ark. 2002). 'Faz' yöntemi ve 'faz- gradyan' yönteminin karşılaştırılmasının yapıldığı çalışmada faz düzeltme işlemi uygulaması da yapılmıştır (Dursun, Özder, ve Ecevit 2004). Aynı zamanda, deneysel verilere Fourier dönüşümü ve ilk olarak Morlet ana dalgacığı ile sürekli dalgacık dönüşümü uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bunların yanı sıra, Meksika şapkası ve Morlet ana dalgacıkları ile sürekli dalgacık dönüşümünde faz dağılımı elde etmede farklı teknikler kullanılmış, insan yüzü profilinin belirlenmesi çalışmaları da yapılmıştır (Sinha ve Singh 2005, Utsumi, Iwai, ve Yachida 2006).

Fourier ve dalgacık dönüşümlerine alternatif yöntem olarak Stockwell dönüşümü (S-dönüşümü) de üç boyutlu profil belirleme de kullanılmaktadır. Stockwell dönüşümü, ilk kez "zaman serilerinin yerel (lokal) spektrumunu belirleme" olarak tanımlanarak, zaman serilerinin, zaman frekans gösteriminde kullanılan bir dönüşümdür (Stockwell, Mansinha, ve Lowe 1996). Bu dönüşüm, yer çekim dalgası etkinlik analizi gibi temel bilimlere dahil pek çok alana uygulanabilirliğinin yanında, manyetik rezonans (MR) görüntülerinin incelenmesi gibi

tıbbi uygulamalarda da kullanılabilir.

Dalgacık dönüşümü, zamanla değişen veya ani süreksizlikler taşıyan sinyalleri incelemek için idealdir. Sinyaldeki frekans içeriklerinin birebir karşılığı bulunmamasıyla birlikte, ilgilenilen frekans aralığına bağlı olarak gerek ölçek cinsinden ifade edilebilme özelliği sayesinde, farklı aralıkları net bir şekilde görebilme imkanı sağlamaktadır (Demren 2015). Bu yüzden bu çalışmada Dalgacık dönüşümü tercih edilerek analizler bu integral dönüşümüyle yapılmıştır.

Izgara yansıtma tekniği ile ölçüm yapmak için birçok farklı deney kurulumu vardır. İlk olarak Mutoh ve Takeda 1983 yılında, analiz birimi olarak fourier dönüşümü kullanarak, objelerin üç boyutlu profillerini belirlemek için çapraz optik eksenli geometriyi oluşturmuş ve yükseklik hesabı yapmıştır (Takeda ve Mutoh 1983). 2001 yılında daha küçük ölçeklerdeki cisimlerin üç boyutlu (3D) ölçümleri için LCD projektör ve mikroskop kullanılmıştır. Ayrıca görüntü analiz birimi olarak da faz basamaklama yöntemi kullanılmıştır (Quan ve ark. 2001). Izgara yansıtma ile profil belirleme yöntemiyle mikrometre boyutunda ölçüm yapabilmek için, farklı ışık kaynakları veya farklı ızgara desenli interferometrik kurulumlar da kullanılabilir. Bunlardan bazıları; iki ışın interferometrisi (Leonhardt 2005), çizgi-alan Fourier interferometrisi (Endo, Yasuno, ve Makita 2005), beyaz ışık interferometrisidir. (Blunt 2006). Izgara yansıtma tekniğinde ölçüm gücünü arttırmak için literatürde bulunan deney kurulumları da önerilmiştir. Bu önerilen deney düzeninde ışık kaynağı olarak beyaz ışık kullanılmıştır (Reolon ve ark. 2006). Yine 2006 yılında başlayarak daha sonraki yıllarda da bununla ilgili Gabriel Popescu' nun çalışmaları da mevcuttur. Yaptığı çalışmalarda kırmızı kan hücresi ve nano ölçekli yapılar kullanmış ve bunların yüzey profillerini ve dinamik alt yapılarını incelemiştir (Popescu 2008, 2011, Popescu ve ark. 2006). Yine benzer olarak beyaz ışık interferometrisi ile deney kurulumları vardır. Kullanılan ışık kaynağı ışın bölücü kullanılarak önce ikiye ayrılmış ve daha sonra tekrar birleştirilmiştir. Ortaya çıkan ızgara desenli görüntüler kaydedilerek ve bilgisayar ortamına aktarılarak analiz işlemleri yapılmıştır (Thian ve ark. 2007). İnterferometrik kurulum kullanarak ayrıca objektiflerden de yararlanarak bu tür farklı deney düzenekleri de oluşturulabilir (Ha, Choi, ve Lee 2008, C. Lai ve Hsu 2007, Zwemer, Petriccione, ve Curry 2006).

Devam eden yıllarda yapılan birçok çalışmada, kullanılan analiz birimleri veya kurulan deney düzeneklerinde değişiklikler yapılarak, sonuçlar iyileştirilmeye çalışılmış ve farklı

örneklerle bu deneyler gerçekleştirilmiştir. Düzenekler yapılırken sözü edilen farklılıklar ise mercekler, kullanılan kamera ve ışık kaynağı, ışın bölücüler, yansıtıcı veya geçirgen aynaların kullanım şekli veya kullanıp kullanılmaması şeklinde açıklanabilir (Li, Su, ve Chen 2010, Pham ve ark. 2011, Xue ve ark. 2011, Yaqoob ve ark. 2011). Yine başka bir çalışmada ise ızgara yansıtma projektörü, CCD kamera ve mikroskoptan oluşan deney düzeneği ile mikrometre boyutunda 3D profil ölçümü gerçekleştirilmiştir (Shi ve ark. 2013). Ayrıca mikroskopla birlikte bir interferometrik bir kurulum ve/veya objektif kullanılarak da bu tür bir ölçüm yapmak mümkündür. Bu deney kurulumuyla yapılan birçok çalışma da mevcuttur (Dong ve Lu 2012, Xia, Pan, ve Zhang 2014). Bhaduri ve Pham tarafından yapılan çalışmalarda ise beyaz ışık mikroskopu ve Mach Zehnder İnterferometresi birleştirilerek BKFM (Beyaz Işık Faz Kırınım Mikroskopu) ölçüm sistemi ile kan hücrelerinin yüzey ölçümü denenmiştir (Bhaduri ve ark. 2012, Pham ve ark. 2013). Burada kullandıkları örnek sabit değil, hareketlidir. Örneğin görüntülenmesi ve yeterince hızlı bir fotoğraf makinesi ile bir fotoğrafının çekilmesi BKFM ile mümkündür. Izgara yansıtma tekniği ile sabit (tarama olmaksızın) anlık alınacak bir cisim görüntüsü ve bir referans görüntü, örnek cismin yüksekliğinin hesaplanması için yeterlidir (Yaqoob ve ark. 2011). L. Thomas' ın 2015 yıllarına gelindiğinde yaptığı çalışma da ise interferometrik deney düzenekleri geliştirilmesi devam etmiş ve Mach- Zehnder interferometresiyle faz hesaplanması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma da ışık ışınının, değişen bir kırılma indisine sahip ortam vasıtasıyla yayılması ve yayılırken geçtiği çapraz yol uzunluğuna bağlı olarak orantılı bir faz kazanmış olmasından yola çıkılır (Thomas ve ark. 2015).

2015 de yapılan diğer çalışmalarda, interferometrik olmayan görüntülerin çözümleri ve yüksek eğimli yüzeylerin çözümleri üzerine de durulmuştur (Groot 2015, Hare 2015).

Izgara yansıtma tekniği ile 3 boyutlu yüzey ölçüm yöntemi üç ana birimden oluşur. Bu birimler; CCD, görüntü oluşturma birimi ve görüntü analiz birimidir (Gorthi ve Rastogi 2010). Bu yöntemde ilk olarak, örnek üzerine ızgara deseni yansıtılır ve cismin görüntüsü kaydedilir. Cismin yüksekliğinden dolayı cisimde eğrilmeler meydana gelir. Oluşan bu eğrilikler görüntünün bir satırını oluşturan sinyal dalga denklemi olarak yazıldığında, bu denklemdeki faz terimi taşır (Su ve Chen 2001). Burada Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) tercih edilerek oluşturulan bilgisayar programı ile görüntü analiz edilir ve her satırın faz bilgisine ulaşılır. Deney sisteminin geometrisinden faz, yükseklik bilgisine dönüştürülür



(Kocahan 2008). Yüzey üzerindeki her noktanın yüksekliği belirlendikten sonra bir araya getirildiğinde cismin 3 boyutlu profili ele edilmiş olur (Takeda ve Mutoh 1983).

Aynı işlem beyaz ışık kırınım faz mikroskopisi (BKFM) deney kurulumunda da uygulanabilir. Burada ızgara deseni deney kurulumunun içinde oluşturulur. Beyaz ışık kırınım faz mikroskopisi (Pham ve ark. 2013) adı verilen ölçüm sistemi inverted mikroskop, Mach–Zehnder benzeri bir interferometre ve CCD’ den oluşmaktadır. İnterferometre sayesinde ızgara desenli örnek görüntüsü CCD ile kaydedilir. Analiz işlemleri uygulanarak faz bilgisine ulaşılır.

Bu çalışmada öncelikle bir projeksiyon ve CCD kameradan oluşan standart ızgara yansıtma tekniğiyle santimetre ve milimetre ölçeğinde olan cisimlerin yüzey profiline bakılacaktır. Bunun için 1D sürekli dalgacık dönüşümünden (SDD) yararlanılacaktır. Mikrometre boyutundaki cisimler için ise bir mikroskop, Mach–Zehnder benzeri bir interferometre ve CCD’ den oluşan Beyaz Işık Faz Kırınım Mikroskopisi kurulumu kullanılacaktır. Buradan alınan örnek görüntüler 1D SDD ile analiz edilerek faz bilgisine ulaşmak bu çalışmanın amacıdır. 1D SDD yöntemiyle farklı analiz dalgacıkları kullanılarak faz hesaplamak mümkündür. Burada ana dalgacık olarak Morse dalgacığı kullanılacak ve sonuçlar Morlet ve Paul dalgacık çeşitleriyle karşılaştırılacaktır.

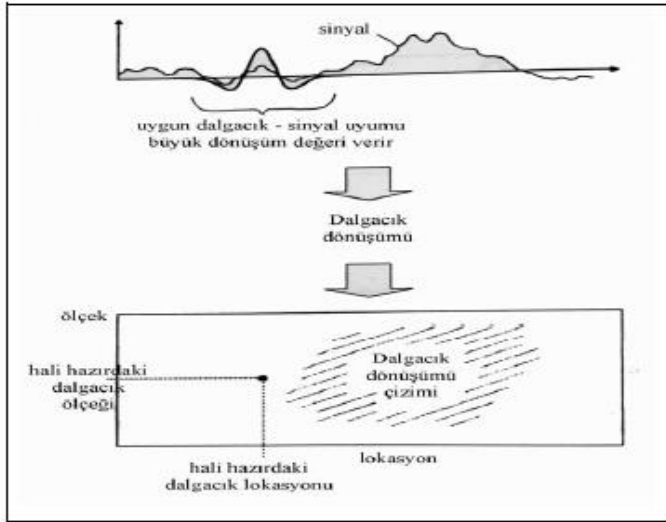
Bu çalışma 7 bölümden oluşmaktadır. Konunun kısa bir anlatımının yapıldığı giriş bölümünden sonra, ikinci bölüm de ise çalışmada kullanılan integral dönüşümü anlatılmaktadır. Bu dönüşümden faydalanılarak ulaşılan faz bilgisinin içeriği üçüncü bölüm de yer almaktadır. Dördüncü bölüm de çalışmada kullanılan deney kurulumlarından açıklanarak, bu deney kurulumlarının nasıl yapıldığına beşinci bölümde de yer verilmiştir. Ölçüm sonuçları ise altı ve yedinci bölümler de bulunmaktadır.

## 2. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ

Dalgacık dönüşümü (wavelet transform), 1980'lerin ortasında, sismik sinyallerin incelenmesinde geliştirilmeye başlanmış, 1990'larda da bilim ve mühendislik alanlarında sıkça kullanılır olmuştur. Grossman ve Morlet tarafından geliştirilen dalgacık dönüşümü,  $\Psi_{a,b}(x)$  olarak tanımlanan analiz dalgacık fonksiyonuyla,  $f(x)$  sinyal fonksiyonun çarpılmasıdır (Addison 2002, S D Meyers ve ark. 1993). Dalgacık dönüşümü diğer dönüşümlerden farklı olarak her spektral bileşen işlenirken pencere genişliği değişir (Polikar 2006). Bu özellik dalgacık dönüşümünün en temel özelliğidir. Bunun dışında frekansın yeriyle ilgili bilgiyi daha net alabildiğimizden, dalgacık dönüşümü, kullanılan diğer integral dönüşümlerinden daha kullanışlı bir integral dönüşümü haline gelmiştir.

$\Psi_{a,b}(x)$  analiz dalgacık fonksiyonunun elde edildiği ana dalgacık fonksiyonu  $\Psi(x)$ , üç özelliğe sahip olmalıdır. Ana dalgacık fonksiyonunun merkezi sıfırda olmalıdır ve  $x \rightarrow \infty$  giderken,  $\Psi(x) \rightarrow 0$  gitmelidir.  $\Psi(x)$ 'in ortalama değeri sıfır olmalıdır. Dalgacıklar genellikle düzenlidir (S. D. Meyers, Kelly, ve O'Brien 1993).

Dalgacık dönüşümü, zaman serilerinin zaman-frekans gösteriminde kullanılan bir dönüşümdür. Zaman ve frekans çözünürlük probleminin kuantum mekaniğinin Heisenberg Belirsizlik İlkesi ile ilişkisi vardır. Dalgacık dönüşümünde sinyal pencere fonksiyonuna benzer bir fonksiyonla çarpılmaktadır. Her spektral bileşen işlenirken pencere genişliği değişir, bu dalgacık dönüşümünün en temel özelliğidir (Polikar 2006). Dalgacık dönüşümünde dalgacık olarak isimlendirilen küçük dalga benzeri fonksiyonlar kullanılır. Matematiksel olarak başka bir tanımlama yapılırsa, dalgacık dönüşümü, sinyal ile bir dalgacık fonksiyonunun matematiksel olarak çarpımıdır denebilir. Dalgacığa sinyal boyunca ilerletilebiliriz. Ayrıca germe ve sıkıştırma da yapılabilir. Dalgacık dönüşümü, şekil 2. 1' de gösterildiği gibi sinyal ile dalgacığın yerel uyumunu ölçmeye yarar. Eğer belirli bir ölçek ve konumda, Şekil 2. 1' in üst kısmında gösterildiği gibi, dalgacık ile sinyal uyumu çok iyiye büyük dönüşüm değeri elde edilir. Fakat uyum iyi değilse, dönüşüm değeri küçük olur (Addison 2002).



**Şekil 2.1.** Dalgacık, sinyal ve dönüşüm (Addison 2002)

Dönüşüm değeri, iki boyutlu dönüşüm düzleminde sinyalin farklı noktalarında ve farklı ölçeklerde hesaplanarak dönüşüm düzlemini doldurur. Bu olaya “sürekli dalgacık dönüşümü” (SDD) (continuous wavelet transform – CWT) denir. Dönüşüm kesikli değerlerde hesaplanmış ise “kesikli dalgacık dönüşümü” (discrete wavelet transform – DWT) denir. Bu çalışmada ise sürekli dalgacık dönüşümü kullanılmıştır.

