Mikrometre Boyutlu Cisimlerin Üç Boyutlu Yüzey Profillerinin Belirlenmesi İçin Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı Faz Hesaplama Yöntemi

Program Kodu: 1001

Proje No: 115F168

Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Özlem KOCAHAN YILMAZ

Araştırmacılar:
Prof. Dr. Serhat ÖZDER
Doç. Dr. Emre COŞKUN

Bursiyerler:
Merve Naz ELMAS
Çağla DURMUŞ
Erhan TİRYAKİ

MART 2018
TEKİRDAĞ

ÖNSÖZ

Daha az hata ile faz dağılımının, bir boyutlu sürekli dalgacık dönüşümü faz yönteminde genelleştirilmiş morse dalgacığı kullanılarak hesaplaması ve böylece mikrometre ölçeğinde, dokunmadan, dinamik bir 3D profil elde edilmesi hedeflenen bu projede istenen hedeflere ulaşılmıştır. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen proje kapsamında alınan cihazlar sayesinde Namık Kemal Üniversitesi Fizik Bölümü araştırma altyapısına çok büyük katkılar sağlanmıştır. Sahip olunan imkanlar sayesinde özellikle biyolojik örneklerin hızlı bir şekilde dinamik profilleri hesaplanabilmektedir. Hatanın azaltılması ve GMD'nin faz hesabında ilk kez kullanılması bakımından literatüre katkıda bulunmuş bir çalışmadır. Elde edilen bulgular makale, bildiri ve poster olarak sunulmuştur ve konuyla ilgilenenler tarafından ilgiyle takip edilmektedir.

Projeye vermiş olduğu destek ve bölüm araştırma altyapısına sağladığı katkılardan dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ i

İÇİNDEKİLER ii

TABLOLAR DİZİNİ iv

ŞEKİLLER DİZİNİ v

ÖZET vii

ABSTRACT viii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÖZETİ 3

3. GEREÇ VE YÖNTEM 6

3.1 İntegral Dönüşüm Yöntemleri 6

3.2 Bir Boyutlu Sürekli Dalgacık Dönüşüm Yöntemi 7

3.2.1 Morlet Dalgacığı 8

3.2.2 Paul Dalgacığı 10

3.2.3 Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı 12

3.3 Bir Boyutlu Sürekli Dalgacık Dönüşüm Yöntemi ile Faz Hesaplanması ve Simülasyonu 14

3.3.1 Morlet Dalgacığı Faz Yöntemi 15

3.3.2 Paul Dalgacığı Faz Yöntemi 17

3.3.3 Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı Faz Yöntemi 18

3.3.4 Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı Faz Gradyan Yöntemi 18

3.3.5 1D SDD Faz Hesaplama Yöntemi Simülasyon Çalışması 19

3.4 Temel Izgara Yansıtma Deney Düzeneği 25

3.4.1 Temel Izgara Yansıtma Deney Düzeneğinin Kurulumu 28

3.5 Beyaz Işık Kırınım Faz Mikroskopisi Deney Düzeneği 31

3.5.1 Beyaz Işık Kırınım Faz Mikroskopisi Deney Düzeneğinin Kurulumu 33

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 39

4.1 Temel Izgara Yansıtma Deney Düzeneği ile Elde Edilen Bulgular 39
4.2 Beyaz Işık Kırınım Faz Mikroskopisi Deney Düzeneği ile Elde Edilen Bulgular 41
5. SONUÇ 52
KAYNAKLAR 54

TÜBİTAK

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Paul dalgacığının bazı m değerleri için çözünürlük değerleri 12
Tablo 2. Morse dalgacığının bazı β ve γ değerleri için çözünürlük değerleri..... 14
Tablo 3. 1D SDD faz yönteminde GMD, Paul (m=10,20,30,40,50) ve Morlet dalgacıkları kullanılarak farklı piksel değerleri için hesaplanan faz hataları..... 22
Tablo 4. 1D SDD faz gradyan yönteminde GMD, Paul (m=10,20,30,40,50) ve Morlet dalgacıkları kullanılarak farklı piksel değerleri için hesaplanan faz hataları..... 23

TÜBİTAK

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. x uzayındaki Morlet dalgacığı 8
Şekil 2. α uzayındaki Morlet dalgacığı 9
Şekil 3. x uzayındaki Paul dalgacığı (m=3) 11
Şekil 4. α uzayındaki Paul dalgacığı (m=3) 11
Şekil 5. x uzayındaki Morse dalgacığı ((γ, β) = (3, 10)). 13
Şekil 6. α uzayındaki Morse dalgacığı ((γ, β) = (3, 10)). 13
Şekil 7. Simülasyon fazı 20
Şekil 8 (a) Faz kaymasının sıfır olduğu durumda, x yönünde tek taşıyıcı frekansla oluşturulmuş ızgara sinyali ($f0x = 0.2$) (b) faz eklenerek elde edilen ızgara deseni. 20
Şekil 9 *y* = 100 satırında GMD faz yöntemi ile hesaplanan faz hataları (*γ* = 3 ve *β* = 3 (mavi), *β* = 5 (yeşil), *β* = 7 (pembe) ve *β* = 10 (siyah)) 21
Şekil 10. 1D SDD faz yönteminde (a) GMD ((γ, β) = (3, 10)), (b) Morlet ve (c) Paul (m=10) dalgacıkları kullanılarak elde edilen faz düzeltme işlemi uygulanmış faz dağılımı. 22
Şekil 12. 1D SDD faz gradyan yönteminde (a) GMD ((γ, β) = (3, 3)), (b) Morlet ve (c) Paul (m=50) dalgacıkları kullanılarak elde edilen faz düzeltme işlemi uygulanmış faz dağılımı... 24
Şekil 11. Beyaz ışık interferometresi kurulumu (white light spectral supercontinuum interferometer) (Reolon ve ark. 2006) 26
Şekil 12. Faz basamaklama yöntemi için görüntü oluşturmak üzere ızgara yansıtma projektörü, CCD kamera ve mikroskoptan oluşan deney düzeneği (Shi ve ark. 2013) 26
Şekil 13. 3D profil ve yer değiştirme ölçümü için kurulan optik mikroskop (Xia ve ark. 2014) 27
Şekil 14. Kurulan temel ızgara yansıtma deney düzeneğinin şematik gösterimi 28
Şekil 15. Bilgisayar programıyla çizdirilen ızgara sinyalinin şekli 28
Şekil 16. Çapraz optik eksenli geometride kurulan deney düzeneğinin kurulumu 29
Şekil 17 a) Çiçek rölyefinin fotoğrafı b) Çiçek rölyefi üzerine x yönünde tek taşıyıcı frekansla (f_0 = 0,2) oluşturulmuş ızgara deseninin yansıtılmasıyla elde edilen görüntü ve c) referansı 30
Şekil 18. Beyaz ışık faz kırınım mikroskobisi (BKFM) kurulumu (Pham ve ark. 2013) 31
Şekil 19. (a) İnterferometre kurulumunun şeması; (b) Fourier düzlemine geçen görüntünün karakteri ve filtrelenmesi; (c) kullanılan filtrenin genel görünümü 32
Şekil 20. BKFM sisteminden elde edilen ve CCD' den gözlenen örnek bir girişim deseni a) örnekteki eğrilmeler b) referans görüntüsü 32
Şekil 21. Beyaz ışık faz kırınım mikroskopisi (BKFM) kurulumu 33
Şekil 22. Mikroskoptan alınan görüntü ile oluşan kırınım desen 34
Şekil 23. Filtreleme işlemi için kırınım deseninin filtre (pinhole) üzerine düşürülmesi 34

Şekil 24. Laboratuvar ortamında hazırlanan filtre 35
Şekil 25. BKFM deney kurulumundan elde edilen CdS ince film üzerindeki birikintinin interferogramı. 36
Şekil 26. Ağızdan alınan epitel doku örneği görüntüsü. 37
Şekil 27. BKFM deney kurulumundan elde edilen kırmızı kan hücresi görüntüsü. 38
Şekil 28. BKFM deney kurulumundan elde edilen iki lamel arasına konulan kırmızı kan hücresi görüntüsü. 38
Şekil 29. Izgara yansıtma tekniğinde santimetre ölçeğinde analiz edilen çiçek rölyefinin faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $\mathrm{y} = 350$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (mavi), GMD (yeşil) ((γ, β) = (3, 10)). 40
Şekil 30. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen Cds ince filmin faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 350$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)) 42
Şekil 31. BKFM ölçüm sisteminden görüntülenen epitel hücrelerinin faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $\mathrm{y} = 300$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)) 43
Şekil 32. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen kan hücrelerinin faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 600$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)) 44
Şekil 33. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin 1D SDD faz yöntemi ile elde edilen faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $\mathrm{y} = 300$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)). 46
Şekil 34. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin 1D SDD faz gradyan yöntemi ile elde edilen faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $\mathrm{y} = 300$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=50) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 3)). 47
Şekil 35. SEM ile elde edilen kırmızı kan hücrelerinin görüntüsü 48
Şekil 36. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin 1D SDD faz yöntemi ile elde edilen yükseklik değerleri; a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $\mathrm{y} = 300$. satır için çizilen yükseklik değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)). 50
Şekil 37. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin 1D SDD faz gradyan yöntemi ile elde edilen yükseklik değerleri; a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $\mathrm{y} = 300$. satır için çizilen yükseklik değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=50) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 3)) 51