## 2.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Zamana göre frekansı değişebilen sinyallerin analizinde, zaman- frekans diyagramı sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) ile elde edilir. 1 boyutlu SDD,  $W(a, b)$  olarak gösterilir ve bu denklem herhangi bir  $f(x)$  fonksiyonu için (Addison 2002);

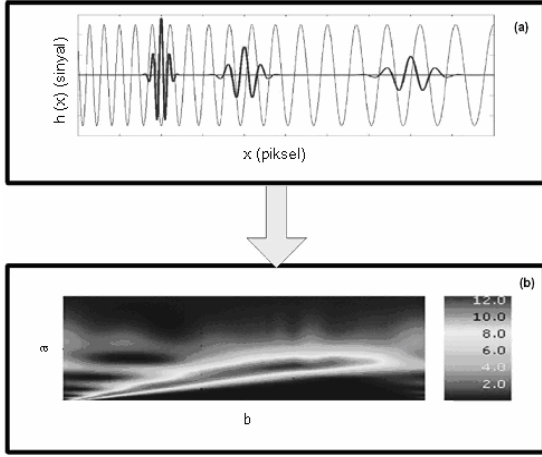
$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{(a,b)}^*(x) dx \quad (1.1)$$

olarak tanımlanmaktadır. Konvolusyon teorimi kullanılarak  $x$  uzayındaki SDD

$$W(a, b) = a^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha) G(a\alpha) \exp(i\alpha b) d\alpha \quad (1.2)$$

denklemleri ile ifade edilir. Denklem 1.2’ de bulunan  $G(a\alpha)$  dalgacıkların Fourier dönüşüğünü temsil etmektedir. Burada  $a \neq 0$  ve  $b$  gerçektir olmak üzere,  $b$  öteleme  $a$  ise ölçek parametresidir. Ölçek parametresi  $a$  büyük olduğunda sinyali genişletir, düşük frekanslarda kullanılır; küçük ölçek parametresi ise sinyali sıkıştırır ve yüksek frekanslarda kullanılır. Dalgacık fonksiyonu sinyali  $x$  eksenini boyunca belirli bir ölçek parametresi  $a$  değeri için konumu  $b$  parametresine

bağlı olarak şekil 2. 2' de de gösterildiği gibi tarar ve bu işlem her a değeri için tekrarlanır (Hwang ve ark. 2007).



**Şekil 2. 2.** a) Üç farklı b değeri için, x eksenini boyunca sinyal üzerinde ilerleyen analiz dalgacığı; b) bxa boyutlu SDD sonuç matrisi (Hwang ve ark. 2007)

Izgara deseninin bir satırını (y-piksellerini) gösteren, x yönünde değişen tek boyutlu bir ızgara sinyalini denklem 1.3' deki gibi tanımlanır (Afifi ve ark. 2002);

$$h(x) = I_0(x) \left[ 1 + V(x) \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x)) \right] \quad (1.3)$$

Burada  $I_0(x)$  , arka plan parlaklığı;  $V(x)$  , ızgara görünürlüğü;  $\varphi(x)$  , ızgaranın yükseklik değişimini gösteren faz ve  $f_0$ , x yönündeki taşıyıcı frekanstır. Burada ki  $f_0$ , aşağıda gösterilen koşulu sağlamalıdır. (Takeda ve Mutoh 1983)

$$2\pi f_0 > \left| \frac{d\varphi}{dx} \right|_{max}$$

$H(\alpha)$  olarak tanımlanan ızgara sinyalinin fourieri ise,  $h(x)$ ' in Fourier dönüşümü alınarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$H(\alpha) = I_0(b)\pi \left\{ 2\delta(\alpha) + V(b) \left[ \delta \left( \alpha - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi} \right) \exp \left( i(\varphi(b) - b\varphi'(b)) \right) + \delta \left( \alpha + f_0 + \frac{\varphi'(b)}{2\pi} \right) \exp \left( -i(\varphi(b) - b\varphi'(b)) \right) \right] \right\} \quad (1.4)$$

## 2.2 Morlet Dalgacı

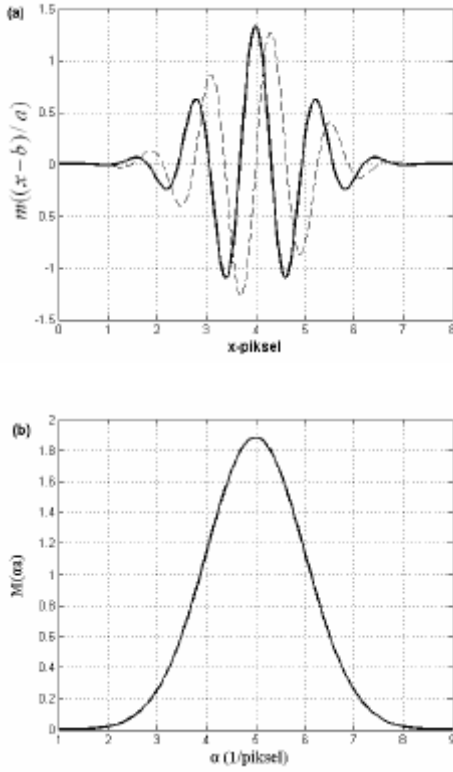
Gaussian ile modüle edilmiş,

$$m(x) = \pi^{1/4} \exp(icx) \exp\left(-x^2/2\right) \quad (1.5)$$

şeklindeki düzlem dalgaya Morlet dalgacı denir ve bunun Fourier dönüşümü,

$$M(\alpha) = \frac{\sqrt{2\pi}}{4\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(\alpha-c)^2}{2}\right] \quad (1.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada c, sabit uzaysal frekanstır ve 5 ya da 6 olarak seçilir (Farge 1992, Torrence ve Compo 1998).



**Şekil 2.3.**  $a=1$ ,  $c=5$  ve  $b=4$  için (a) Morlet analiz dalgacı  $\left(m \frac{(x-b)}{a}\right)$  (çizgi ve kesikli çizgi sırasıyla fonksiyonun gerçek ve sanal kısımları); (b) (a)' da ki Morlet analiz dalgacığının Fourier dönüşümü  $M(\alpha)$  (Farge 1992, Torrence ve Compo 1998)

## 2.3 Paul Dalgacı

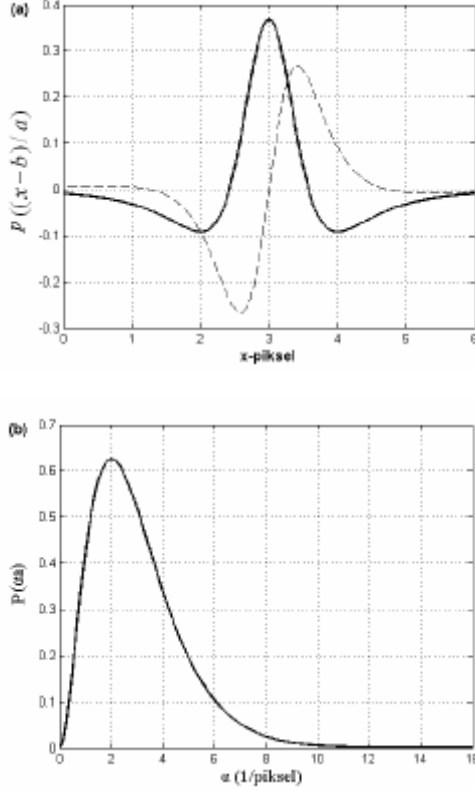
Paul dalgacı şu şekilde tanımlanır,

$$p(x) = \frac{2^n n! (1-ix)^{-(n+1)}}{2\pi \sqrt{(2n)!/2}} \quad (1.7)$$

buradan Paul dalgacığının derecesini göstermektedir. Bu dalgacığın Fourier dönüşümü,

$$P(\alpha) = \frac{2^n}{\sqrt{n(2n-1)!}} \alpha^n \exp(-\alpha) U(\alpha) \quad (1.8)$$

olarak hesaplanmıştır ve burada U ile verilen Heaviside fonksiyonudur (Afifi ve ark. 2002).



**Şekil 2.4.**  $a=1$ ,  $b=3$  için (çizgi ve kesikli çizgi sırasıyla fonksiyonun gerçel ve sanal kısımlarını gösterir) (a)  $n=2$  için Paul analiz dalgacı  $\left(p \frac{(x-b)}{a}\right)$ ; (b)  $n=2$  için Paul analiz dalgacığının Fourier dönüşümü  $P(\alpha\alpha)$  (Afifi ve ark. 2002)

## 2.4 Genelleştirilmiş Morse Dalgacı

Morse dalgacığının genel tanımı;

$$\Psi_{k;\beta,\gamma}^+(f) = \sqrt{2} A_{k;\beta,\gamma} (2\pi f)^\beta e^{-(2\pi f)^\gamma} L_k^c(2[2\pi f]^\gamma) \quad (1.9)$$

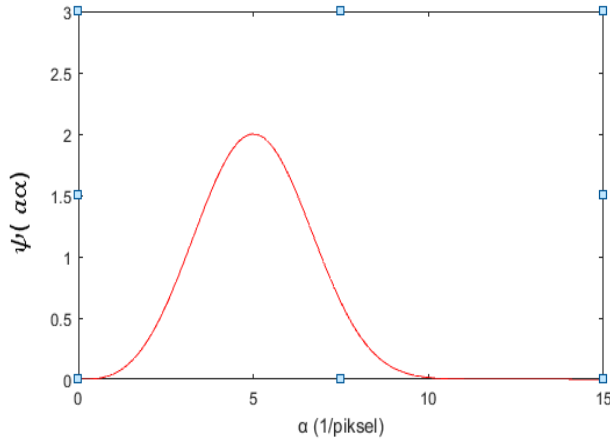
Bu şekilde gösterilebilir (Olhede and Walden 2002). Burada  $c = r - 1$  ve  $A_{k;\beta,\gamma} = \sqrt{[\pi\gamma 2^r \Gamma(k+1)/\Gamma(k+r)]}$  olarak tanımlanır.  $L_k^c$  ise denklem 1.10' da gösterilen Laguerre polinomu olarak verilebilir (Olhede ve Walden 2002).

$$L_k^c(x) = \sum_{m=0}^k (-1)^m \frac{\Gamma(k+c+1)}{\Gamma(c+m+1)\Gamma(k-m+1)} \frac{x^m}{m!} \quad (1.10)$$

Eğer buradaki  $k$  değerini sıfır alırsak, genelleştirilmiş morse dalgacığımızı sıfırıncı dereceden almış oluruz. Alınan  $k$  değeri ne kadar büyük olursa, yapılan işlemlerde bir o kadar karışık olmaktadır. Bu yüzden işlemlerdeki kolaylığı açısından bu çalışmada da sıfırıncı dereceden genelleştirilmiş morse dalgacığı (GMD) seçilerek kullanılmıştır. GMD'nin fourieri dönüşümü ise;

$$\psi(a\alpha) = U(a, \alpha) 2 \left( e^{\gamma/\beta} \right)^{\beta/\gamma} (a\alpha)^{\beta} \exp((-a\alpha)^{\gamma}) \quad (1.11)$$

olarak hesaplanmıştır (Kocahan, Coşkun, ve Özder 2015). Burada U ile verilen Heaviside fonksiyonudur.  $\gamma, \beta$  morse dalgacığının değişen parametreleridir. 0.5' den büyük her değer bu parametreler için alınabilir (Kocahan ve ark. 2014). Bu değişen parametreler fazladan serbestlik derecesidir ve bu da dalgacığın çözünürlüğünü istediğimiz şekilde kullanabilmemizi sağladığından GMD'nin önemli bir özelliğidir.



**Şekil 2. 5.** Morse analiz dalgacığının Fourier dönüşümü ( $a=0,2$ ) (Kocahan ve ark. 2014)

### 3. 1D SDD FAZ YÖNTEMİ

Seçilen dalgacığın Fourier dönüşümü ve ızgara desenin Fourier dönüşümü denklem (1.2)' de yerine konulduğunda dönüşüm denklemi elde edilir. Denklem (1.12)'de GMD ile elde edilen dönüşüm sonucu verilmiştir. Bu işlem sırasında dalgacığın lokalizasyon özelliği göz önünde bulundurulmalıdır. Sonuçta elde edilen bu  $W(a, b)$  denklemi,  $A \exp(i(wt + \varphi))$  formunda bir dalga denklemdir. Bu nedenle aşağıdaki denklemi gerçek kısmı genliği, eksponansiyel kısmın içi de fazı verir. Faz değeri  $\varphi(b) = \arctan \left[ \frac{ImW}{ReW} \right]$  şeklinde sinyalin SDD' den aşağıdaki denklemden hesaplanır ;

$$W(a, b) = 2\pi I_0(b) V(b) a^{\beta + \frac{1}{2}} \left( \frac{\gamma}{\beta} \right)^{\beta/\gamma} \left[ f_0 + \frac{\varphi'(b)}{2\pi} \right]^\beta \exp \left\{ \frac{\beta}{\gamma} - \left[ a f_0 + a \frac{\varphi'(b)}{2\pi} \right]^\gamma \right\} \exp \left\{ i \left[ \varphi(b) - b \varphi'(b) + b f_0 + b \frac{\varphi'}{2\pi} \right] \right\} \quad (1.12)$$

Yüzeyin her noktası için faz yöntemiyle hesaplanan faz teriminde gürültü dışında süreksizlik oluşturan farklı bir etken daha vardır. Faz farkı  $-\pi$  ile  $+\pi$  aralığında değiştiği için birbirini takip eden iki faz bilgisi arasında  $2\pi$  değerinden daha büyük bir değişim görülebilir. Bu değişim beklenmeyen bir durumdur. Trigonometrik olarak  $\alpha = \alpha + 2\pi$  olduğundan, takip eden faz değerine  $2\pi$  eklenerek ya da çıkarılarak bu süreksizlik ortadan kaldırılabilir. Bu işlem bilgisayar programında bulunan *unwrap* komutuyla gerçekleştirilebilir (Kocahan ve ark. 2014, Özder ve ark. 2007).



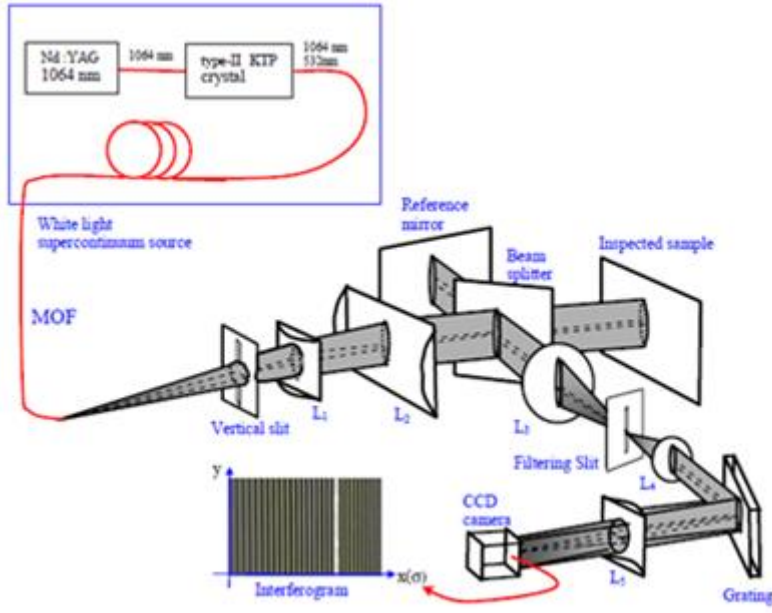
#### 4. IZGARA YANSITMA TEKNİĞİ

Genel olarak ızgara yansıtma tekniğinin temelinde, cismin üzerine ya bilgisayar programıyla oluşturulan ızgara deseni yansıtılır ya da deney düzeneğinde ızgara deseni oluşturularak cismin üzerine yansıtılır. Cismin üzerine düşürülen ızgara deseninde cismin yüksekliğinden kaynaklı olarak eğrilmeler meydana gelir. Bu görüntü bir önceki bölümde açıklanan analiz yöntemleriyle analiz edilerek üç boyutlu yüzey profili oluşturur.

Izgara yansıtma tekniği ile profil belirleme yönteminde temel deney düzeneği için çapraz optik eksenli geometri ve paralel optik eksenli geometri olmak üzere iki farklı geometri vardır. Paralel optik eksenli geometride, ışık kaynağı ve kullanılan kamera aynı düzlemedir ve optik eksenler paraleldir. Bu düzenek her ne kadar kullanışlı olsa da cismin, kameranın görüş açısına girmesi için çok uzağa yerleştirilmesi gerekir. Çapraz optik eksenli geometride de projektör ve kamera yine aynı düzlemedir. Fakat bunların optik eksenleri hedef cismin orta noktasına yakın bir yerde kesişirler (Takeda ve Mutoh 1983).

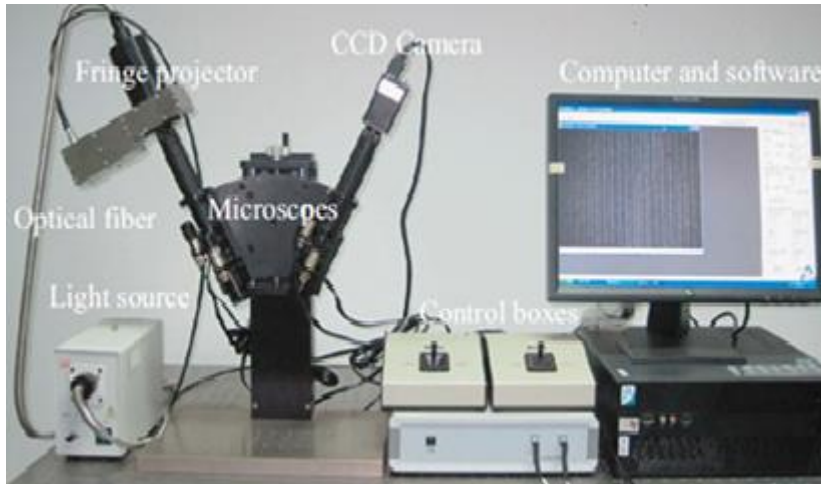
Cisme temas etmeden yapılan ızgara yansıtma tekniği ile mikrometre boyutunda ölçüm yapmak için birçok farklı deney kurulumu vardır. 2001 yılında küçük cisimlerin üç boyutlu (3D) ölçümleri için projeksiyon birimi olarak LCD projektör ve mikroskop, görüntü analiz birimi olarak da faz basamaklama yöntemi kullanılmıştır (Quan ve ark. 2001). Izgara yansıtma ile profil belirleme yöntemiyle mikrometre boyutunda ölçüm yapabilmek için, ızgara deseni, çeşitli interferometrik kurulumlarla ya da farklı ışık kaynakları ile elde edilebilmektedir. Bunlardan bazıları şöyle sıralanabilir: iki ışın interferometrisi (Leonhardt 2005), çizgi-alan Fourier interferometrisi (Endove ark. 2005), beyaz ışık interferometrisi (Blunt 2006).

Izgara yansıtma tekniğinde ölçüm gücünü arttırmak için literatürde aşağıdaki şekillerde verilen düzenekler gibi, farklı deney düzenekleri önerilmiştir. Şekil 4. 1' de önerilen deney düzeneğinde özel bir beyaz ışık kaynağı kullanılmıştır (Reolon ve ark. 2006). Bu kaynak dışında sistemin geri kalanı Michelson interferometresi temel alınarak tasarlanmıştır.



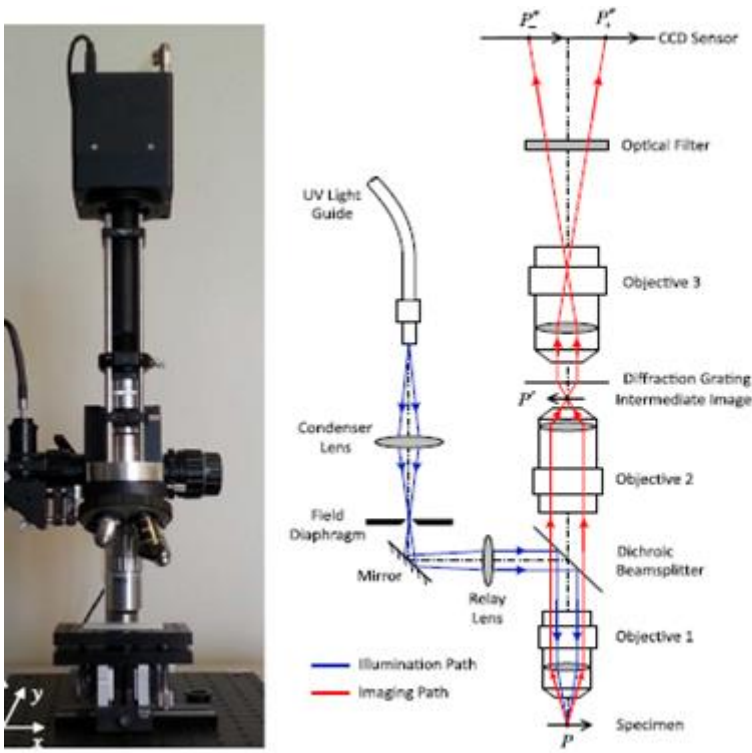
**Şekil 4. 1.** Beyaz ışık interferometresi kurulumu (white light spectral supercontinuum interferometer) (Reolon ve ark. 2006)

Başka bir çalışmada ise şekil 4.2’ de gösterildiği gibi bir ızgara yansıtma projektörü, CCD kamera ve mikroskoptan oluşan deney düzeneği ile mikrometre boyutunda 3D profil ölçümü gerçekleştirilmiştir (Shi ve ark. 2013).



**Şekil 4. 2.** Faz basamaklama yöntemi için görüntü oluşturmak üzere ızgara yansıtma projektörü, CCD kamera ve mikroskoptan oluşan deney düzeneği (Shi ve ark. 2013)

Ayrıca mikroskopla birlikte bir interferometrik kurulum ve/veya objektif kullanılarak da bu tür bir ölçüm yapmak mümkündür. Bu deney kurulumuna da şekil 4. 3' de yer verilmiştir (Dong ve Lu 2012; Ha, Choi, ve Lee 2008, C.-C. Lai ve Hsu 2007, Xia ve ark. 2014, Zwemer ve ark. 2006).

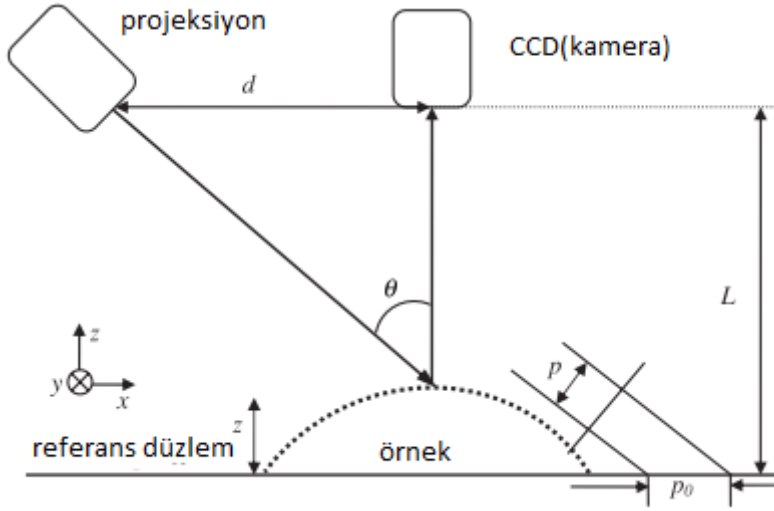


Şekil 4.3. 3D profil ve yer değiştirme ölçümü için kurulan optik mikroskop (Xia ve ark. 2014)

Beyaz ışık interferometresi de bu prensiple çalışmaktadır (Thian ve ark. 2007). Bhaduri ve Pham tarafından yapılan çalışmalarda, beyaz ışık mikroskopu ve Mach Zehnder İnterferometresi birleştirilerek BKFM (Beyaz Işık Faz Kırınım Mikroskopisi) ölçüm sistemi ile kan hücrelerinin yüzey ölçümü denenmiştir (Bhaduri ve ark. 2012, Pham ve ark. 2013). Burada kullandıkları örnek sabit değil, hareketlidir. Örneğin görüntülenmesi ve yeterince hızlı bir fotoğraf makinesi ile bir fotoğrafının çekilmesi BKFM ile mümkündür. Izgara yansıtma tekniği ile sabit (tarama olmaksızın) anlık alınacak bir cisim görüntüsü ve bir referans görüntü, örnek cismin yüksekliğinin hesaplanması için yeterlidir (Yaqoob ve ark. 2011).

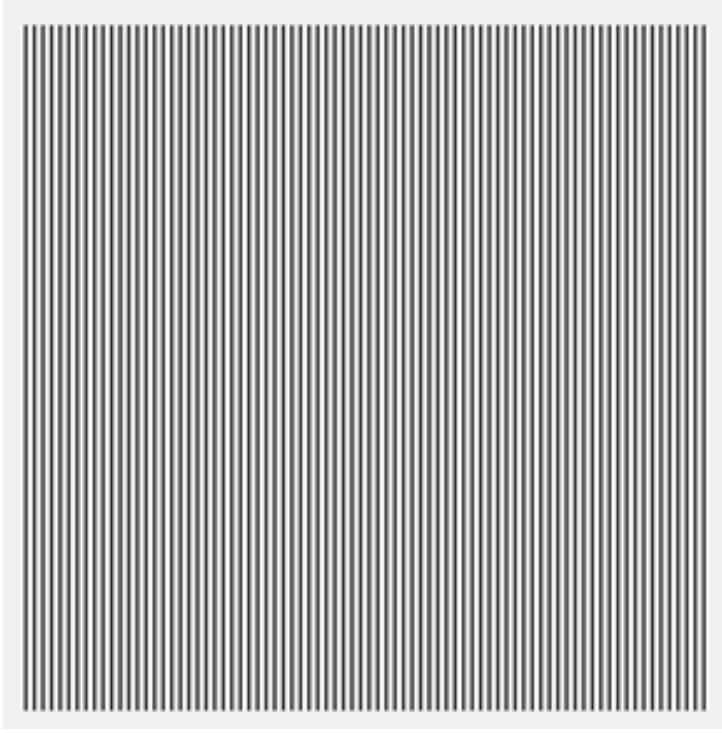
#### 4.1 Santimetre ve Milimetre Ölçeğinde Cisimlerin Ölçümü İçin Izgara Yansıtma Sistemi

Santimetre ve milimetre ölçeğinde cisimlerin ölçümü için kullanılan deney düzeneği, çapraz optik eksenli geometri kullanılarak ızgara yansıtma sistemi temel alınarak şekil 4. 4' de şematik olarak gösterilmiştir.



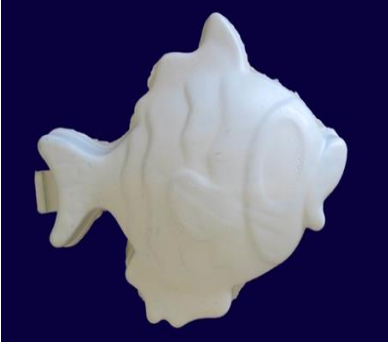
Şekil 4.4. Kurulan temel ızgara yansıtma deney düzeneğinin şematik gösterimi

Deney düzeneğinde kullanılan projektör (Sharp XGA XR-10X) 1024x768 piksel çözünürlüğündedir. CCD kamera ise CANON - 400D, 10 mega piksel maksimum çözünürlüğe sahiptir. Bilgisayar programında şekil 4. 5' de sinüzoidal ızgara deseni oluşturulmuştur. Çalışmada, kamera ile referans düzlem arası uzaklık  $L = 146\text{cm}$ , kamera-projektör arası uzaklık  $d = 17\text{cm}$  ve ızgara periyodu  $p_0 = 1/f_0 = 4,34\text{mm}$  olarak ölçülmüştür.

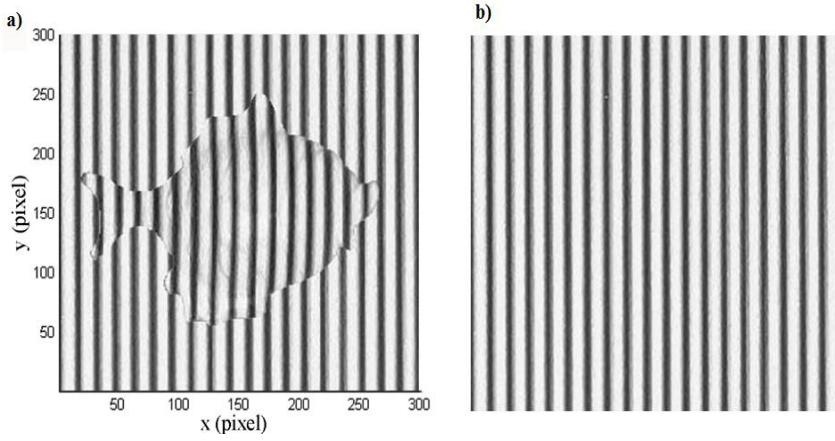


**Şekil 4. 5.** Bilgisayar programıyla çizdirilen ızgara sinyalinin şekli

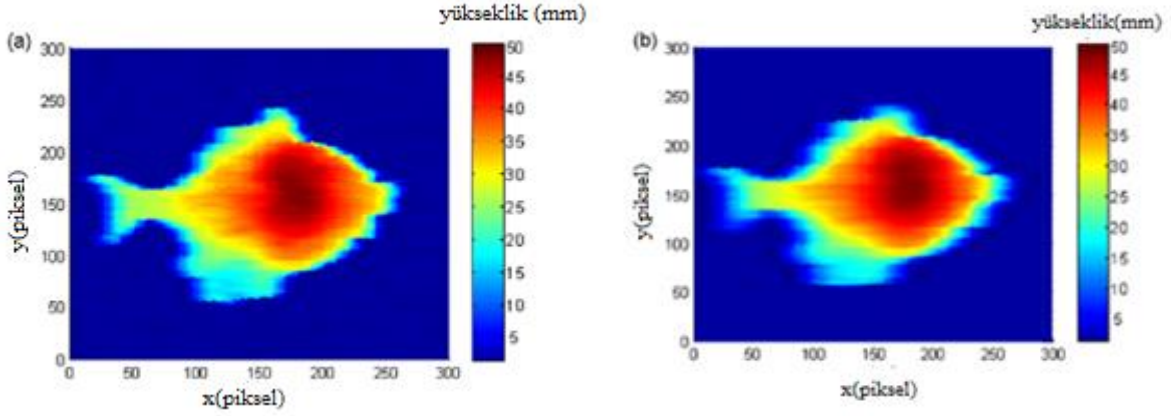
Izgara yansıtma tekniğinde kullanılan ızgara deseninin bir satırını ( $y$ -piksellerini) gösteren,  $x$  yönünde değişen tek boyutlu ızgara sinyalini denklem 1.3' de tanımlamıştır (Afifi ve ark. 2002). Bilgisayar programın da oluşturulan ızgara deseni cismin üstüne yansıtılır. Referans düzlemin merkezine odaklanan CCD kamera ile RGB formatında ilk görüntü alınır. Daha sonra, referans düzlemin merkezine yerleştirilen cismin görüntüsü, yine RGB formatında alınarak kameranın hafızasına kaydedilir. Cismin yüksekliğinden dolayı ızgara deseninde eğrilmeler meydana gelir. Elde edilen bu iki görüntü bilgisayara aktarılarak ve siyah beyaz görüntüye dönüştürülerek dönüşüm algoritmalarında analiz için hazırlanır. Deney sisteminden elde edilen cisim ve referans görüntüleri şekil 4. 6 ve şekil 4. 7 (a), (b) 'de verilmiştir (Kocahan ve ark. 2014).