ÖZET

Bu çalışmada, bir boyutlu sürekli dalgacık dönüşümü (1D SDD) faz yönteminde genelleştirilmiş morse dalgacığı (GMD) kullanılarak faz hesaplanması için algoritmanın geliştirilmesi sunulmaktadır. Optik ölçüm yöntemi olan ızgara yansıtma tekniği ile mikrometre mertebesinde, nanometre hassasiyetinde ölçüm yapabilen bir deney kurulumundan elde edilen verilerin analizi için literatürde ilk kez GMD kullanılmıştır. GMD, değişken iki parametreye sahiptir ve bu parametrelerin değişmesi lokalizasyon özelliğini etkilemektedir. 1D SDD analizinde lokalizasyon özelliğine göre hesaplar gerçekleştirilmektedir. Bundan dolayı daha az hata ile faz hesaplamak için 1D SDD analizinde analiz dalgacığı olarak GMD kullanma fikri ortaya çıkmıştır. Morlet ve Paul dalgacıkları kullanılarak 1D SDD analizi ile hesaplanmış faz dağılımları ile karşılaştırılarak sonuçlar denetlenmiştir. Izgara yansıtma profilometresinde, mikroskop, interferometre ve CCD'den oluşan bir profilometre ile mikrometre boyutlarında örneklerin 3D, dinamik (her açıdan gözlenebilen) ve her noktada yüksekliği bilinen profilleri oluşturulmuştur.

ABSTRACT

In this Project, improvement of an algorithm for the phase calculation by using one dimensional continuous wavelet transform (1D CWT) with generalized morse wavelet (GMW) was presented. From the fringe projection profilometry, which is an optical measurement techniques, with nanometer precision (micrometer range) images were obtained and analyzed by GMWs for the first time in literature. GMWs have two variable parameters which have influence on localization property. In 1D CWT method, phase is calculated according to the localization property. Therefore, in the analysis of 1D CWT, as a mother wavelet, zero order GMW was chosen because of the flexible spatial and frequency localization property, to calculate the phase with less error. Results for the Morlet and Paul wavelets were compared with the results of GMW analysis. Surface measurements of micrometer-size samples were done by using interferometer, microscope and CCD. With this system, obtained results were 3D and dynamic structure.

1. GİRİŞ

Günümüz optik ölçüm sistemleri, güvenilir ve hassas olmasının yanında, sayısal ortamda kolayca uygulanabilir ve çabuk sonuç verme gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Cisimlerin boyutsal bilgilerine ulaşmak için ızgara yansıtma tekniği ile pratik ve yeterince duyarlı bir optik ölçüm sistemi tasarlamak mümkündür. Izgara yansıtma tekniğinde kullanılan temel iki interferometrik desenden birincisi Morie ızgarası, 1874 yılında Lord Rayleigh tarafından üretilmiştir. Diğer desen olan sinüsoidal ızgarayı, ilk olarak 1967 yılında Rowe ve Welford yüzey ölçümünde kullanmışlardır (Creath ve Wyant 1992). 1983 yılında Takeda (Takeda ve Mutoh 1983), sinüsoidal ızgara yansıtma tekniği ile aldığı görüntüden Fourier dönüşümüyle 3 boyutlu (3D) yüzey bilgisi hesaplamıştır (FDP-Fourier Dönüşüm Profilometre). Takip eden yıllarda Morie ızgarası ve sinüsoidal ızgara yansıtma teknikleri ile daha gelişmiş ölçüm sistemleri tasarlanmış, faz basamaklama ve farklı integral dönüşümler ile yüzey profili hesaplama yöntemleri denenmiştir. Izgara yansıtma tekniği gelişerek insan vücudu ölçümleri, ağız-diş ölçümü, histoloji ve hücre biyolojisi gibi biyomedikal alanlar, mikro-elektro-mekanik sistemlerin (MEMS) yüzey ölçümü ve karakterizasyonu, kalite kontrol gibi endüstrinin birçok alanında 3D profil belirleme amaçlı uygulanır hale gelmiştir (Gorthi ve Rastogi 2010; Su ve Chen 2001).

Cisme temas etmeden yapılan ızgara yansıtma ile 3D yüzey ölçüm yöntemi; projeksiyon birimi, görüntü alma birimi ve görüntü analiz birimi olmak üzere temel 3 birimden oluşur (Gorthi ve Rastogi 2010). Optik ölçüm tekniği olan bu yöntemde öncelikle, örnek üzerine ızgara deseni yansıtılarak bunun görüntüsü kaydedilir. Cismin yüksekliğinden dolayı yansıtılan ızgara deseninde eğrilmeler meydana gelir. Kaydedilen görüntüdeki bu eğrilikleri yani yükseklik bilgisini Fourier dönüşümünde faz terimi taşır (Su ve Chen 2001). Fourier dönüşümü, sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) ve Stockwell dönüşümünden (S-dönüşümü) biri tercih edilerek oluşturulan bilgisayar programı ile görüntü analiz edilir ve faz dağılımı bilgisine ulaşılır. Deney sisteminin geometrisinden faz, yükseklik bilgisine dönüştürülür (Ö. Kocahan 2008). Yüzey üzerindeki her noktanın referans düzleminden olan yüksekliği belirlendikten sonra bir araya getirildiğinde cismin 3D profili elde edilmiş olur (Takeda ve Mutoh 1983; Ö. Kocahan 2008).

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 (interferogram) CCD ile kaydedilir. Analiz işlemleri uygulanarak faz bilgisine ulaşılır.

Bu çalışmada öncelikle bir projeksiyon ve CCD kameradan oluşan standart ızgara yansıtma tekniğiyle santimetre ölçeğinde olan cisimlerin yüzey profiline bakılmıştır. Bunun için 1D SDD faz yöntemi kullanılmıştır. Mikrometre boyutundaki cisimler için ise bir mikroskop, Mach–Zehnder benzeri bir interferometre ve CCD' den oluşan BKFM kurulumu kullanılmıştır. Buradan alınan örnek görüntüler analiz edilerek faz bilgisine ulaşılmıştır.

Bu projede, literatürde ilk kez mikrometre boyutunda ölçüm için Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı (GMD) ile bir 1D SDD algoritması faz hesaplamak için geliştirilmiştir. Bölüm 2'de konu ile ilgili literatür özeti verilmektedir. Gereç ve yöntem bölümünde ilk olarak 1D SDD ile ilgili çözümler teorik olarak verilmiş ve simülasyon çalışmalarıyla desteklenmiştir. Bu çalışmada mikrometre boyutlu cisimlerin yüzey profillerinin belirlenmesi için analiz basamağı olan faz hesaplama işleminin GMD ile gerçekleştirilmiş ve böylece daha az hata ile faz bilgisi oluşturulmuştur. Projedeki ikinci hedefimiz örneğe temas olmaksızın yapılacak ölçüm ile 3D, her açıdan gözlenebilen, nicel veriler elde edilmesidir. Bu nedenle öncelikle santimetre ölçeğinde bir cismin yükseklik profili oluşturulması genel hatlarıyla 3. bölümün ikinci kısmında açıklanmıştır. Optik ölçüm yöntemi olan ızgara yansıtmayla üç boyutlu (3D) yüzey ölçüm tekniği ile mikrometre mertebesinde, nanometre hassasiyetinde ölçüm yapabilen BKFM deney kurulumu aynı bölümde 3. kısımda incelenmiştir. Her iki deney kurulumundan elde edilen görüntüler analiz dalgacığı GMD kullanılarak 1D SDD ile analiz edilerek 0.001 hassasiyetle ortaya çıkan 3D nicel veriler bulgular bölümünde verilmiştir. 5. Bölümde çalışmada elde edilen sonuçlar tartışılmış ve öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Izgara deseninden faz dağılımının elde edilmesi için birçok farklı teknik kullanılır. Bunların en yaygın olanı Fourier dönüşümü tekniğidir (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 işlemini gerçekleştirmektir. 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 yüksekliği 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 çözümler getirmeye çalışmıştır (Singh ve Sirkis 1994). Daha sonra FDP'ye yeni filtreler eklenmiş, profil belirleme işlemi daha iyi sonuçlarla başarılmıştır (Nicchiotti n.d. 2014). Devam eden yıllarda çalışmalar sürmüş ve bu tekniğin kullanım alanları genişletilmiştir (Berryman, Pynsent, ve Cubillo 2003, Kemao 2007, Quan, Tay, ve Shang 1999, Su ve Chen 2001, Vanherzeele, Guillaume, ve Vanlanduit 2005). Yine devam eden süreçte ölçüm için 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 SDD de genelde tercih edilen integral dönüşümlerindendir. Fourier dönüşümünün çözünürlük problemi 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 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 SDD tekniğiyle çözümler elde edilmiştir (Watkins ve ark. 1999). Başka bir similasyon 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 SDD uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bunların yanı sıra, Meksika şapkası ve Morlet ana dalgacıkları ile SDD’de faz dağılımı elde edilerek insan yüzü profilinin belirlenmesi çalışmaları da yapılmıştır (Sinha ve Singh 2005, Utsumi, Iwai, ve Yachida 2006).