Şekil 4. 6. Deney de kullanılan örnek cisim



Şekil 4. 7. a) Cismin yüksekliğinden dolayı cisimdeki eğrilmeler b) cismin referans görüntüsü

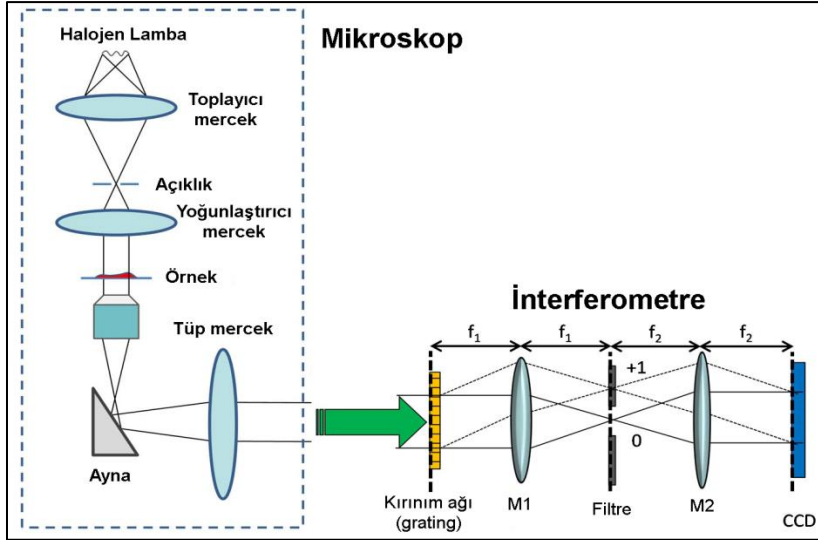


Şekil 4.8. Genelleştirilmiş Morse dalgacı kullanılarak balık rölyefi için ulaşılan 3D profil a)  $(\gamma, \beta) = (3,3)$  aldığımızda b)  $(\gamma, \beta) = (3,10)$

#### 4.2 Mikrometre Ölçeğinde Cisimlerin Ölçümü İçin Kırınım Faz Mikroskopisi

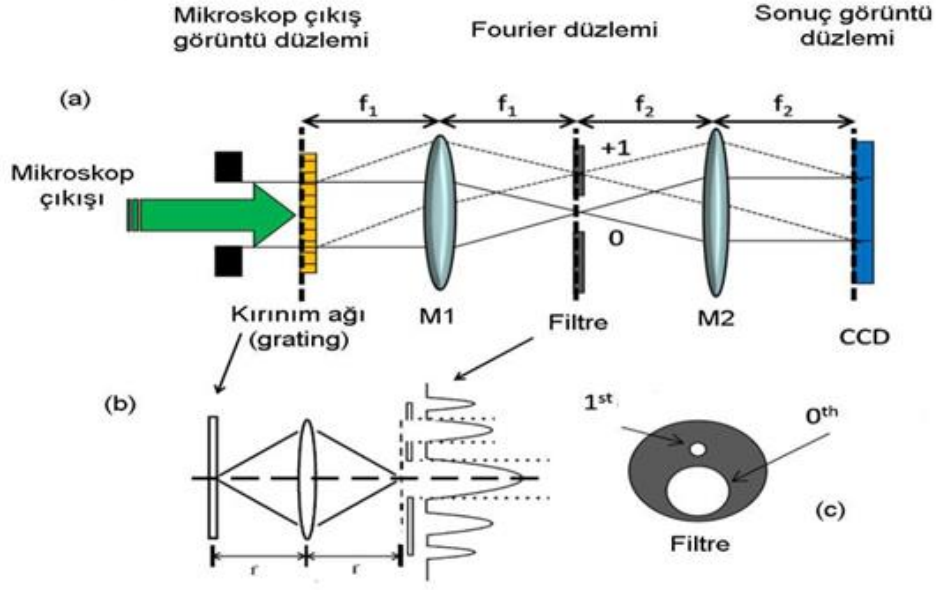
Mikrometre boyutunda bir örneğin dinamik 3D yapıda profilini oluşturmak için öncelikle üzerine ızgara deseni yansıtılmış örnek görüntüsü ve referans görüntü elde etmek gerekir. Bu görüntüleri elde etmek için bu çalışmada, Beyaz ışık kırınım faz mikroskopisi

(BKFM) (Pham ve ark. 2013) adı verilen ölçüm sistemi inverted mikroskop, Mach–Zehnder benzeri bir interferometre ve CCD kullanılmıştır. Halojen ışığa sahip Axio Observer A1, Zeiss inverted mikroskop ve Hamamatsu ORCA Flash CCD kamera kullanılmıştır. Şekil 4.9’ da BKFM düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.



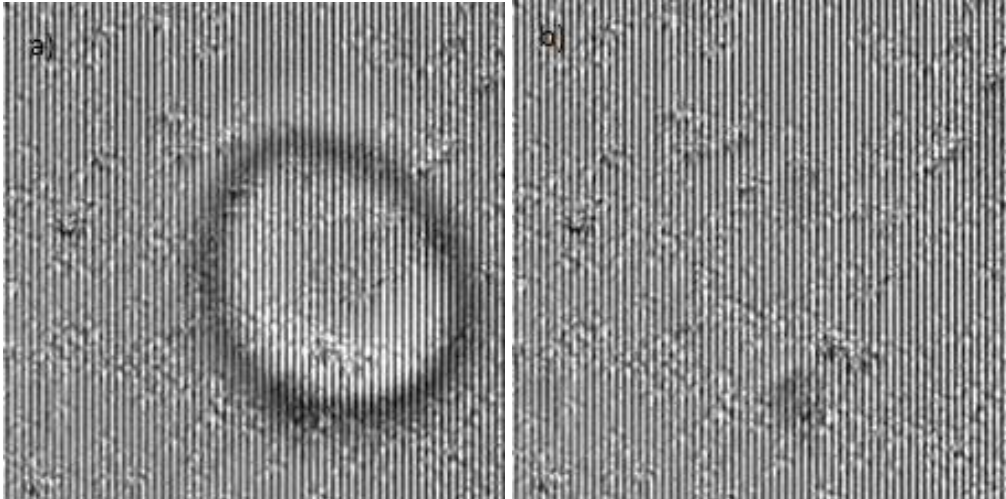
**Şekil 4.9.** Beyaz ışık faz kırınım mikroskopisi (BKFM) kurulumu (Pham ve ark. 2013)

Şekil 4. 9’ de verilen interferometre kurulumunun daha ayrıntılı haline şekil 4.10’ de yer verilmiştir. Burada kırınım ağından geçen görüntünün filtrelenmesinin açıkça görülmektedir. Kırınım ağından oluşan görüntü ilk olarak M1 merceğine ulaşır. Bu mercek ile odaklanarak filtre üzerine düşürülür. Merkez +1 ya da -1 görüntü filtreden geçirilir. Daha sonra M2 merceğine gelen iki görüntü burada da CCD üzerinde çakıştırılarak, görüntü üzerinde girişim deseni oluşumu sağlanmış olur.



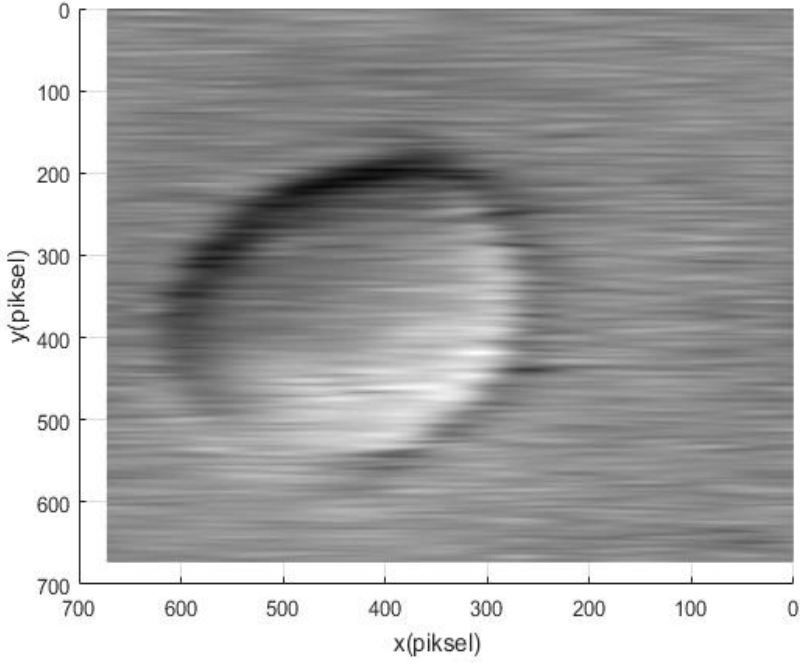
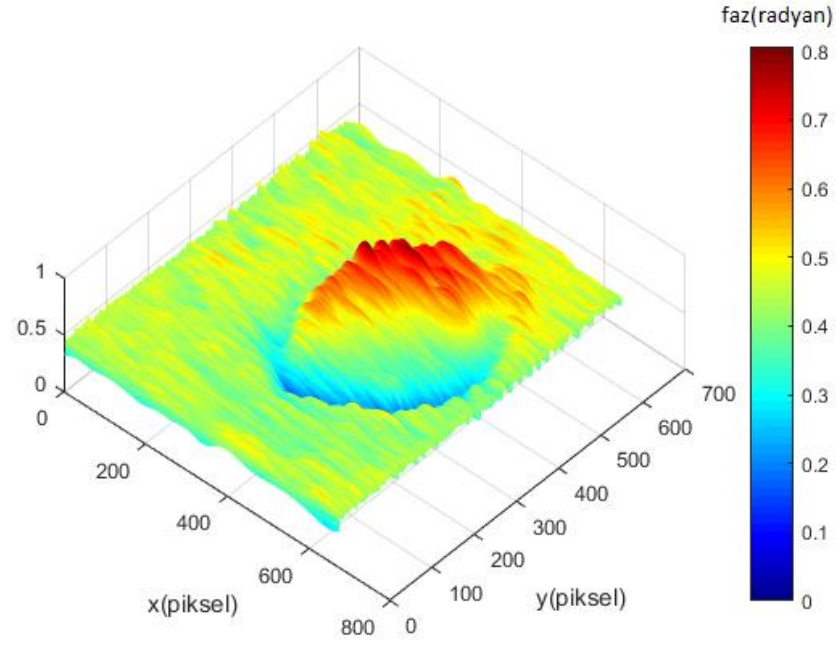
**Şekil 4.10.** (a) İnterferometre kurulumunun şeması; (b) Fourier düzlemine geçen görüntünün karakteri ve filtrenin genel görünümü; (c) kullanılan olan filtrenin genel görünümü

Çeşitli örneklerle yapılan ölçümler, ölçülen cisimlere göre 20X veya 40X objektif kullanılarak elde edilip SDD ile analiz edilmiştir. Örnek olarak kan hücresi ile yapılan deney sonucunda elde edilen kan hücresi görüntüleri şekil 4.11 a ve b ' de gösterilmiştir (Kocahan ve ark. 2017).



**Şekil 4.11.** BKFM sisteminden elde edilen ve CCD' den gözlenen örnek bir girişim deseni a) örnekteki eğrilmeler b) referans görüntüsü





**Şekil 4.12.** Deney kurulumundan elde edilen kan hücresinin genelleştirilmiş morse dalgacığı ile analiz edilerek elde edilen üç boyutlu yüzey profili

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada gerçekleştirilmesi hedeflenen iki deney kurulumu mevcuttur. İlki, klasik ızgara yansıtma tekniği olan yüzey profili belirleme yöntemidir. Bu yöntemde santimetre (cm) ve milimetre(mm) boyutundaki cisimler için ölçümler alınmış ve istenilen sonuçlar elde edilerek tamamlanmıştır. Bu sonuçların istenildiği gibi elde edilebilmesiyle ikinci deney kurulumu olan Beyaz Işık Kırınım Faz Mikroskopisi (BKFM) kurulumu gerçekleştirilmiş ve bu çalışma mikrometre boyutunda ölçüm için kullanılacak olan Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı (GMD) ile bir boyutlu Sürekli Dalgacık Dönüşümü (1D SDD) algoritmasının faz hesaplamak için geliştirilmesi tamamlanmıştır.

### 5.1 Izgara Yansıtma Tekniği Kullanılarak Milimetre mertebesinde Cisimlerin İncelenmesi

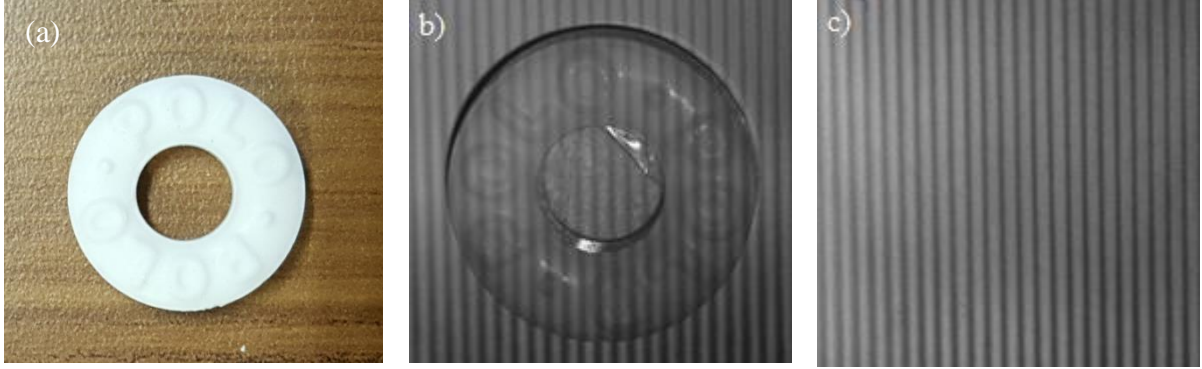
Milimetre boyutunda cisimlerin ölçümü için kurulan deney düzeneğini şekil 5. 1' de gösterilmektedir. Bu deney kurulumunda kullanılan projeksiyon (BENQ MP512) 600x800 piksel çözünürlüğündedir. mm boyutunda ölçüm yapılacağı için projeksiyonun önünde bulunan ıraksak mercek, 63 mm odak uzaklığı bulunan yakınsak mercek ile değiştirilmiştir. CCD kamera, CANON - ED400D, 10.1 mega piksel maksimum çözünürlüğe sahiptir.



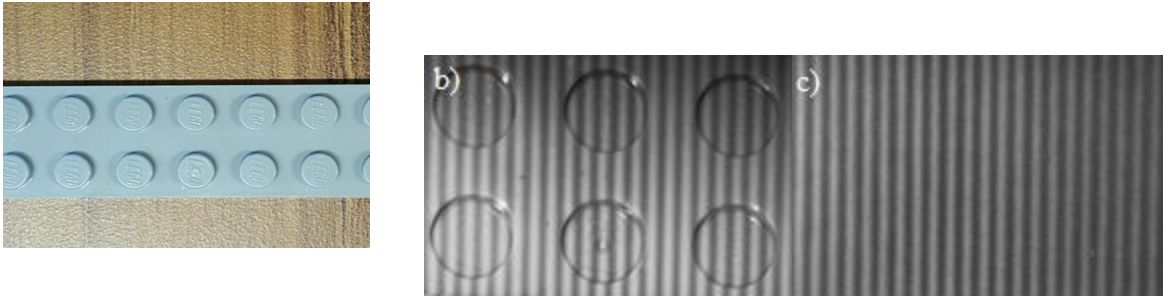
Şekil 5. 1. Milimetre boyutunda bir cismin ölçümü için kurulan düzeneğin görüntüsü

Ölçümünü almak üzere polo şeker ve oyuncak lego kullanılmıştır. Bu cisimlerin görüntüleri, üzerlerine ızgara deseni yansıtılmış halleri ve referanslarının görüntüleri sırasıyla şekil 5. 2 ve şekil 5. 3' de verilmiştir. Yapılan deneyde, kamera ile referans düzlem arası

uzaklık  $L = 44$  cm, kamera- projektör arası uzaklık  $d = 6$  cm ve ızgara periyodu  $p_0 = 1$  mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5. 2.** a) Polo şekerin görüntüsü b) Polo şekerine x yönünde tek taşıyıcı frekansla ( $f_0 = 0,2$  cm) oluşturulmuş ızgara deseninin yansıtılmasıyla elde edilen görüntü ve c) referansı



**Şekil 5. 3.** a) Legonun görüntüsü b) Lego üzerine x yönünde tek taşıyıcı frekansla ( $f_0 = 0,2$  mm) oluşturulmuş ızgara deseninin yansıtılmasıyla elde edilen görüntü ve c) referansı

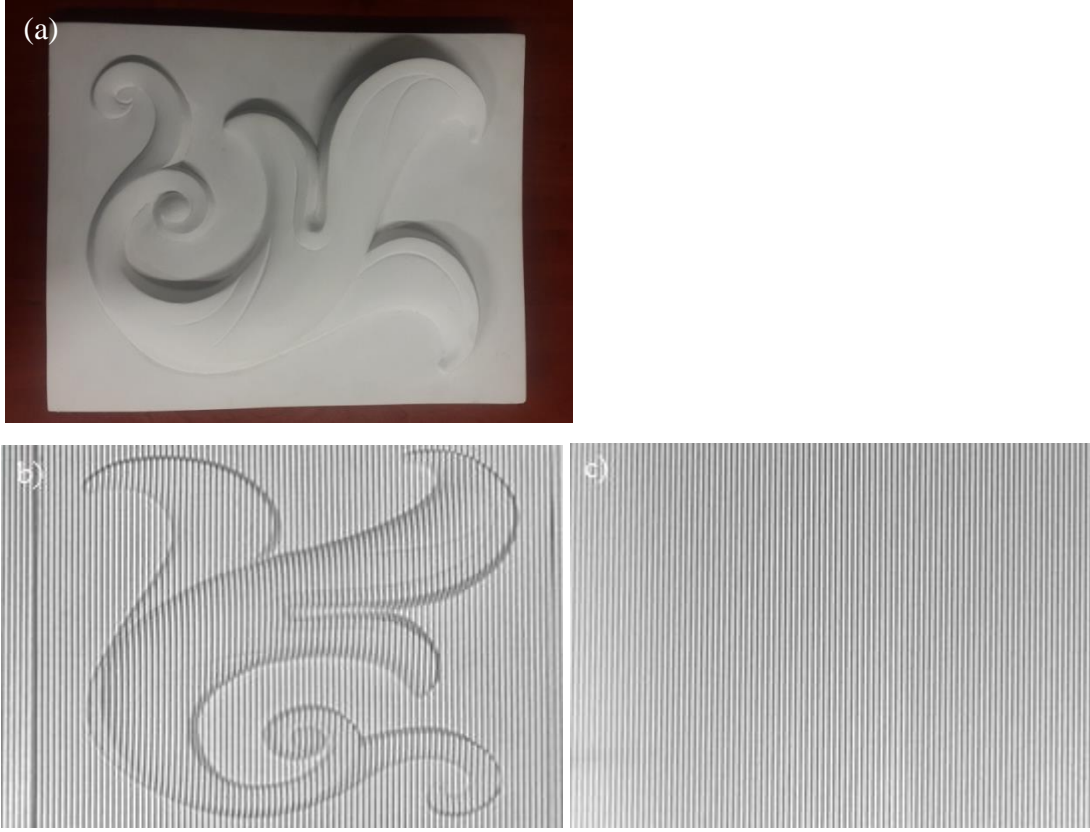
Bu deney düzeneği kurularak alınan görüntüler, oluşturulan deney düzeneğinde eksikliklerden dolayı çözüme ulaşamamıştır. Görüntülerin netliği sağlanamadığı ve ızgara deseninin frekansı arttırılamadığı için çözüm elde etme aşamasında sıkıntılar yaşanmıştır. Kullanılan BENQ projeksiyonun çözünürlüğü düşük kalmıştır. Ayrıca kullanılan fotoğraf makinası deney kurulumuna uygun değildi. Projeksiyon sökülerek deney kurulumuna uyumlu hale getirilmeye çalışıldı. Netliği sağlayabilmek için ise 63mm ve 150 mm lik lensler de denenerek çözüm sağlanmaya çalışılmıştır. Tüm bu yöntemler denenmesine rağmen çözünürlük sorununu ve görüntülerdeki parlamalar engellenemediği için sadece görüntüler oluşturulabildi ancak çözümlerini elde edilemedi.

## 5.2 Izgara Yansıtma Tekniği Kullanılarak Santimetre Mertebesinde Cisimlerin İncelenmesi



Şekil 5. 4. Çapraz optik eksenli geometride kurulan deney düzeneğinin kurulumu

Temel ızgara yansıtma deney düzeneği şekil 5. 4' de gösterildiği gibi ayarlanmış ve cisimlerin görüntüleri alınmıştır. Ölçümünü almak üzere santimetre boyutunda bir cisim olan alçıdan rölyef çiçek panosu kullanılmıştır. Ölçümü alırken önce ızgara deseninin cisim yokken görüntüsü alındı. Daha sonra rölyef çiçek panosunu koyarak ikinci görüntü CANON kamera yardımıyla kaydedildi. Burada kullanılan cisimlerin boyutları daha büyük olduğu için ölçüm veya çözüm kısmında problem yaşanmadı. Çekilen görüntüler daha sonra kullanılan bilgisayar programlarıyla, 1D SDD analiz yöntemi ve Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı analiz dalgacığı olarak kullanılarak işlenmiştir. Şekil 5. 5'de gösterilen boyutları 30-40 cm olan çiçek rölyefi örnek fotoğrafı, üzerine ızgara deseni yansıtılmış hali ve referans fotoğrafı verilmiştir.

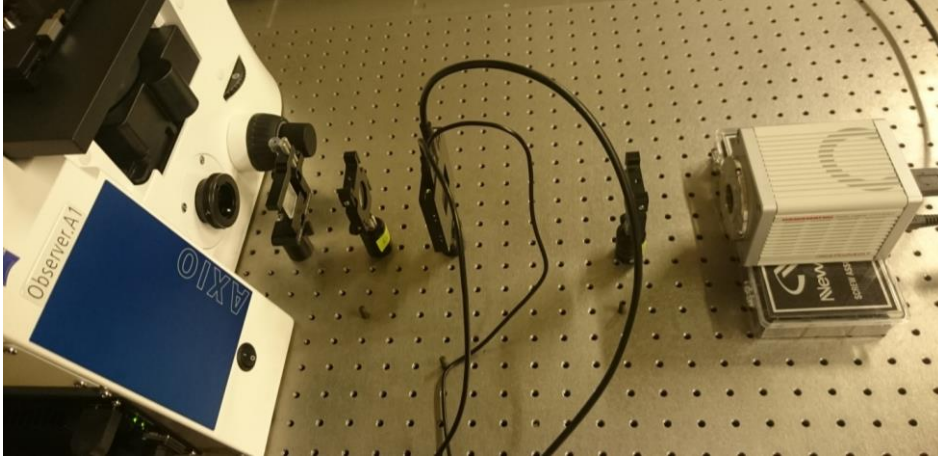


**Şekil 5.** a) Çiçek rölyefinin görüntüsü b) Çiçek rölyefi üzerine x yönünde tek taşıyıcı frekansla ( $f_0 = 0,2$ ) oluşturulmuş ızgara deseninin yansıtılmasıyla elde edilen görüntü ve c) referansı

Burada ızgara yansıtma tekniği kullanılarak santimetre ve milimetre mertebesinde cisimlerin üç boyutlu profillerine dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Milimetre boyutunda ölçüm alınan cisimler de sonuçlara erişilemedi fakat santimetre boyutunda alınan ölçümlerin sonuçları istenilen şekilde çıkmış ve altıncı bölümde verilmiştir.

### **5.3 Izgara Yansıtma Tekniği Kullanılarak Mikrometre Mertebesinde Cisimlerin İncelenmesi**

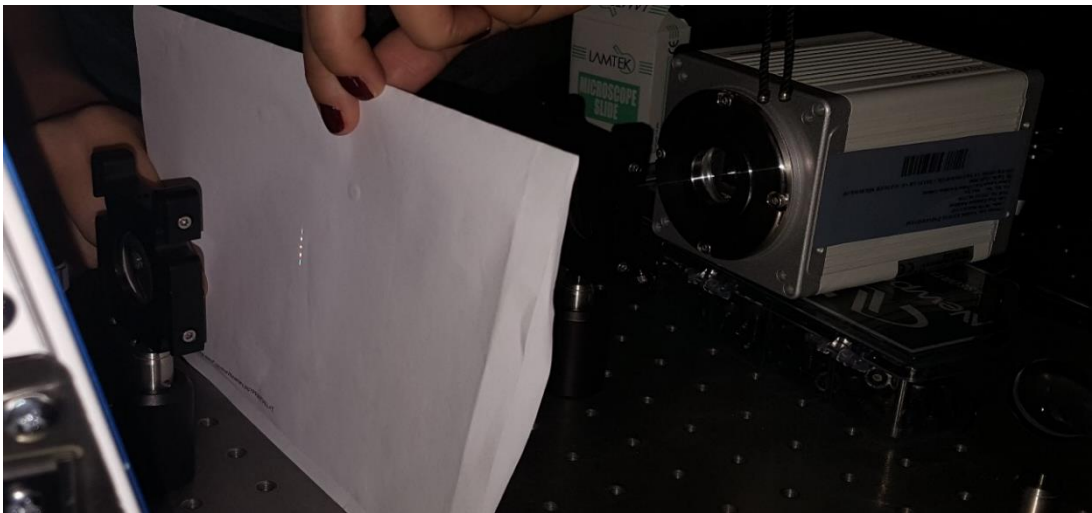
Santimetre ve milimetre ölçeğinde cisimler için yapılan temel ızgara yansıtma düzeneği çalışmalarına ek olarak denenen üç boyutlu yüzey profili oluşturma işlemi için beyaz ışık kırınım mikroskobu kurulumu şekil 5. 6' da gösterilmiştir.



**Şekil 5.6** Beyaz ışık faz kırınım mikroskopisi (BKFM) kurulumu

Bu düzeneğin kurulumunda ilk olarak, örnek için iyi bir görüntü elde etmek üzere mikroskop odaklanarak ayarlanır. Farklı örnekler için uygun objektif seçilmelidir. Mikroskopta beyaz ışık tercih edilmiştir ve minimum olacak şekilde ayarlanır. Eğer mikroskoptan gelen ışık miktarı yüksek ise bu görüntüdeki gürültüyü artırabilmektedir.

Belirlenen bölgenin görüntüsü inverted mikroskobun alt ucundan çıkarak interferometreye ulaşır. İnterferometrenin ilk elemanı 25 mm<sup>2</sup> alana sahip, yüzeyinde 110 çizgi/mm bulunan geçirgen bir kırınım ağıdır (grating). Bu kırınım ağından geçen bir görüntü, kırınım ağının arkasında kırınım deseni oluşturur. Bu kırınım deseni 63 mm odak uzaklığına sahip yakınsak M1 merceği ile odaklandığında şekil 5. 7’ de verildiği gibi elde edilmiştir.



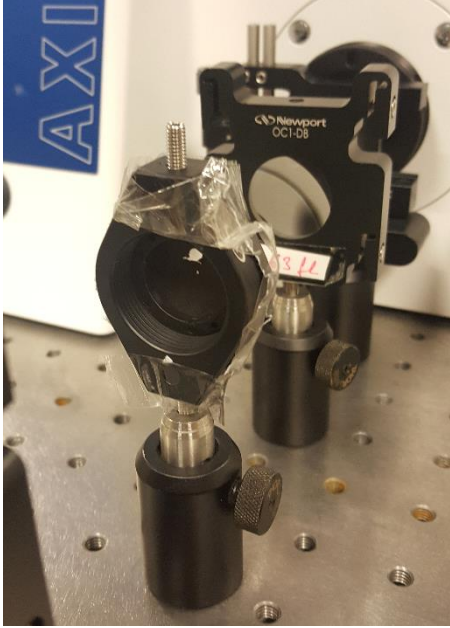
**Şekil 5. 7.** Mikroskoptan alınan görüntü ile oluşan kırınım deseni

Mikroskoptan çıkan bir görüntü kırınım ağından geçtikten sonra şekil 5. 7' deki gibi 5 adet görüntü bileşeni oluşturur. Farklı açılarda oluşturulan bu kopya görüntüler, M1 merceği ile odaklanarak filtre (pinhole) üzerine düşürülür. Farklı açılardaki bileşenlerden 0. mertebe (merkez) ile +1. mertebedeki (veya -1. mertebedeki) bileşenleri filtreden geçirilip diğer bileşen görüntülerin CCD' ye ulaşması engellenir.



**Şekil 5. 8.** Filtreleme işlemi için kırınım deseninin filtre (pinhole) üzerine düşürülmesi

Filtreleme işlemi bu çalışmada büyük önem taşır. Laboratuvar da tasarlanan bir filtre (pinhole, aperture) kullanılarak bu sorun aşılmış ve ölçümler yapılmıştır. Bu işlem için tasarlanan filtre (pinhole) şekil 5. 9' de ki gibidir. 0. mertebedeki ışın için  $200 \mu m$  yarıçapında dairesel kısım kullanılarak filtre uygulanır. Çünkü 0. mertebe sadece referans ışınıdır. +1. mertebenin tamamının geçmesini sağlayacak şekilde  $5 \times 2 mm^2$  boyutunda dikdörtgen kısım kullanılır (Bhaduri ve ark.. 2014).



**Şekil 5. 9.** Laboratuvar ortamında hazırlanan filtre

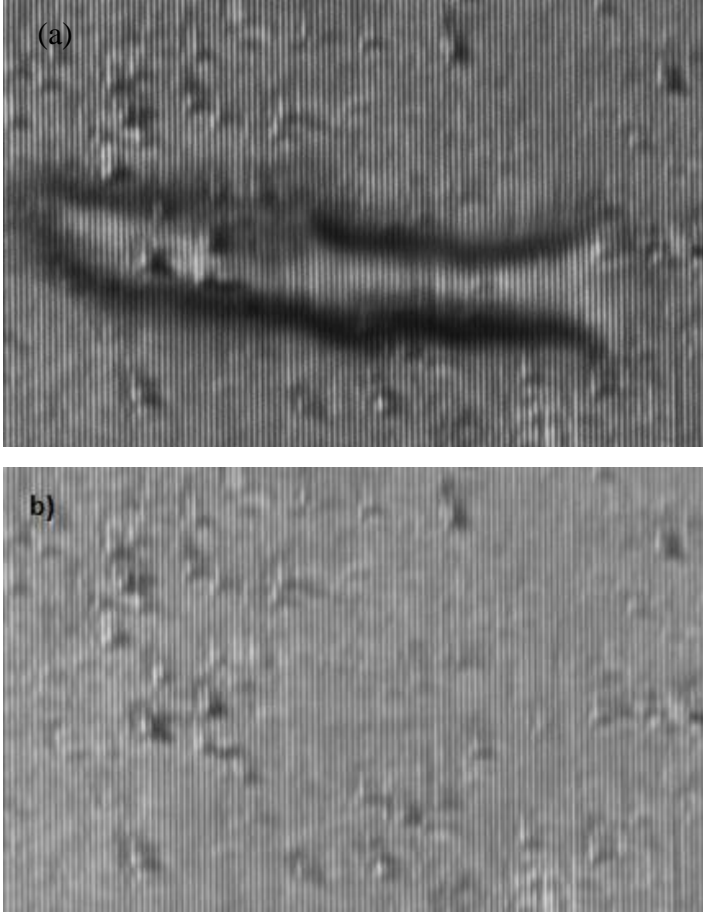
Filtreden geçmesine izin verilen 0. ve 1. bileşenler şekil 5. 6’ da ki gibi 150 mm odak uzaklığına sahip yakınsak M2 merceği ile CCD üzerinde üst üste bindirilerek interferogram (girişim deseni) elde edilir. Elde edilen girişim deseni cisim üzerinde eğrilmeler meydana getirdiği için yükseklik bilgisine ulaşabilmemizi sağlar.