Dalgacık dönüşümü, zamanla değişen veya ani süreksizlikler taşıyan sinyalleri incelemek için idealdir. Sinyaldeki frekans içeriklerinin birebir karşılığı bulunmamakla birlikte, ilgilenilen frekans aralığına bağlı olarak 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. En yaygın olarak kullanılan dalgacıklar, Paul, DOG ve en popüler olanı Morlet dalgacığıdır. Bu çalışmada ızgara deseniyle elde edilen görüntülerden hesaplama için sıfırıncı dereceden GMD kullanılmıştır. GMD, değişken iki parametreye sahiptir ve bu parametrelerin değişmesi lokalizasyon özelliğini etkilemektedir (Olhede ve Walden 2002; J.M. Lilly ve Olhede 2009; Jonathan M Lilly ve Olhede 2012). 1D SDD analizinde lokalizasyon özelliğine göre hesaplar gerçekleştirilmektedir. Bundan dolayı daha az hata ile faz hesaplamak için 1D SDD analizinde analiz dalgacığı olarak GMD kullanma fikri ortaya çıkmıştır. Morlet ve Paul dalgacıkları kullanılarak 1D SDD analizi ile hesaplanmış, faz dağılımları karşılaştırılarak sonuçlar denetlenmiştir. Proje çalışmasında GMD’nin seçilme nedeni daha az hata ile faz hesaplamak ve böylece literatürde kullanılan yöntemlerde iyileştirme sağlamaktır.

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 ölçeklerde ki 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 önerilen deney düzeneğinde ışık kaynağı olarak beyaz ışık kullanılmıştır (Reolon ve ark. 2006). Daha sonraki yıllarda da bununla ilgili Gabriel Popescu' nun çalışmaları mevcuttur. Yaptığı çalışmalarda kırmızı kan hücresi ve nano ölçekli yapılar kullanmış ve bunların yüzey profillerini ve dinamik yapılarını incelemiştir (Popescu 2008, 2011, Popescu ve ark. 2006). Farklı bir deneyde, 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 ve objektiflerden 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 kullanış şekli veya kullanıp kullanılmaması şeklinde açıklanabilir (Li, Su, ve Chen 2010, Pham ve ark. 2011, Xue ve ark. 2011, Yaqoob ve ark. 2011). Bir çalışmada ise ızgara yansıtma projektörü, CCD kamera ve mikroskoptan oluşan deney düzeneği ile mikrometre boyutunda 3D profil ölçümü gerçekleştirilmiştir (Shi ve ark. 2013). Mikroskopla birlikte bir interferometrik bir kurulum ve/veya objektif kullanılarak yapılan birçok çalışma 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 Mikroskopbu) ölçüm sistemi ile kan hücrelerinin yüzey ölçümü denenmiştir (Bhaduri ve ark. 2012, Pham ve ark. 2013). Burada 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).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 İntegral Dönüşüm Yöntemleri

İntegral dönüşüm yöntemleri sinyallerin frekans bilgilerini elde etmede kullanılan matematiksel araçlardır. Birçok araştırmacı görüntü, ses vb. sinyalleri analiz etmek için çeşitli dönüşüm yöntemleri kullanmaktadır. Bu tür yaklaşım ve gösterimlerin pek çok avantajı vardır çünkü karmaşık fonksiyonların analizinde değerli bilgiler sağlarlar. FD, en yaygın kullanılanıdır. FD ve Ters Fourier Dönüşümü (TFD) sırasıyla,

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)\, e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(f)\, e^{i2\pi ft} df \quad (2)$$

denklemleri ile tanımlanır (Polikar 2006). Burada t zaman ve f frekanstır. $g(t)$ zamana bağlı, $G(f)$ frekansa bağlı fonksiyonları temsil etmektedir. FD durağan sinyallerin, yani frekansı zamanla değişmeyen sinyallerin analizinde kullanışlıdır. Fakat durağan olmayan sinyallerin, yani frekansı zamanla değişen sinyallerin analizinde kullanışlı değildir. Çünkü belirli bir frekansın hangi zamanda gerçekleştiği bilgisini vermez.

Dennis Gabor, FD'nün bu dezavantajını gidermek için modifiye ederek Gabor Dönüşümü olarak bilinen yöntemi geliştirmiştir (Gabor 1946). Gabor Dönüşümü aynı zamanda Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) olarak da bilinir (Okamura 2011). KZFD'nin matematiksel ifadesi eşitlik (3)'de yazıldığı gibidir (Kwok ve Jones 2000).

$$KZFD(b, f) = x(t)u(t - b)e^{-i2\pi ft} dt \quad (3)$$

Eşitlikte $u(t - b)$ pencere fonksiyonu olarak bilinir. b öteleme parametresidir; pencere fonksiyonun zaman uzayındaki konumunu belirler. KZFD, analizi yapılacak olan sinyalin zaman alanında pencerelere bölünerek, her bir pencerelenmiş bölüm için FD uygulanması işlemidir. Böylece bu yöntemle zaman ve frekans eş zamanlı olarak belirlenebilir. KZFD'de pencerenin boyutu sonuçları etkilemektedir. Bu sebeple, KZFD ile yapılan analizlerde düşük çözünürlüklü sonuçlar elde edilmektedir (Polikar 2006).

KZFD'nin çözünürlük problemini çözmek için alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada SDD yöntemi kullanılacaktır.

3.2 Bir Boyutlu Sürekli Dalgacık Dönüşüm Yöntemi

Bu bölümde, proje önerisinde yer alan 3, 4 ve 5 numaralı iş paketleri öncelikle genel hatları ile açıklanmış, analitik çözümler ile ilgili ayrıntılar verilmiştir. 3, 4 ve 5 numaralı iş paketilerinde geçen GMD ile 1D SDD'nin ölçüm sisteminde oluşan ızgara deseni için teorik olarak çözülmesi, simülasyonu ve örnek görüntüler için hazırlanması konuları açıklanmıştır.

J. Morlet, KZFD yöntemindeki sabit boyutlu pencere fonksiyonu kullanımı yerine farklı bir tür fonksiyon kullanılarak, KZFD kısıtlamalarına çözüm olabileceği fikrini ortaya attı. Grossman ve Morlet, SDD yöntemini geliştirdi (Grossmann ve Morlet 1984). SDD yönteminde, pencere fonksiyonu yerine ana dalgacık olarak adlandırılan $\Psi(x)$ fonksiyonu kullanılır. $\Psi(k_0)$, ana dalgacık fonksiyonu aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Meyers, Kelly, ve O'Brien 1993).

I. Ana dalgacık fonksiyonun merkezi sıfırda olmalıdır ve $x \to \infty$ giderken $\Psi(x) \to 0$ gitmelidir.

II. $\Psi(k_0)$'ın ortalama değeri sıfır olmalıdır. Bu kabul edilebilirlik koşulu olarak bilinir.

III. $\widehat{\Psi}(\alpha \leq 0) = 0$ olur.

1D SDD matematiksel ifadesi; herhangi bir $h(x)$ sinyali için eşitlik (4)'de verildiği gibidir (Posch 1989).

$$SDD(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} h(\mathrm{x})\, \Psi_{a,b}^{*}(\mathrm{x}) d\mathrm{x} \qquad (4)$$

Burada, $\Psi_{a,b}\,(k_0)$ analiz dalgacık fonksiyonudur ve $\Psi(k_0)$, ana dalgacık fonksiyonuna, genişlemesini sağlayan a ve ötelenmesini sağlayan b parametreleri eklenerek elde edilir (Addison 2005).

$$\Psi_{a,b}(\mathrm{x}) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{\mathrm{x}-b}{a}\right) \qquad (5)$$

Burada, $a(>0)$ ve b reel sayılardır. $1/\sqrt{a}$ normalizasyon sabitidir.