BKFM deney düzeneği ile elde edilen görüntüdeki yükseklik bilgisini faz terimi taşır. 1D SDD yöntemiyle farklı analiz dalgacıkları kullanılarak faz hesaplamak mümkündür. Böyle bir görüntü aslında dalga denklemi formunda yazılabilen bir optik sinyaldir. Bu denklemin fazı, ızgara desenindeki eğrilmelere karşılık gelir. Dalgacık dönüşümü en basit anlamda, bu optik sinyalin bir (dalgacık) denklemi ile çarpılıp hangi aralıkta hangi frekansın bulunduğu bilgisini elde etmek olarak tanımlanabilir. 1D SDD ile elde edilen sonuçlarda faz bilgisi bulunmaktadır. Faz bilgisi radyan biriminden cismin yüksekliğine karşılık geldiğine göre, iki boyutlu bir fotoğraftan (optik sinyalden) yükseklik hesaplanmış olur.

### **5.3.1 İnce Film Yüzey Morfolojisi İncelenmesi**

İnce filmi görüntülemek için kullanılan beyaz ışık kırınım mikroskobu deney düzeneğinde 40X büyütme kullanılmıştır. Kullanılan film, daha önce kaplama işlemi yapılmış olup Kadmiyum- sülfür (CdS) ince filmidir. CdS ince filmde bulunan birikinti incelenmiş ve şekil 5.10 a’ da bu birikintinin görüntüsü b’ de ise referans görüntüsü verilmiştir.





**Şekil 5.10.** BKFM deney kurulumundan elde edilen a) CdS ince film üzerindeki birikinti ve b) referans görüntüleri

### **5.3.2 Epitel Hücrelerin Morfolojisinin Belirlenmesi**

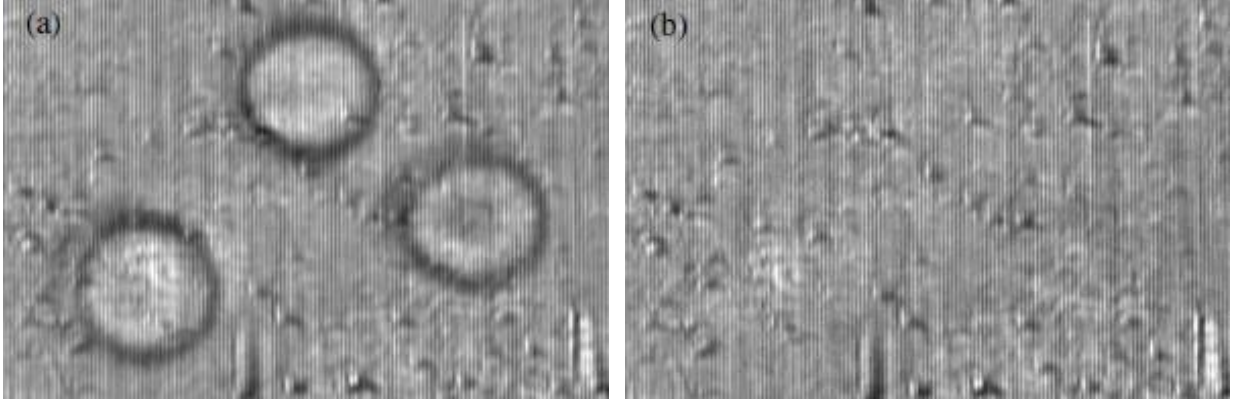
Benzer işlemler epitel doku örneğinde de yapılmıştır. Önce ağızdan çubuk yardımıyla doku örneği alınmıştır. Alınan bu doku örneği lamel üzerinde bırakılarak mikroskoba konmuştur. Şekil 5.11’ de alınan epitel doku örnekleri için iki görüntümüzde mevcuttur.



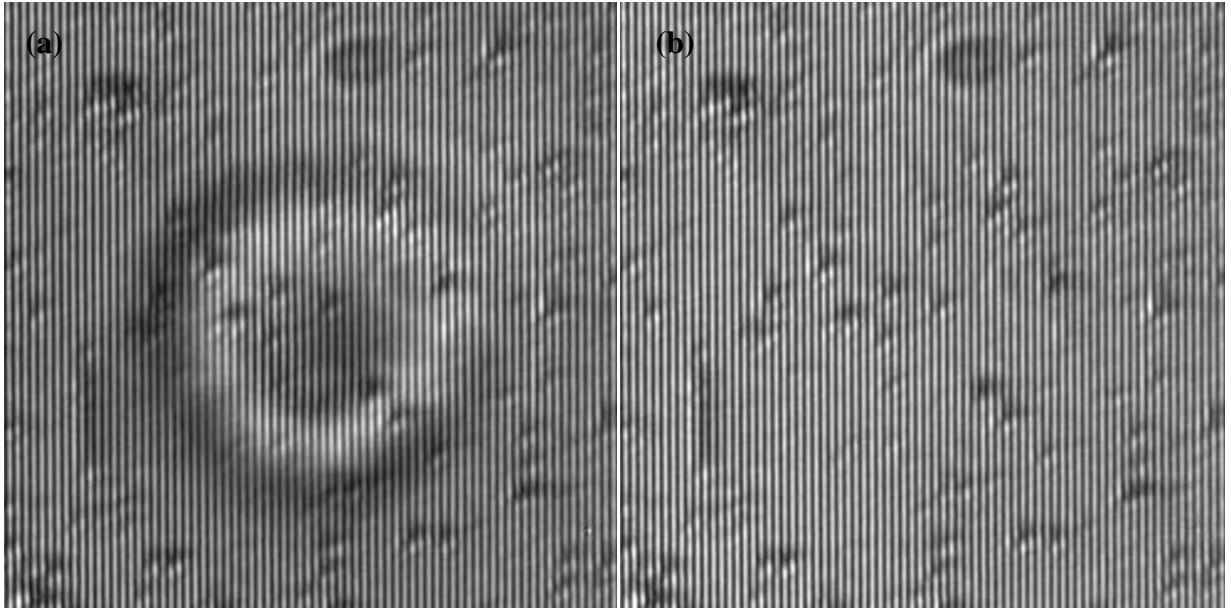
**Şekil 5.11.** a) Ağızdan alınan epitel doku örneği görüntüsü b) bu görüntünün referansı

### **5.3.3 Kırmızı Kan Hücrelerinin Morfolojisinin İncelenmesi**

Beyaz ışık faz kırınım mikroskobu kurulumu yapılarak kan hücresi örneği de incelenmiştir. Bunun için parmaktan alınana kan örneği lamele yayılarak iyi bir görüntü elde etmek üzere mikroskoba ayarlandı. Buradan elde edilen görüntüler şekil 5.12 (a) ve (b)' de gösterilmiştir. Ayrıca kan hücresini iki lamel arasına sıkıştırarak da ölçüm alınmıştır. Bu örneğin görüntülerine ise Şekil 5.13 (a) ve (b)' de yer verilmiştir.



**Şekil 5.12.** BKFM deney kurulumundan elde edilen a) kan hücresi örneğinin görüntüsü b) bu örneğin referans görüntüsü



**Şekil 5.13.** BKFM deney kurulumundan elde edilen iki lamel arasına konulan a) kan hücresi örneğinin görüntüsü b) bu örneğin referans görüntüsü

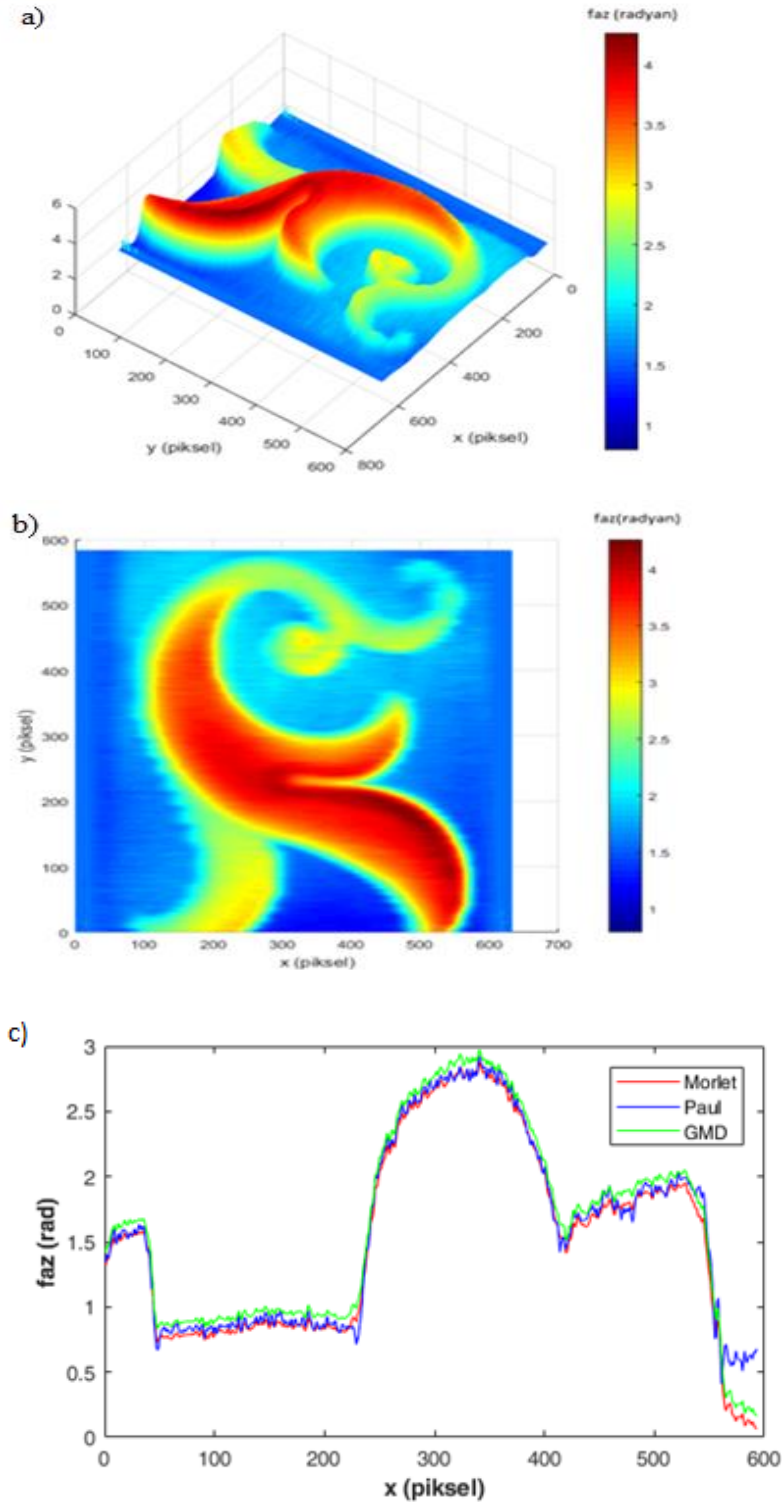
## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bölüm 5’ de gösterilen deney kurulumlarından elde edilen görüntüleri, bilgisayar programın da Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı analiz yöntemini kullanarak çözümleri elde edilmiştir.

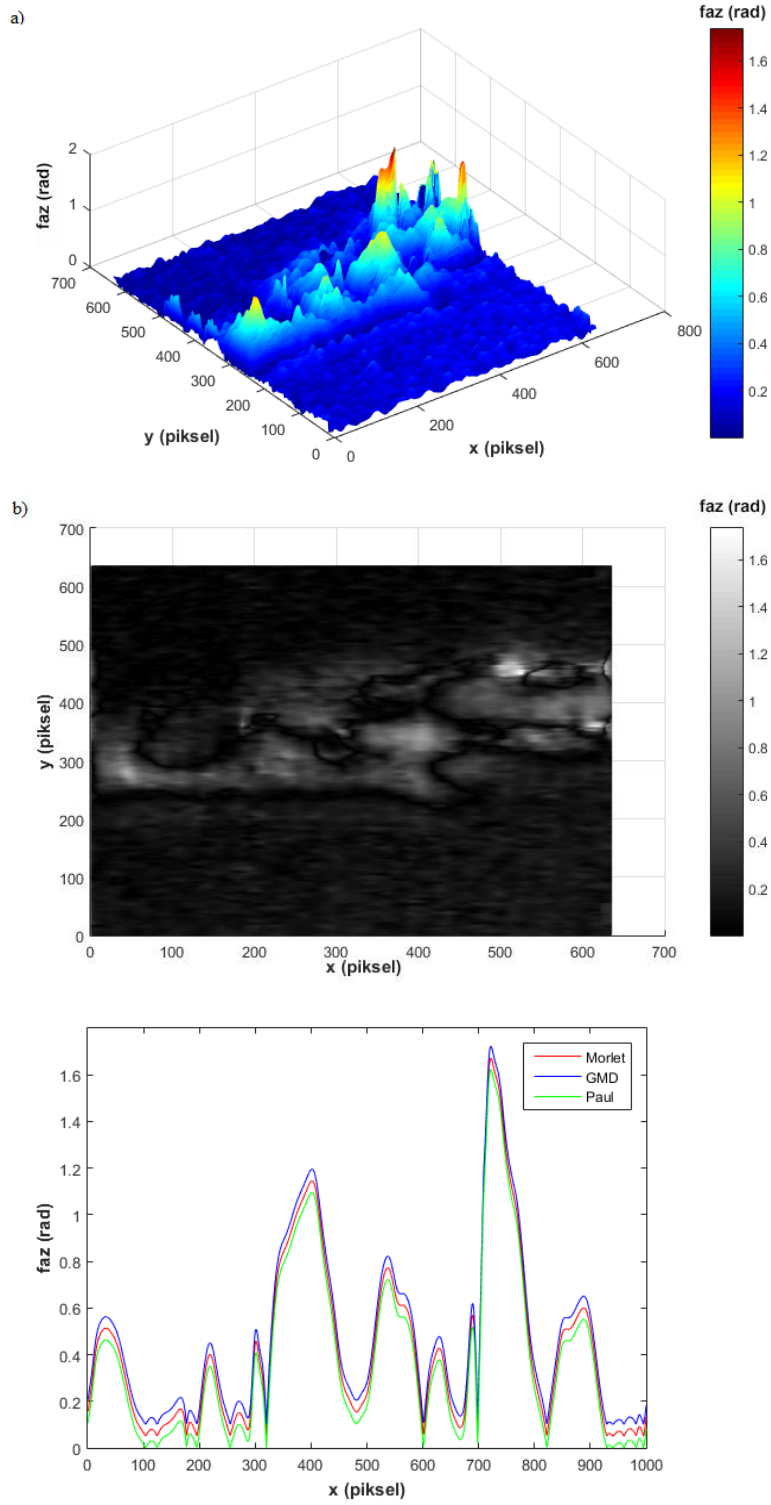
Santimetre ölçeğinde ızgara yansıtma tekniğıyle görüntüsü alınana çiçek rölyefinin, bilgisayar programın da işlenmesiyle elde edilen profili şekil 6.1 a ve b’ de verilmiştir. 1D Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı analiz birimi olarak kullanılmış ve faz dağılımı başarıyla oluşturulmuştur. Şekil 6.1 c’ de ise GMD, Morlet ve Paul dalgacıklarıyla karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.2 a ve b’ de ise Beyaz Işık Kırınım Faz Mikroskopisi ile görüntüleri alınmış olan Cds ince filminin faz dağılımı verilmiştir. İnce filmde aldığımız görüntü, üzerindeki kirliliğın görüntüsüdür. Şekil 6.2 c’ de ise GMD, Morlet ve Paul dalgacıklarıyla karşılaştırılmıştır.