Konvolüsyon teoremi kullanılarak, eşitlik 4 daha kullanışlı olan eşitlik (6)'daki gibi yazılabilir (Coskun 2012).

$$SDD(a,b) = \sqrt{a}\left[\int_{-\infty}^{\infty} \widehat{\Psi}^{*}(a\alpha)\widehat{H}(\alpha)\exp(i2\pi b\alpha)\, d\alpha\right] \quad (6)$$

$$SDD(a,b) = \sqrt{a}\, TFD\left\{\widehat{\Psi}^{*}(a\alpha)\widehat{\mathrm{H}}(\alpha)\right\} \quad (7)$$

Eşitlik 7, hızlı Fourier dönüşümü (HFD) algoritması kullanımına imkân verir ve eşitlik (4)'e göre daha hızlı analiz yapılabilir (Addison 2005).

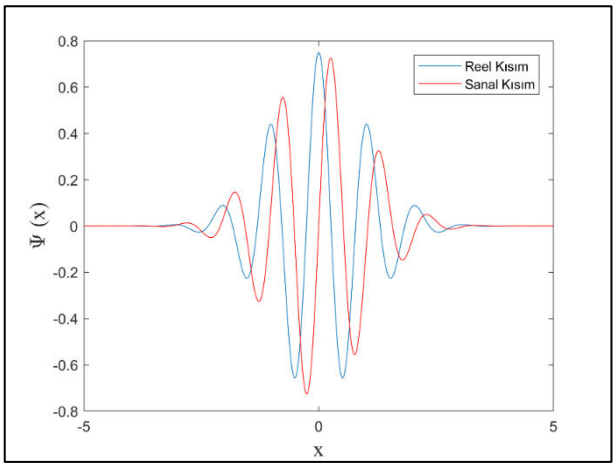
3.2.1 Morlet Dalgacığı

x uzayındaki Morlet dalgacığı ve frekans uzayındaki formu, sırasıyla eşitlik (8) ve eşitlik (9)'da verildiği gibidir (Torrence ve Compo 1998).

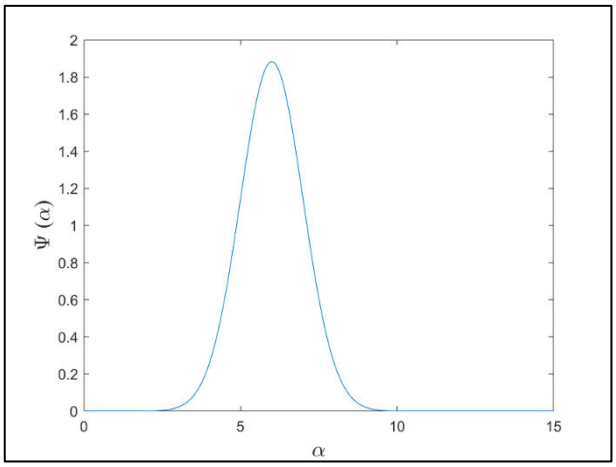
$$\Psi(x) = \sqrt[4]{\frac{1}{\pi}}\exp(iw_0x)\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (8)$$

$$\widehat{\Psi}(\alpha) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}}\exp\left[-\frac{(\alpha-w_0)^2}{2}\right] \quad (9)$$

burada w_0 boyutsuz frekanstır ve kabul edilebilirlik koşulunu sağlaması için değeri 6 olarak alınmıştır (Farge 1992). x ve α uzayındaki Morlet dalgacığı, sırasıyla şekil 1 ve 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. x uzayındaki Morlet dalgacığı



Şekil 2. α uzayındaki Morlet dalgacığı

x uzayındaki ve frekans uzayındaki analiz dalgacık fonksiyonu, $\Psi_{\mathrm{a,b}}(x)$ ve $\widehat{\Psi}(a\alpha)$ a ve b parametreleri eklenerek, sırasıyla eşitlik (10) ve eşitlik (11)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\Psi_{\mathrm{a,b}}(x) = \sqrt[4]{\frac{1}{\pi}} \exp\left(iw_0\left(\frac{x-b}{a}\right)\right) \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2a^2}\right) \tag{10}$$

$$\widehat{\Psi}(a\alpha) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}} \exp\left[\frac{(a\alpha-w_0)^2}{2}\right] \tag{11}$$

Analiz dalgacığının çözünürlüğü incelenirse; x uzayındaki analiz dalgacığının merkezi (x_m) ve değişiminin karesi $((\Delta x)^2)$ sırasıyla eşitlik (12) ve (13) ile verildiği gibidir.

$$\mathrm{x_m} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{x}\left|\Psi_{a,b}(\mathrm{x})\right|^2 d\mathrm{x}}{\int_{-\infty}^{\infty} \left|\Psi_{a,b}(\mathrm{x})\right|^2 d\mathrm{x}} \tag{12}$$

$$(\Delta \mathrm{x})^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\mathrm{x}-x_m)^2\left|\Psi_{a,b}(\mathrm{x})\right|^2 d\mathrm{x}}{\int_{-\infty}^{\infty} \left|\Psi_{a,b}(\mathrm{x})\right|^2 d\mathrm{x}} \tag{13}$$

α uzayındaki analiz dalgacığının merkezi (α_m) ve değişiminin karesi $((\Delta\alpha)^2)$ sırasıyla eşitlik (14) ve (15) ile verildiği gibidir.

$$\alpha_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \alpha\left|\widehat{\Psi}(a\alpha)\right|^2 d\alpha}{\int_{-\infty}^{\infty} \left|\widehat{\Psi}(a\alpha)\right|^2 d\alpha} \tag{14}$$

$$(\Delta\alpha)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\alpha-\alpha_m)^2\left|\widehat{\Psi}(a\alpha)\right|^2 d\alpha}{\int_{-\infty}^{\infty} \left|\widehat{\Psi}(a\alpha)\right|^2 d\alpha} \tag{15}$$

Analiz dalgacığının çözünürlüğü (R) eşitlik (16) ile hesaplanabilir.

$$R = \Delta x \times \Delta \alpha \quad (16)$$

Morlet dalgacığı için x ve α uzayındaki analiz dalgacığının merkezlerinin değişimlerinin karesi eşitlik (13) ve (15) kullanılarak, sırasıyla eşitlik (17) ve (18) verildiği gibi bulunur.

$$(\Delta x)^2 = \frac{a^2}{2} \quad (17)$$

$$(\Delta \alpha)^2 = \frac{1}{2a^2} \quad (18)$$

Böylece Morlet dalgacığının çözünürlüğü (R) eşitlik (19)'da verildiği gibidir.

$$R = \frac{1}{2} \quad (19)$$

Bu değer Morlet dalgacığının olabilecek en iyi çözünürlüğe sahip olduğunu gösterir (Coşkun, 2012).

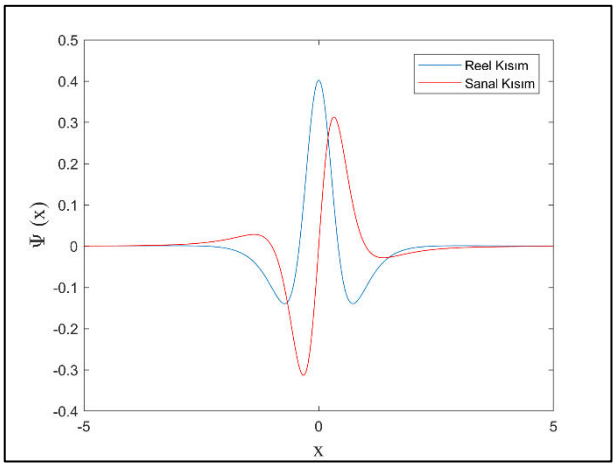
3.2.2 Paul Dalgacığı

x uzayındaki Paul dalgacığı ve frekans uzayındaki formu, sırasıyla eşitlik (20) ve eşitlik (21)'de verildiği gibidir (Torrence ve Compo 1998).

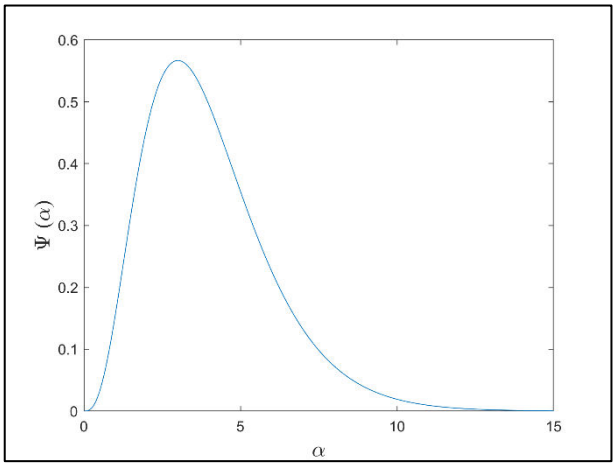
$$\psi(x) = \frac{2^m m!}{2\pi\sqrt{(2m)!/2}}(1 - ix)^{-(m+1)} \quad (20)$$

$$\hat{\Psi}(\alpha) = \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}}(\alpha)^m \exp(-\alpha) U(\alpha) \quad (21)$$

Burada $U(\alpha)$, Heavisside fonksiyonudur. x ve α uzayındaki Paul dalgacığı $m = 3$ için, sırasıyla şekil 3 ve 4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. x uzayındaki Paul dalgacığı (m=3)



Şekil 4. α uzayındaki Paul dalgacığı (m=3)

x uzayındaki ve frekans uzayındaki analiz dalgacık fonksiyonu, $\Psi_{a,b}(x)$ ve $\widehat{\Psi}(a\alpha)$ a ve b parametreleri eklenerek, sırasıyla eşitlik (22) ve eşitlik (23)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{2^m m! \left(1 - i\left(\frac{x-b}{a}\right)\right)^{-(m+1)}}{2\pi\sqrt{(2m!)/2}} \tag{22}$$

$$\widehat{\Psi}(a\alpha) = \frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} (a\alpha)^m \exp(-a\alpha) U(a\alpha) \tag{23}$$

Paul dalgacığının çözünürlüğü incelenmek istenirse, eşitlik (12)-(15)'de gerekli ifadeler yerlerine konularak, x ve α uzayındaki analiz dalgacığının merkezlerinin değişimlerinin karesi eşitlik (24) ve (25) verildiği gibi bulunur.

$$(\Delta x)^2 = \frac{a^2}{2m-1} \tag{24}$$

$$(\Delta\alpha)^2 = \frac{2m+1}{4a^2} \quad (25)$$

Böylece Paul dalgacığının çözünürlüğü $R = \frac{\sqrt{2m+1}}{2\sqrt{2m-1}}$ olarak bulunur. Bazı m değerleri için R aşağıdaki tablo 1'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 1. Paul dalgacığının bazı m değerleri için çözünürlük değerleri

m	1	2	5	10	15
R	0.86	0.64	0.55	0.52	0.51

3.2.3 Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı

Morse dalgacığının genel tanımı eşitlik (26)'da verildiği gibidir (Olhede ve Walden 2002).

$$\Psi^{+}_{k;\beta,\gamma}(f) = \sqrt{2}A_{k;\beta,\gamma}(2\pi f)^{\beta} e^{-(2\pi f)^{\gamma}} L_k^c(2[2\pi f]^{\gamma}) \quad (26)$$

Burada $r = (2\beta+1)/\gamma, \quad c = r-1$ ve $A_{k;\beta,\gamma} = \sqrt{[\pi\gamma 2^r \Gamma(k+1)/\Gamma(k+r)]}$ olarak tanımlanır. L_k^c ise eşitlik (27)'de gösterilen Laguerre polinomudur (Olhede ve Walden 2002).

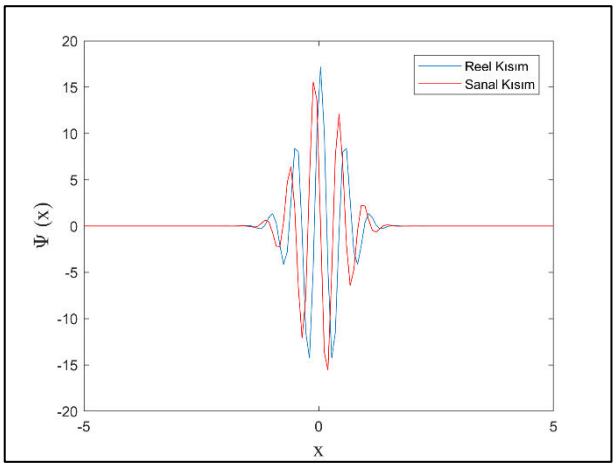
$$L_k^c(x) = \sum_{m=0}^{k}(-1)^m \frac{\Gamma(k+c+1)}{\Gamma(c+m+1)\Gamma(k-m+1)} \frac{x^m}{m!} \quad (27)$$

Eğer buradaki k değerini sıfır alırsak, sıfırıncı dereceden GMD hesaplamış 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 GMD seçilmiştir. Sıfırıncı dereceden GMD'nin α uzayındaki formu eşitlik (28) ile verilmiştir (Ö. Kocahan, Coşkun, ve Özder 2014).

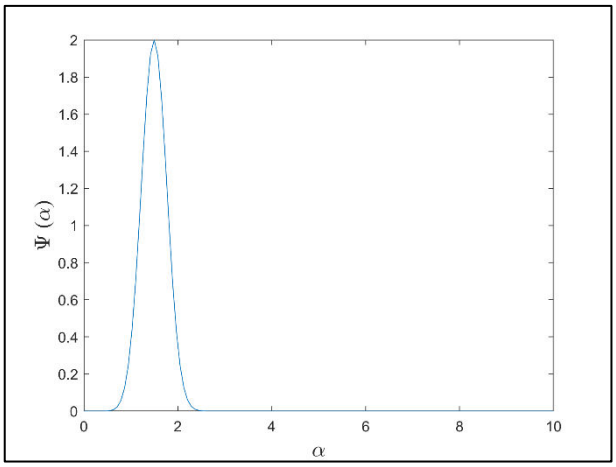
$$\widehat{\Psi}(\alpha) = U(\alpha)2\left(\frac{e\gamma}{\beta}\right)^{\beta/\gamma}(\alpha)^{\beta} exp((-\alpha)^{\gamma}) \quad (28)$$

Burada U ile verilen Heaviside fonksiyonudur ve e Euler sayısıdır. γ ve β morse dalgacığının değişen parametreleridir. 0.5'den büyük her değer bu parametreler için

alınabilir. Bu değişen parametreler dalgacığın çözünürlüğünün istenildiği gibi kullanılabilmesini sağlamaktadır (Ö. Kocahan, Coşkun, ve Özder 2014). x ve α uzayındaki GMD dalgacığı $\gamma = 3$ ve $\beta = 10$ için, sırasıyla şekil (5) ve (6)'da gösterilmiştir.



Şekil 5. x uzayındaki Morse dalgacığı ((γ, β) = (3, 10)).



Şekil 6. α uzayındaki Morse dalgacığı ((γ, β) = (3, 10)).

α uzayındaki analiz dalgacık fonksiyonu $\widehat{\Psi}(a\alpha)$, a parametresi eklenerek eşitlik (29)'da verildiği gibi elde edilir.

$$\widehat{\Psi}(a\alpha) = U(a\alpha)2\left(\frac{e\gamma}{\beta}\right)^{\beta/\gamma}(a\alpha)^{\beta}exp((-a\alpha)^{\gamma}) \qquad (29)$$

Morse dalgacığının çözünürlüğü incelenmek istenirse, eşitlik (12)-(15)'de gerekli ifadeler yerlerine konularak, x ve α uzayındaki analiz dalgacığının merkezlerinin değişimlerinin karesi eşitlik (30) ve (31) verildiği gibi bulunur (Ö. Kocahan, Coşkun, ve Özder 2014).

$$(\Delta x)^2 = \left(\frac{1}{2^{-(2\beta+1)/\gamma}\Gamma\left(\frac{2\beta+1}{\gamma}\right)} \quad \left\{ \begin{matrix} \beta^2 \frac{1}{2^{-(2\beta-1)/\gamma}} \Gamma\left(\frac{2\beta-1}{\gamma}\right) \\ +\gamma^2 \frac{1}{2^{(2\beta+2\gamma-1)/\gamma}} \Gamma\left(\frac{2\beta+2\gamma-1}{\gamma}\right) \\ -2\beta\gamma \frac{1}{2^{(2\beta+2\gamma-1)/\gamma}} \Gamma\left(\frac{2\beta+2\gamma-1}{\gamma}\right) \end{matrix} \right\} \right) \tag{30}$$

$$(\Delta\alpha)^2 = \left(2^{(-2/\gamma)} \left\{ \frac{\Gamma\left(\frac{2\beta+3}{\gamma}\right)}{\Gamma\left(\frac{2\beta+1}{\gamma}\right)} - \left[\frac{\Gamma\left(\frac{2\beta+2}{\gamma}\right)}{\Gamma\left(\frac{2\beta+1}{\gamma}\right)} \right]^2 \right\} \right) \tag{31}$$

Böylece Morse dalgacığının çözünürlüğü eşitlik (32)'de verildiği gibi bulunur.

$$R = \left(\frac{1}{2^{-(2\beta+1)/\gamma}\Gamma\left(\frac{2\beta+1}{\gamma}\right)} \quad \left\{ \begin{matrix} \beta^2 \frac{1}{2^{-(2\beta+1)/\gamma}} \Gamma\left(\frac{2\beta-1}{\gamma}\right) \\ +\gamma^2 \frac{1}{2^{(2\beta+2\gamma-1)/\gamma}} \Gamma\left(\frac{2\beta+2\gamma-1}{\gamma}\right) \\ -2\beta\gamma \frac{1}{2^{(2\beta+2\gamma-1)/\gamma}} \Gamma\left(\frac{2\beta+2\gamma-1}{\gamma}\right) \end{matrix} \right\} \right) \left(2^{(-2/\gamma)} \left\{ \frac{\Gamma\left(\frac{2\beta+3}{\gamma}\right)}{\Gamma\left(\frac{2\beta+1}{\gamma}\right)} - \left[\frac{\Gamma\left(\frac{2\beta+2}{\gamma}\right)}{\Gamma\left(\frac{2\beta+1}{\gamma}\right)} \right]^2 \right\} \right) \tag{32}$$

Bazı γ ve β değerleri için R aşağıdaki tablo 2'de verildiği gibi hesaplanmıştır (Ö. Kocahan, Coşkun, ve Özder 2014).