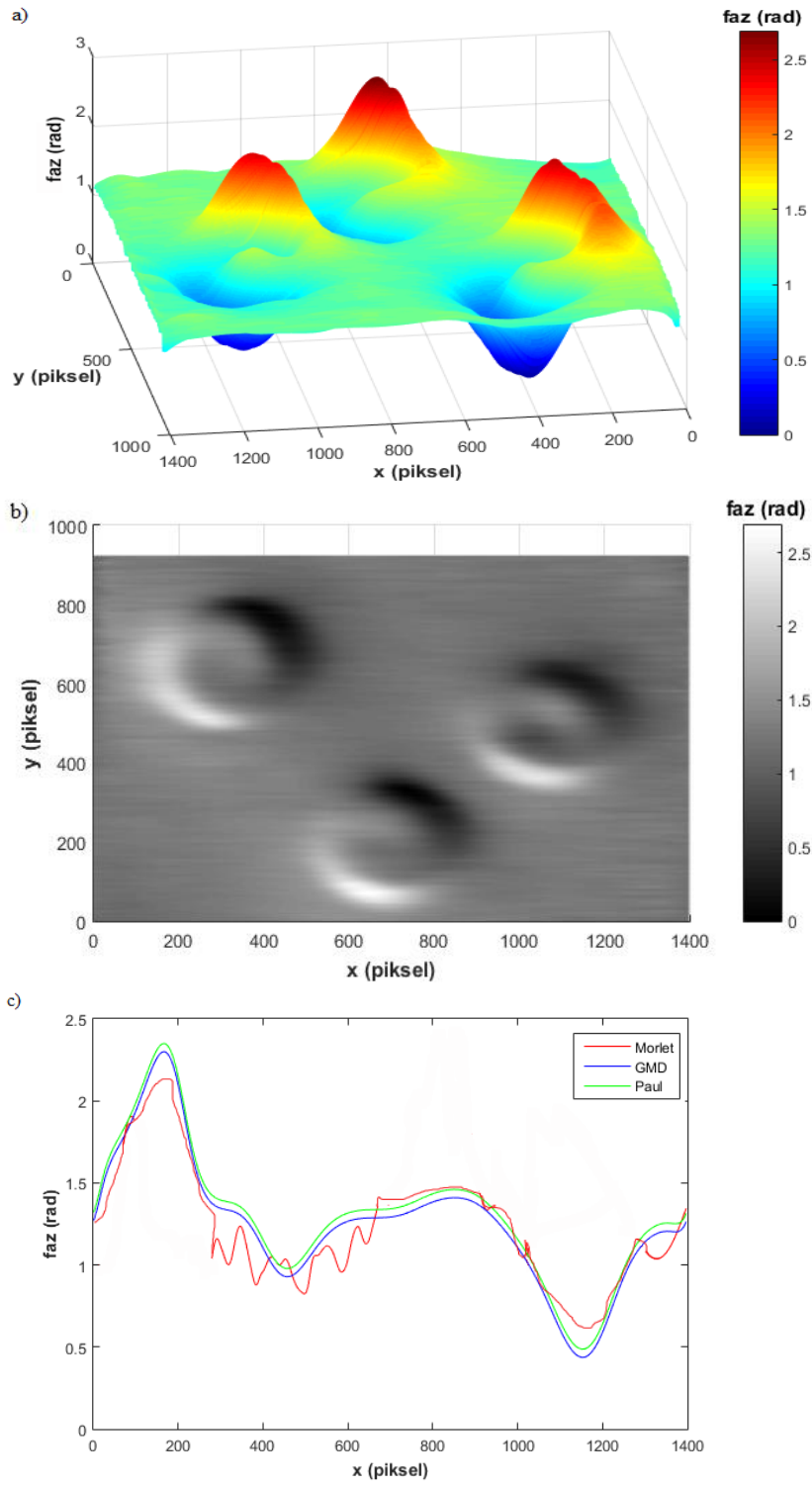
Şekil 6.3’ de ise BKFM düzeneğı ile elde edilen bir diğeri görüntü olan kan hücresi gösterilmiştir. Ayrıca şekil 6.3 c’ de GMD, Morlet ve Paul dalgacıklarıyla karşılaştırılmıştır. Burada kan hücrelerinin üç tanesinin birlikte olduğı hali gösterilmiştir. Şekil 6.3 a’ da de görüldüğü gibi kan hücrelerinin alt taraflarında sarkmalar vardır. Bu sarkmaların, Namık Kemal Üniversitesi Tıp Fakültesi Nöroloji Anabilim dalı öğretim üyesi Prof. Dr. Aysun Ünal ile yapılan kişisel görüşmede, bu kan hücrelerinin içinde bulunduğı plazmalarından kaynaklı oluşmuş sarkmalar olduğı öğrenilmiştir. Kan hücreleri plazma içinde eğik durdukları için analiz işlemi sonucu burada eğimli çıkmıştır. Gerçekte buldukları durumdur ve oluşturulan profilde açıkça görülebilmektedir. Bu bilgi ışığında kan hücrelerinin ölçümü, örnek iki lamel arasına sıkıştırılarak denenmiştir. Bu durumda bütün hücre plazma içine gömülür ve kan hücresinin tam profili şekil 6.4’ de verildiğı gibi elde edilebilir.



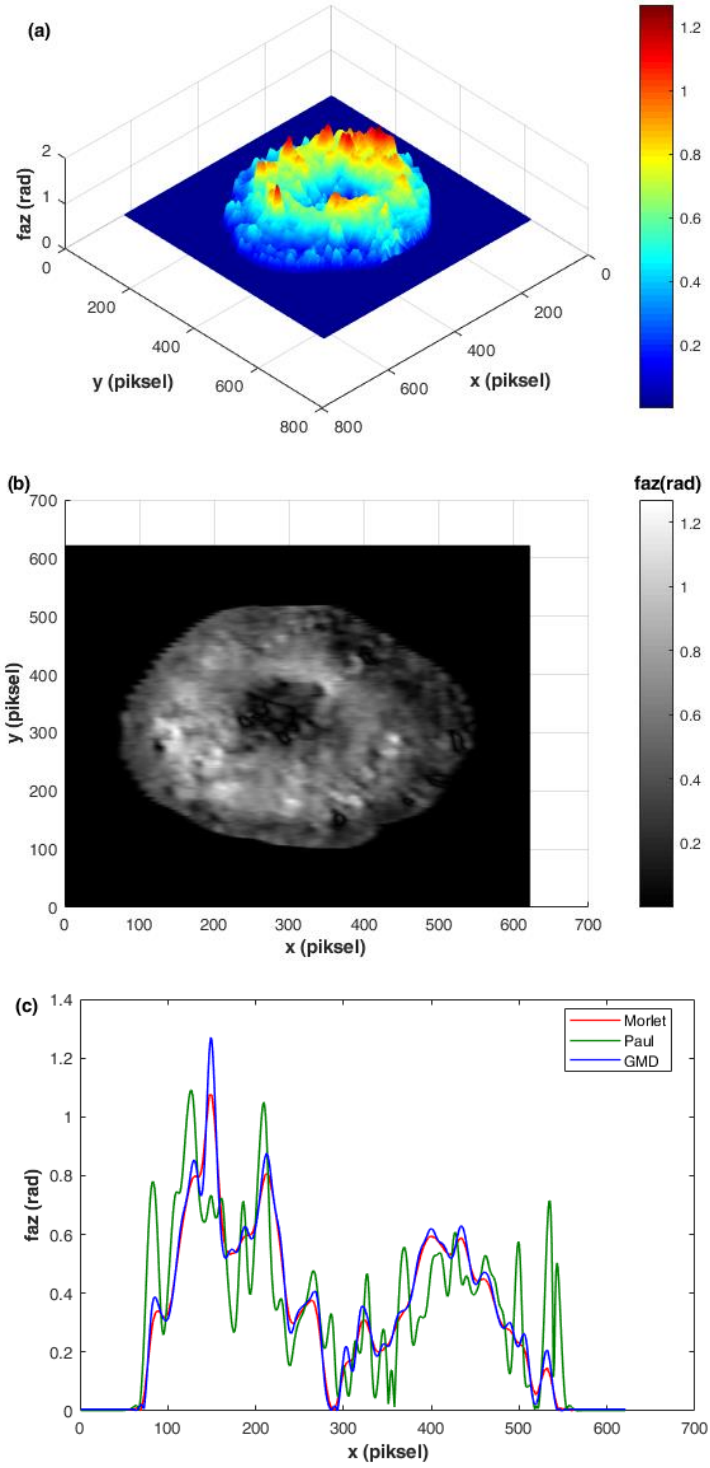
**Şekil 6.1.** Izgara yansıtma tekniğinde santimetre ölçeğinde analiz edilen çiçek rölyefinin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi; b) karşıdan görüntüsü c)  $y = 350$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (mavi), GMD (yeşil) ( $\beta = 10, \gamma = 3$ ))



**Şekil 6.2.** BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen Cds ince filmin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi; b) karşıdan görüntüsü c)  $y = 350$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (yeşil), GMD (mavi) ( $\beta = 9, \gamma = 3$ ))



**Şekil 6.3** BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen kan hücrelerinin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi b) karşıdan görüntüsü c)  $y = 600$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (yeşil), GMD (mavi) ( $\beta = 10, \gamma = 4$ ))

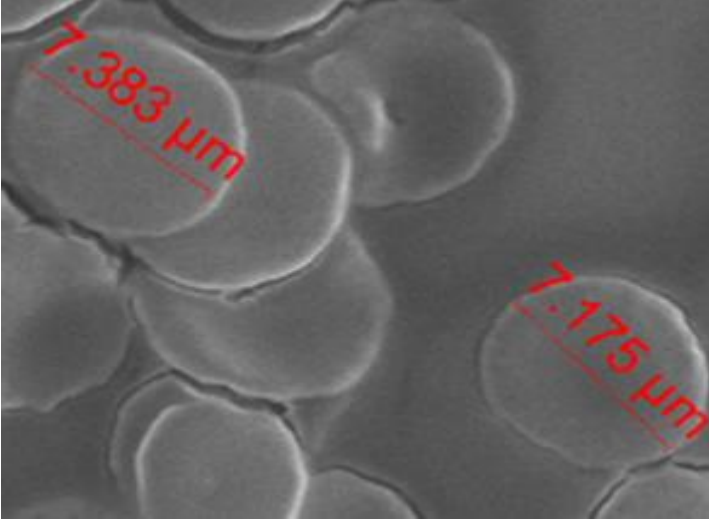


**Şekil 6.4** BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasında sıkıştırılan kan hücrelerinin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi b) karşıdan görüntüsü c)  $y = 300$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (yeşil), GMD (mavi) ( $\beta = 3, \gamma = 3$ ))

Kan hücresi ölçümleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM- scanning electron



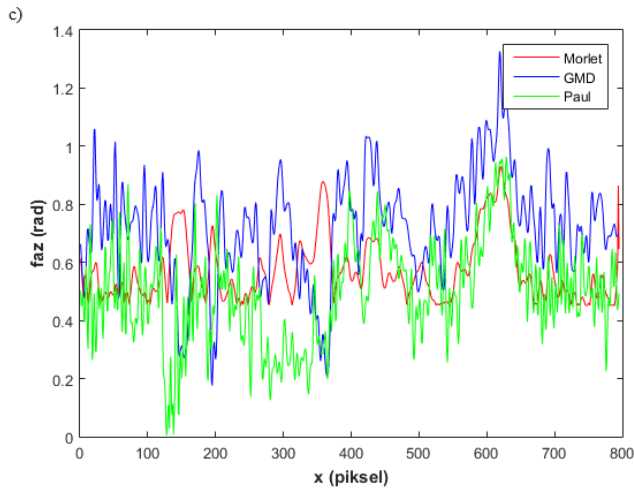
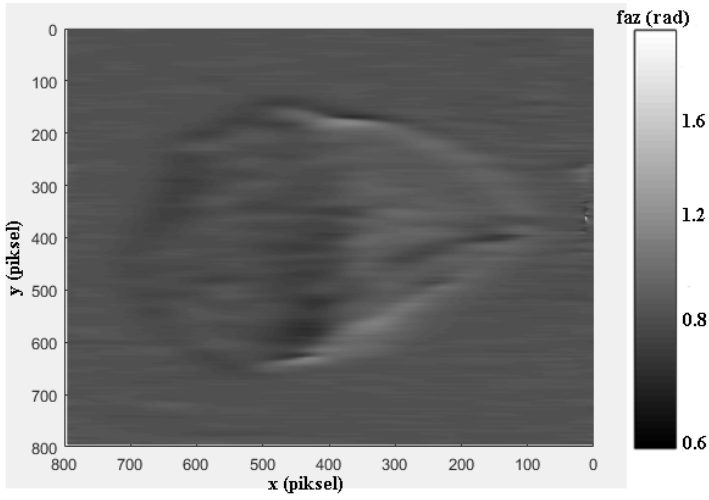
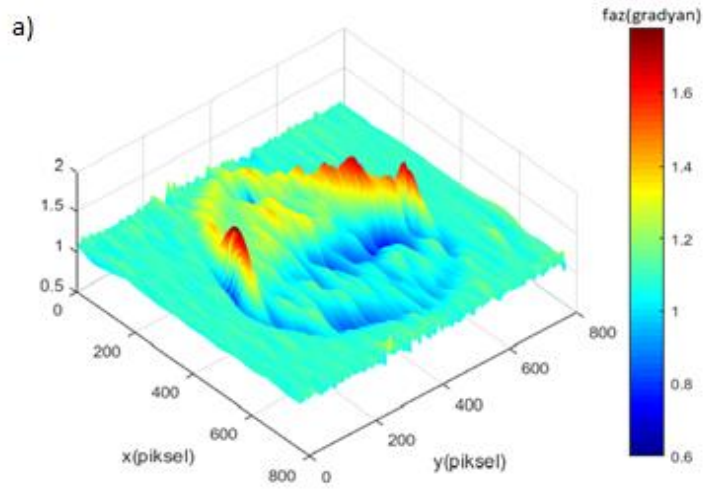
microscope ) olarak adlandırılan ölçüm aleti de kullanılmıştır. SEM, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Bu tarz çalışmalarda sık kullanılır. Fakat ölçüm yapılırken, ölçtüğü nesneye temas ederek zarar vermektedir. Biz burada SEM ile BKFM deney düzeneğini karşılaştırmak için SEM ile de ölçüm aldık ve bu ölçüm şekil 6.5' de gösterilmiştir.



**Şekil 6.5.** SEM' den alınan kan hücrelerinin mikrometre ölçeğinde görüntüsü

SEM den alınan görüntülerde bir kırmızı kan hücresinin çapı  $7 \mu m$  civarında ölçülmüştür. Burada da görüldüğü gibi SEM de alınan görüntü ile BKFM deney kurulumundan elde edilen sonuç analizi karşılaştırıldığında ölçüm hassasiyeti aynı ölçeklere inebildiği görülmüştür. Üstelik BKFM ile elde edilen sonuç 3 boyutlu olarak gösterilebilmektedir ve bunun yanı sıra örnekle temas edilmemesi de BKFM deney düzeneğinin üstün yönünü göstermektedir.

BKFM düzeneği ile görüntüsü alınan bir diğer görüntü şekil 6.6 a ve b' de gösterilen epitel doku örneğidir. Bu analiz için ağızdan çubuk yardımıyla epitel doku örneği alınmış ve diğer örneklerde olduğu gibi mikroskoba konularak üzerlerinde girişim deseni oluşması sağlanmıştır. Şekil 6.6 c' de ise GMD, Morlet ve Paul dalgacılarıyla karşılaştırılmıştır.



**Şekil 6.6.** BKFM ölçüm sisteminden görüntülenen epitel hücrelerinin faz dağılımının a) farklı açılarda gösterimi b) karşıdan görüntüsü c)  $y = 300$ . satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul ( $n=50$ ) (yeşil), GMD (mavi) ( $\beta = 9, \gamma = 3$ ))

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı ölçeklerde ( $cm, mm, \mu m$ ) boyutlara sahip cisimlerin üç boyutlu (3D) yüzey profillerinin ölçümü için temel ızgara yansıtma yönteminin kullanıldığı farklı deney kurulumları gerçekleştirilmiştir. Projeksiyon, interferometre, CCD ve mikroskop kullanılarak farklı kurulumlar denenmiş, cisimlerin üzerine ızgara deseni yansıtılmış görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntülerden faz hesaplama amacıyla, 1D Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) faz yöntemi kullanılmıştır.

Tez çalışmasında ilk olarak ebatları 30x40 cm civarında olan çiçek rölyefinin profilinin hesaplanması için projeksiyon ve CCD den oluşan temel ızgara yansıtma düzeneği kullanılmıştır. Bu düzenek ile elde edilen görüntüler 1D SDD' de GMD, Morlet ve Paul dalgacıları kullanılarak işlenmiş ve 3D profili oluşturulmuştur. Karşılaştırma amacıyla görüntünün  $y=350$ . Satırı için hesaplanan faz değerleri şekil 6.1'de üst üste çizdirilmiştir. Bu şekilden de görüleceği gibi üç dalgacığın verdiği faz değerleri birbirleriyle uyumludur. Santimetre boyutlarında yapılan bu deneme GMD' nin faz hesaplama amacıyla kullanılabilceğini göstermiştir.

Sonraki aşamada milimetre ölçeğinde iki tane örneğin ölçümü için temel ızgara yansıtma deney düzeneği farklı şekilde düzenlenmiş fakat cihaz eksikliğinden dolayı bu örnekler için profil elde edilememiştir. Bunun dışında mikrometre ölçeğinde örneklerin profillerinin belirlenmesi amacıyla BKFM deney kurulumu gerçekleştirilmiştir. Bu deney düzeneği ile bir ince filmin yüzeyindeki kirlilik, epitel hücresi ve kırmızı kan hücrelerinin interferogram görüntüleri oluşturulabilmiştir. Kullanılan bu örneklerin geçirgen olmasına dikkat edilmiştir. Bu görüntüler yine aynı analiz yöntemleriyle işlenerek her noktada yükseklikleri bilinen dinamik profilleri hesaplanmıştır. Şekil 6.2 (c), şekil 6.3 (c), şekil 6.4 (c) ve şekil 6.6 (c)' de GMD, Morlet ve Paul dalgacıları kullanılarak bulunan faz değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırılmadan da görülebileceği gibi tez çalışması hedefine ulaşmıştır.

Bu çalışmada oluşturulan kan hücresi profilleri SEM görüntüleri (şekil 6.5) ile karşılaştırıldığında tezde önerilen yöntemin üstünlükleri net olarak görülebilmektedir. SEM ile elde edilen görüntüler iki boyutludur, yatay da hücre genişliğini ölçekle vermektedir ve kalitatif (göreceli) bir ölçümdür. BKFM düzeneği ile elde edilen görüntülerden faz

hesaplanarak oluşturulan profiller ise her yönden izlenebilir her noktada yüksekliği hesaplanmış kantitatif ölçüm değerleridir.

Bu ölçüm yönteminin biomedikal ölçüm ve endüstri gibi farklı alanlarda kullanım imkanı bulunmaktadır. Farklı hastalıklar için kan hücresi morfolojisinin belirlenmesi, üretilen ince filmlerin yüzeylerinin ve üretim kalitesinin daha ucuza ve daha net gözlenmesi gibi konularda çalışmaların sürmesi gelecekteki hedeflerimizdendir.

## KAYNAKLAR

- Addison, Paul S. 2002. *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*. IOP.
- Afifi, M. et al. 2002. "Paul Wavelet-Based Algorithm for Optical Phase Distribution Evaluation." 211(October):47–51
- Berryman, Fiona, Paul Pynsent, and James Cubillo. 2003. "A Theoretical Comparison of Three Fringe Analysis Methods for Determining the Three-Dimensional Shape of an Object in the Presence of Noise." *Optics and Lasers in Engineering* 39(1):35–50
- Bhaduri, Basanta et al. 2014. "Diffraction Phase Microscopy: Principles and Applications in Materials and Life Sciences." *Advances in Optics and Photonics* 6(1):57
- Blunt, Roy T. 2006. "White Light Interferometry – a Production Worthy Technique for Measuring Surface Roughness on Semiconductor Wafers." *CS MANTECH Conference* 44(0):59–62
- Chen, Wenjing, Peng Bu, Suzhen Zheng, and Xianyu Su. 2007. "Study on Fourier Transforms Profilometry Based on Bi-Color Projecting." *Optics & Laser Technology* 39(4):821–27.
- Daubechies, I. 1990. "The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis." *IEEE Transactions on Information Theory* 36(5):961–1005.
- Demren, Esra. 2015. "DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNÜN FOURIER DÖNÜŞÜMÜ İLE KARŞILAŞTIRILMASI VE UYGULAMA." istanbul teknik üniversitesi
- Dong, Jing-tao and Rong-sheng Lu. 2012a. "A Five-Point Stencil Based Algorithm Used for Phase Shifting Low-Coherence Interference Microscopy." *Optics and Lasers in Engineering* 50(3):502–11. Retrieved June 1, 2015
- Dursun, Ali, Serhat Özder, and F.Necati Ecevit. 2004. "Continuous Wavelet Transform Analysis of Projected Fringe Patterns." *Measurement Science and Technology* 15(9):1768–72
- Endo, Takashi, Yoshiaki Yasuno, and Shuichi Makita. 2005. "Profilometry with Line-Field Fourier-Domain Interferometry." 13(3):1800–1802
- Farge, M. 1992. "Wavelet Transforms and Their Applications to Turbulence." *Annual Review of Fluid Mechanics* 24(1):395–458. Retrieved January 20, 2014
- Gorthi, Sai Siva and Pramod Rastogi. 2010. "Fringe Projection Techniques: Whither We Are?" *Optics and Lasers in Engineering* 48(2):133–40. Retrieved January 20, 2014
- Groot, Peter De. 2015. "Principles of Interference Microscopy for the Measurement of Surface Topography." 1–65
- Ha, Young Myoung, Jae Won Choi, and Seok Hee Lee. 2008. "Mass Production of 3-D Microstructures Using Projection Microstereolithography." *Journal of Mechanical Science and Technology* 22(3):514–21. Retrieved June 1, 2015
- Hare, K.Edar K. 2015. "Phase Imaging Using Spiral-Phase Diversity." 54(13)
- Hwang, Young-min, Sung-won Yoon, Jung-hwan Kim, Souk Kim, and Heui-jae Pakk Æ. 2007. "Thin-Film Thickness Profile Measurement Using Wavelet Transform in Wavelength-Scanning Interferometry." 5–10

- Kemao, Qian. 2007. "Two-Dimensional Windowed Fourier Transform for Fringe Pattern Analysis: Principles, Applications and Implementations." *Optics and Lasers in Engineering* 45(2):304–17. Retrieved July 11, 2014
- Kocahan, Ozlem et al. 2017. "Quantitative Phase Imaging of Red Blood Cell by Diffraction Phase Microscopy." 8–9.
- Kocahan, Özlem. 2008. "İntegral Dönüşümler Kullanılarak Cisimlerin Profillerinin Belirlenmesi." Çanakkale Onsekiz Mart University
- Kocahan, Özlem, Emre Coşkun, and Serhat Özder. 2014. "Generalized Morse Wavelets for the Phase Evaluation of Projected Fringe Pattern." *Measurement Science and Technology* 25(10):105701
- Lai, Cheng-chung and I-jen Hsu. 2007. "Surface Profilometry with Composite Interferometer." *Optics Express* 15(21):13949. Retrieved July 14, 2016
- Leonardi, M., A. Rmiie, and J. Lenarcic. n.d. "A System for Measurement and Visualisation of Human Back Shape for Estimation of 3D Deformities." Pp. 95–97 in *Information Technology Applications in Biomedicine. ITAB '97. Proceedings of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Region 8 International Conference*. IEEE. Retrieved July 11, 2014
- Leonhardt, K. 2005. "Optical Topometry of Surfaces with Locally Changing Materials, Layers and Contaminations Part 2: Fringe Projection Topometry." *Journal of Modern Optics* 52(10):1367–84. Retrieved July 1, 2014
- Li, Sikun, Xianyu Su, and Wenjing Chen. 2010. "Wavelet Ridge Techniques in Optical Fringe Pattern Analysis." *Journal of the Optical Society of America A* 27(6):1245–54
- Meyers, S. D., B. G. Kelly, and J. J. O'Brien. 1993. "An Introduction to Wavelet Analysis in Oceanography and Meteorology: With Application to the Dispersion of Yanai Waves." *Monthly Weather Review* 121(10):2858–66. Retrieved January 20, 2014
- Nicchiotti, G. n.d. "A System for 3D Reconstruction and VRML Conversion for Virtual Museums Applications." Pp. 421–24 in *Proceedings of 13th International Conference on Digital Signal Processing*, vol. 1. IEEE. Retrieved August 19, 2014
- Olhede, S. C. and A. T. Walden. 2002. "Generalized Morse Wavelets." *IEEE Transactions on Signal Processing* 50(11):2661–70. Retrieved January 20, 2014
- Özder, Serhat, Emre Coşkun, Oguz Köysal, and Özlem Kocahan. 2007. "Determination of Birefringence Dispersion in Nematic Liquid Crystals by Using an S-Transform." *Optics Letters* 32(14):2001
- Pham, Hoa et al. 2011. "Off-Axis Quantitative Phase Imaging Processing Using CUDA: Toward Real-Time Applications." *Biomedical Optics Express* 2(7):1781
- Pham, Hoa V, Christopher Edwards, Lynford L. Goddard, and Gabriel Popescu. 2013. "Fast Phase Reconstruction in White Light Diffraction Phase Microscopy." *Applied Optics* 52(1):A97-101
- Polikar, Robi. 2006. "THE WAVELET TUTORIAL." *2006 Index to Series of Tutorials to Wavelet Transform* 161.
- Popescu, Gabriel. 2008. "Chapter 5 Quantitative Phase Imaging of Nanoscale Cell Structure and Dynamics." Pp. 87–115 in *Methods in Nano Cell Biology*, vol. 90. Elsevier Inc.

- Popescu, Gabriel. 2011. *Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Popescu, Gabriel, Kamran Badizadegan, Ramachandra R. Dasari, and Michael S. Feld. 2006. "Observation of Dynamic Subdomains in Red Blood Cells." *Journal of Biomedical Optics* 11(4):40503
- Quan, C., X. Y. He, C. F. Wang, C. J. Tay, and H. M. Shang. 2001. "Shape Measurement of Small Objects Using LCD Fringe Projection with Phase Shifting." *Optics Communications* 189(1–3):21–29. Retrieved July 11, 2014
- Quan, C., C. .. Tay, and H. .. Shang. 1999. "Fringe Projection Technique for the 3-D Shape Measurement of a Hydroformed Shell." *Journal of Materials Processing Technology* 89–90:88–91
- Reolon, D., M. Jacquot, I. Verrier, G. Brun, and C. Veillas. 2006. "Broadband Supercontinuum Interferometer for High-Resolution Profilometry." *Optics Express* 14(1):128–37
- Shi, Hongjian, Hongwei Ji, Guobiao Yang, and Xiaoyuan He. 2013. "Shape and Deformation Measurement System by Combining Fringe Projection and Digital Image Correlation." *Optics and Lasers in Engineering* 51(1):47–53. Retrieved July 17, 2014
- Singh, H. and J. S. Sirkis. 1994. "Direct Extraction of Phase Gradients from Fourier-Transform and Phase-Step Fringe Patterns." *Applied Optics* 33(22):5016–20. Retrieved July 14, 2014
- Sinha, Aloka and Kehar Singh. 2005. "The Design of a Composite Wavelet Matched Filter for Face Recognition Using Breeder Genetic Algorithm." *Optics and Lasers in Engineering* 43(12):1277–91. Retrieved July 14, 2014
- Skydan, Oleksandr a., Michael J. Lalor, and David R. Burton. 2005. "Using Coloured Structured Light in 3-D Surface Measurement." *Optics and Lasers in Engineering* 43(7):801–14. Retrieved July 14, 2014
- Stockwell, R. G., L. Mansinha, and R. P. Lowe. 1996. "Localization of the Complex Spectrum: The S Transform." *IEEE Transactions on Signal Processing* 44(4):998–1001. Retrieved September 16, 2014
- Su, Xianyu and Wenjing Chen. 2001. "Fourier Transform Profilometry." *Optics and Lasers in Engineering* 35(5):263–84. Retrieved January 20, 2014
- Takeda, M. and K. Mutoh. 1983. "Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-D Object Shapes." *Applied Optics* 22(24):3977
- Thian, S. C. H. et al. 2007. "Dimensional Measurement of 3D Microstructure Based on White Light Interferometer." *Journal of Physics: Conference Series* 48:1435–46. Retrieved July 21, 2014
- Thomas, Lijo et al. 2015. "Phase-Sharing Using a Mach – Zehnder Interferometer." 54(4).
- Torrence, Christopher and Gilbert P. Compo. 1998. "A Practical Guide to Wavelet Analysis." *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(1):61–78. Retrieved January 11, 2014
- Utsumi, Yuzuko, Yoshio Iwai, and Masahiko Yachida. 2006. "Performance Evaluation of Face Recognition in the Wavelet Domain." *2006 IEEE/RSJ International Conference on*

- Vanherzeele, J., Patrick Guillaume, and Steve Vanlanduit. 2005. “Fourier Fringe Processing Using a Regressive Fourier-Transform Technique.” *Optics and Lasers in Engineering* 43(6):645–58. Retrieved July 14, 2014
- Watkins, L. R., S. M. Tan, and T. H. Barnes. 1999. “Determination of Interferometer Phase Distributions by Use of Wavelets.” *Optics Letters* 24(13):905. Retrieved July 14, 2016
- Xia, Shuman, Zhipeng Pan, and Jingwen Zhang. 2014. “Optical Microscope for Three-Dimensional Surface Displacement and Shape Measurements at the Microscale.” *Optics Letters* 39(14):4267
- Xue, Liang, Jiancheng Lai, Shouyu Wang, and Zhenhua Li. 2011. “Single-Shot Slightly-off-Axis Interferometry Based Hilbert Phase Microscopy of Red Blood Cells.” *Biomedical Optics Express* 2(4):987
- Yaqoob, Zahid et al. 2011. “Single-Shot Full-Field Reflection Phase Microscopy.” *Optics Express* 19(8):7587–95. Retrieved July 11, 2014
- Zwemer, D. a., G. Petriccione, and R. Curry. 2006. “Thermally-Induced Warpage Measurement on Small Packages by a Microscopic Fringe Projection System.” *Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, 2006. IThERM 2006*. 953–60



## ÖZGEÇMİŞ

Çağla DURMUŞ 2 Ocak 1992 tarihinde İstanbul, Kartal' da doğmuştur. İlköğretimini İstanbul Bağlarbaşı İlköğretim okulunda tamamlamıştır. Daha sonra İstanbul Orhangazi Lisesi'nin sayısal alanından mezun olmuştur. Mezun olduğu 2010 yılının eylül ayında Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi' ne fizik bölümüne giriş yapmış ve bu bölümü 4 yılda bölüm birincisi olarak bitirmiştir. Devamında yine aynı üniversite de kalarak yüksek lisansını yapmaya başlamıştır. 2015 yılında yüksek lisansı ile beraber TÜBİTAK projesinde de proje asistanlığı yapmıştır. Bu proje ile birlikte gittiği biri yurt dışı olmak üzere toplam da 3 kongre ve fuar bulunmaktadır.