Tablo 2. Morse dalgacığının bazı β ve γ değerleri için çözünürlük değerleri

		β				
		1	**3**	**5**	**7**	**10**
γ	**1**	0.86	0.59	0.55	0.54	0.53
	3	0.53	0.50	0.50	0.50	0.50
	5	0.53	0.51	0.51	0.51	0.50
	7	0.56	0.53	0.52	0.52	0.51
	10	0.61	0.57	0.55	0.54	0.53

3.3 Bir Boyutlu Sürekli Dalgacık Dönüşüm Yöntemi ile Faz Hesaplanması ve Simülasyonu

Bu bölümde 1D SDD'nde Morlet, Paul ve GMD dalgacığı kullanılarak faz hesaplanması açıklanmaktadır. Öncelikle sinyal için 1D SDD hesaplanır. Bu denklemden faz $\varphi(b) =$

$\tan^{-1}\left[\frac{Im(SDD(a,b))}{Re(SDD(a,b))}\right]$ şeklinde elde edilir. Bu $\varphi(b)$ fazına daha sonra, uygun algoritmalar kullanılarak faz düzeltme işlemi uygulanmalıdır. Ancak bu şekilde istenen φ faz dağılımı elde edilmiş olur (Dursun, Özder, ve Ecevit 2004; Özder vd. 2007). Faz hesabında faz düzeltme işlemine gerek kalmadan da "faz gradyan" yöntemi ile sonuca ulaşmak mümkündür. "Faz" ve "Faz gradyan" yöntemleri karşılaştırılarak gerçekleştirilen simülasyon çalışması da bu bölümde verilmiştir.

3.3.1 Morlet Dalgacığı Faz Yöntemi

Tek boyutlu bir ızgara sinyali için 1D SDD'nün genel ifadesi eşitlik (4) ile verilmişti. Izgara yansıtma tekniğinde kullanılan ızgara deseninin bir satırını (y-piksellerini) gösteren, x yönünde değişen tek boyutlu bir ızgara sinyalini şöyle tanımlayalım (Afifi, Fassi-Fihri, vd. 2002):

$$h(x) = I_0\left[1 + V(x)cos\left(2\pi f_0 x + \varphi(x)\right)\right] \tag{33}$$

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. Izgaranın fazı $\varphi(x)$, b etrafında Taylor serisine açılırsa;

$$\varphi(x) \cong \varphi(b) + (x-b)\varphi'(b) + \frac{(x-b)^2}{2!}\varphi''(b) + \cdots \tag{34}$$

elde edilir. Bu eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terimden sonraki terimler $2\pi f_0 > |d\varphi/dx|_{max}$ koşuluna göre ihmal edilebilir (Takeda ve Mutoh 1983). Dolayısıyla faz için $\varphi(x) \cong \varphi(b) + (x-b)\varphi'(b)$ yaklaşımı kullanılabilir. Izgara deseninde, $\cos(x) = (e^{ix} + e^{-ix})/2$ formunda ve $\varphi(x)$ yerine yazılırsa,

$$h(x) = I_0(x)\left\{1 + \frac{V(x)}{2}\begin{bmatrix}\exp\left(\left[i\left(2\pi f_0 x + \varphi(b) + (x-b)\varphi'(b)\right)\right]\right) + \cdots \\ \exp\left(\left[-i\left(2\pi f_0 x + \varphi(b) + (x-b)\varphi'(b)\right)\right]\right)\end{bmatrix}\right\} \tag{35}$$

eşitliği bulunur. Ayrıca $I_0(x)$ ve $V(x)$'in yavaş değiştiği kabul edilirse, ızgara sinyalinin Fourier dönüşümü, aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\widehat{H}(\alpha) = I_0(b)2\pi\left\{\delta(\alpha) + \frac{V(b)}{2}\begin{bmatrix}\delta\left(\alpha - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right) + \cdots \\ \delta\left(\alpha + f_0 + \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(-i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\end{bmatrix}\right\} \tag{36}$$

Morlet dalgacığının lokalizasyon özelliğine göre $\alpha \leq 0$ iken $\widehat{\Psi}(a\alpha) = 0$ olur. Bu koşul göz önüne alınarak eşitlik (11) ve (36), eşitlik (6)'da yerine koyulursa Morlet dalgacığı ile 1D SDD aşağıdaki gibi elde edilir:

$$SDD(a,b) = \sqrt{a}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[\frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}}\exp\left(-\frac{(a\alpha-z_0)^2}{2}\right)\right]\left[\pi I_0(b)V(b)\left\{\delta\left(\alpha - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right][\exp(ib\alpha)]\right\}d\alpha \quad (37)$$

Eşitlik (37) için $a\alpha = t$ ve $d\alpha = dt/a$ dönüşümleri yapılarak yeniden yazılırsa,

$$SDD(a,b) = \sqrt{a}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[\frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}}\exp(-\frac{(t-z_0)^2}{2})\right]\left[\pi I_0(b)V(b)\left\{\delta\left(\frac{t}{a} - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right]\left[\exp(ib\frac{t}{a})\right]\right\}\frac{dt}{a} \quad (38)$$

ve düzenlenirse, aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SDD(a,b) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{a}}\sqrt[4]{\pi^5}I_0(b)V(b)\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[\exp(-\frac{(t-z_0)^2}{2})\right]\left[\left\{\delta\left(\frac{t}{a} - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right]\left[exp(ib\frac{t}{a})\right]\right\}dt \quad (39)$$

Eşitlik (40)'daki Dirac fonksiyonu özelliği kullanılarak yararlanarak eşitlik (39) yeniden yazılırsa, eşitlik (41) elde edilir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x_0)\delta(x_0 - \rho)dx_0 = f(\rho) \quad (40)$$

$$SDD(a,b) = \left[\sqrt{2}\sqrt[4]{\pi^5}I_0(b)V(b)\right]\sqrt{a}\left\{\left[\exp\left(-\left(\frac{a\left(f_0+\frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)-z_0}{2}\right)\right)^2\right]\left[\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b) + bf_0 + b\frac{\varphi'}{2\pi}\right)\right)\right]\right\} \quad (41)$$

Sonuçta elde edilen bu $SDD(a,b)$ denklemi, $Aexp(i(wt+\varphi))$ formunda bir dalga denklemidir. Bu nedenle denklemin gerçek kısmı genliği, eksponansiyel kısmın içi de fazı verir. Faz değeri $\varphi(b) = arctan\left[\frac{ImW}{ReW}\right]$ şeklinde hesaplanır. 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 2π değerinden daha büyük bir değişim görülebilir. Bu değişim beklenmeyen bir durumdur. Trigonometrik olarak $\alpha=\alpha+2\pi$ olduğundan, takip eden faz değerine 2π eklenerek

ya da çıkarılarak bu süreksizlik ortadan kaldırılabilir. Bu işlem bilgisayar programında bulunan *unwrap* komutuyla gerçekleştirilebilir (Ö. Kocahan, Coşkun, ve Özder 2014; Özder vd. 2007).

3.3.2 Paul Dalgacığı Faz Yöntemi

Tek boyutlu bir ızgara sinyalinin Paul dalgacığı kullanılarak 1D SDD benzer şekilde gerekli ifadeler yerlerine konularak eşitlik (42) elde edilir.

$$SDD(a,b) = \sqrt{a}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[\frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}}(a\alpha)^m \exp(-a\alpha)U(a\alpha)\right]\left[\pi I_0(b)V(b)\left\{\delta\left(\alpha - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right][\exp(ib\alpha)]\right\} d\alpha \quad (42)$$

Eşitlik (42) için için $a\alpha = t$ ve $d\alpha = dt/a$ dönüşümleri yapılarak yeniden yazılırsa,

$$SDD(a,b) = \sqrt{a}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[\frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}}(a\alpha)^m \exp(-a\alpha)U(t)\right]\left[\pi I_0(b)V(b)\left\{\delta\left(\frac{t}{a} - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right]\left[\exp(ib\frac{t}{a})\right]\right\}\frac{dt}{a} \quad (43)$$

$t > 0$ için $U(t) = 1$

$$SDD(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}}2\pi I_0(b)V(b)\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^{\beta/\gamma}\exp\left(\frac{\beta}{\gamma}\right)\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[t^{\beta}\exp(-t^{\gamma})\right]\left[\left\{\delta\left(\frac{t}{a} - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right]\left[exp(ib\frac{t}{a})\right]\right\}dt \quad (44)$$

Eşitlik (40)'daki Dirac fonksiyonu özelliği kullanılarak yararlanarak eşitlik (44) yeniden yazılırsa, eşitlik (45) elde edilir.

$$SDD(a,b) = \left[\frac{2^m\pi I_0(b)V(b)}{\sqrt{m(2m+1)!}}\right]a^{m+\frac{1}{2}}\left\{\left[\left(f_0 + \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)^m \exp\left(-a\left(f_0 + \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\right)\right]\left[\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b) + bf_0 + b\frac{\varphi'}{2\pi}\right)\right)\right]\right\} \quad (45)$$

Bu dönüşüm denkleminden faz değeri $\varphi(b) = arctan\left[\frac{ImW}{ReW}\right]$ şeklinde hesaplanır ve faz düzeltme işlemi uygulanır.

3.3.3 Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı Faz Yöntemi

Tek boyutlu bir ızgara sinyalinin GMD kullanılarak 1D SDD için gerekli ifadeler yerlerine konularak eşitlik (46) elde edilir.

$$SDD(a,b) = \sqrt{a}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[U(a\alpha)\left(2\left(\frac{exp(1)\gamma}{\beta}\right)^{\beta/\gamma}\right)(a\alpha)^{\beta}exp[-(a\alpha)^{\gamma}]\right]\left[\pi I_0(b)V(b)\left\{\delta\left(\alpha - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right][exp(ib\alpha)]\right\}d\alpha \quad (46)$$

Eşitlik (46) için için $a\alpha = t$ ve $d\alpha = dt/a$ dönüşümleri yapılarak yeniden yazılırsa,

$$SDD(a,b) = \sqrt{a}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[U(t)\left(2\left(\frac{\exp(1)\gamma}{\beta}\right)^{\beta/\gamma}\right)t^{\beta}\exp((-t)^{\gamma})\right]\left[\pi I_0(b)V(b)\left\{\delta\left(\frac{t}{a} - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right]\left[\exp(ib\frac{t}{a})\right]\right\}\frac{dt}{a} \quad (47)$$

$t > 0$ için $U(t) = 1$

$$SDD(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}}2\pi I_0(b)V(b)\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^{\beta/\gamma}\exp\left(\frac{\beta}{\gamma}\right)\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\left[t^{\beta}\exp(-t^{\gamma})\right]\left[\left\{\delta\left(\frac{t}{a} - f_0 - \frac{\varphi'(b)}{2\pi}\right)\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b)\right)\right)\right\}\right]\left[exp(ib\frac{t}{a})\right]\right\}dt \quad (48)$$

Eşitlik (40)'deki Dirac fonksiyonu özelliği kullanılarak yararlanarak eşitlik (48) yeniden yazılırsa, eşitlik (49) elde edilir.

$$SDD(a,b) = 2\pi I_0(b)V(b)\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^{\beta/\gamma}exp\ \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)a^{\beta+\frac{1}{2}}\left\{\left[\left(f_0 + \frac{\varphi'}{2\pi}\right)^{\beta}\exp\left(-\left(af_0 + a\frac{\varphi'}{2\pi}\right)^{\gamma}\right)\right]\left[\exp\left(i\left(\varphi(b) - b\varphi'(b) + bf_0 + b\frac{\varphi'}{2\pi}\right)\right)\right]\right\} \quad (49)$$

Bu dönüşüm denkleminden faz değeri $\varphi(b) = arctan\left[\frac{ImW}{ReW}\right]$ şeklinde hesaplanır ve faz düzeltme işlemi uygulanır.

3.3.4 Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı Faz Gradyan Yöntemi

Izgara sinyalinin dönüşüm denkleminden faz hesaplama için yukarıda açıklanan "faz"

yönteminden başka bir de “faz gradyan” yöntemi vardır. Eşitlik (49)’da SDD(a,b) denklemi, $Aexp(i(wt+\varphi))$ formunda bir dalga denklemidir. Bu nedenle eşitlik (49)’un gerçel kısmı genliği, eksponansiyel kısmın içi de fazı verir. Bu denklemin mutlak değerini almak boyunu bulmak demektir.

$$|SDD(a,b)| = [SDD(a,b).SDD^{*}(a,b)]^{1/2} \quad (50)$$

$$|SDD(a,b)| = \left[2\pi I_0(b)V(b)\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^{\beta/\gamma} exp\left(\frac{\beta}{\gamma}\right)\left(f_0+\frac{\varphi^{'}}{2\pi}\right)^{\beta}\right]\left\{a^{2\beta+1}\left[exp\left(-2a^{\gamma}\left(f_0+\frac{\varphi^{'}}{2\pi}\right)^{\gamma}\right)\right]\right\}^{1/2} \quad (51)$$

a_{max}’ı bulmak için eşitlik (51)’in a’ya göre 1. dereceden türevini sıfıra eşitlenirse, $\mathrm{a_{max}}$ ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$a_{max} = \left(\frac{2\beta+1}{2\gamma}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{2\pi}{2\pi f_0+\varphi^{'}(b)} \quad (52)$$

Faz ifadesi eşitlik (52)’den çekilerek aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\varphi^{'}(b) = \left(\frac{2\beta+1}{2\gamma}\right)^{1/\gamma} \frac{2\pi}{a_{max}} - 2\pi f_0 \quad (53)$$

Faz yönteminde zorunlu olarak yapılan faz düzeltme işlemine gerek kalmadan, doğrudan bu eşitlikle fazın gradyanının $\varphi^{'}(b)$ integralinden, o satır için faz dağılımı bulunumuş olur. Bu teknik, “SDD faz gradyan yöntemi” olarak adlandırılır (Dursun, Özder, ve Ecevit 2004).

3.3.5 1D SDD Faz Hesaplama Yöntemi Simülasyon Çalışması

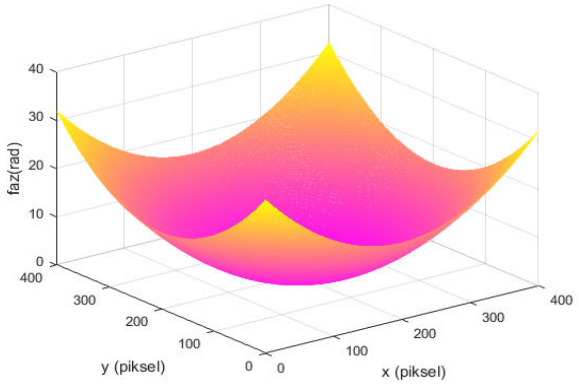
Önceki bölümde açıklanan 1D SDD algoritmasını test etmek amacıyla, aşağıda verilen ve şekil 7’de gösterilen, bir boyutlu faz fonksiyonu kullanılmıştır:

$$\varphi(x,y) = 0.0004[(x-200)^2 + (y-200)^2]. \quad (54)$$

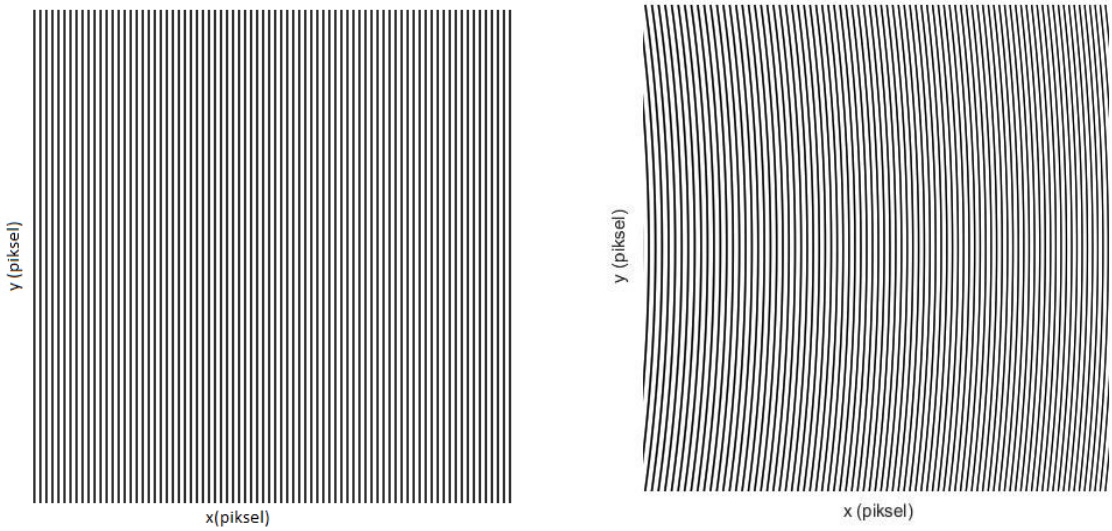
Denklem (33) ile verilen ızgara fonksiyonunda, arka plan parlaklığı $I_0(x,y) = 1.0$, ızgara görünürlüğü $V(x,y) = 1.0$ ve taşıyıcı frekansı $f_0 = 0.2$ (1/piksel) kabul edilerek,

$$h(x,y) = 1 + \cos(1{,}26x + 1{,}26y + \varphi(x,y)) \quad (55)$$

şeklinde tekrar yazılabilir. Burada $h(x,y) = 1 + \cos(1{,}26x + 1{,}26y)$ ızgara fonksiyonunda $\varphi(x,y)$ kadar bir faz kayması meydana gelmektedir. Fazın sıfır olduğu ve faz kaymasının olduğu durumlardaki ızgara desenleri şekil 8'de çizilmiştir.



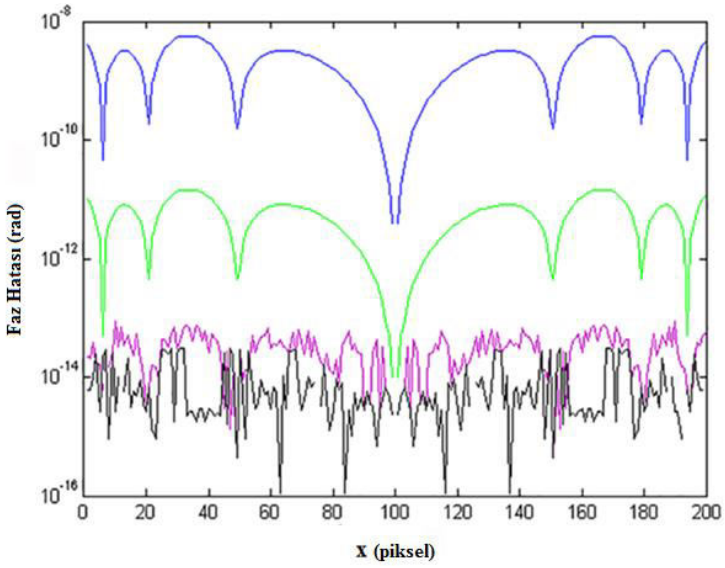
Şekil 7. Simülasyon fazı



Şekil 8 (a) Faz kaymasının sıfır olduğu durumda, x yönünde tek taşıyıcı frekansla oluşturulmuş ızgara sinyali ($f_{0x} = 0.2$) (b) faz eklenerek elde edilen ızgara deseni.

Denklem (55) ile verilen ızgara deseninden 1D SDD faz hesaplama yönteminde GMD, Morlet, ve Paul dalgacıkları kullanılarak her satır için faz değerleri hesaplanmış ve faz düzeltme işlemiyle doğru faz bilgileri elde edilmiştir. Bu işlem GMD'nin değişken parametreleri β ve γ [1,10] aralığında alınarak tekrarlanmıştır. En az hata ile sonuç veren parametrelerin belirlenmesi için faz hataları, hesaplanan faz değerleri ile simüle edilen faz değerleri arasındaki farkların mutlak değeri bulunarak değerlendirilmiştir.

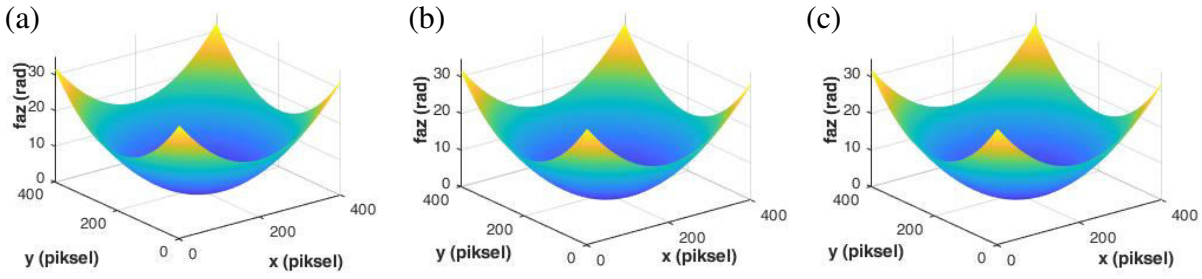
Tablo 2'de verilen belirsizlik değerleri incelendiğinde, en iyi çözünürlüğü γ = 3 değerinin verdiği ortaya çıkmaktadır. Test fazı ile GMD, Paul (m=10,20,30,40,50) ve Morlet dalgacıkları kullanılarak hesaplanan faz hataları farklı piksel numaraları için tablo 3'de verilmektedir. Bu tablodan da görülebileceği gibi GMD'nda γ ve β değerleri değiştiğinde yapılan faz hesaplarının hassasiyeti değişmektedir. Bu da GMD kullanılırken hangi γ ve β parametresinin seçileceği ile ilgili bilgi verir. Tablo 2 ve 3 göz önünde bulundurularak γ parametresi 3 seçilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonda ortalama faz hatası (γ, β) = (3, 3) için $2{,}3 \times 10^{-9}$rad; (γ, β) = (3, 5) için $5{,}5 \times 10^{-12}$rad; (γ, β) = (3, 7) için $3{,}3 \times 10^{-14}$rad ve (γ, β) = (3, 10) için $8{,}4 \times 10^{-15}$rad olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama göstermektedir ki; γ = 3 olarak alındığında β'nın artan değerleri için faz hatası azalmaktadır. Şekil 9'da, y=100 satırı için γ = 3 ve β = 3, 5, 7, 10 parametreleri kullanıldığında ortaya çıkan faz hataları gösterilmektedir. Bu sonuçlar değerlendirilerek çalışmanın devamında GMD'nın değişken parametreleri (γ, β) = (3, 10) olarak seçilmiştir. 1D SDD faz yönteminde GMD ((γ, β) = (3, 10)), Morlet ve Paul (m=10) dalgacıkları kullanılarak elde edilen faz düzeltme işlemi uygulanmış faz dağılımları simülasyon sonuçları şekil 10'da verilmektedir.



Şekil 9 *y* = 100 satırında GMD faz yöntemi ile hesaplanan faz hataları (*γ* = 3 ve *β* = 3 (mavi), *β* = 5 (yeşil), *β* = 7 (pembe) ve *β* = 10 (siyah))

Tablo 3. 1D SDD faz yönteminde GMD, Paul (m=10,20,30,40,50) ve Morlet dalgacıkları kullanılarak farklı piksel değerleri için hesaplanan faz hataları

		Piksel numarası (X×Y)			
		50×50	**100×100**	**200×200**	**300×300**
GMD (γ=3)	β				
	3	5.34×10^{-4}	3.51×10^{-4}	0.000	2.77×10^{-4}
	5	8.94×10^{-4}	5.61×10^{-4}	0.000	4.57×10^{-4}
	7	0.001	7.74×10^{-4}	0.000	6.29×10^{-4}
	10	0.001	0.000	0.000	8.93×10^{-5}
Paul	**m**				
	10	$5.53\ x10^{-4}$	$3.33\ x10^{-4}$	0.000	$2.98x10^{-4}$
	20	0.001	$6.73\ x10^{-4}$	0.000	$6.03x10^{-4}$
	30	0.002	0.001	0.000	$9.10x10^{-4}$
	40	0.002	0.001	0.000	0.001
	50	0.003	0.001	0.000	0.002
Morlet		0.002	0.001	0.000	$8.31\ x10^{-4}$



Şekil 10. 1D SDD faz yönteminde (a) GMD ((γ, β) = (3, 10)), (b) Morlet ve (c) Paul (m=10) dalgacıkları kullanılarak elde edilen faz düzeltme işlemi uygulanmış faz dağılımı.

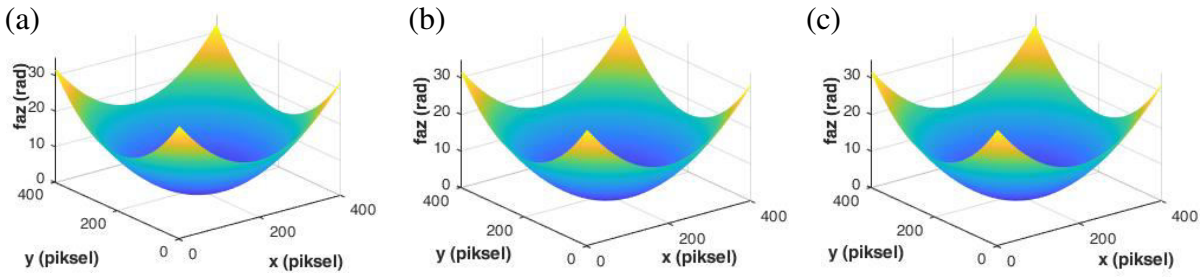
Ayrıca diğer bir faz hesaplama yöntemi olan 1D SDD faz gradyan yönteminde GMD, Morlet, ve Paul dalgacıkları kullanılarak, denklem (55) ile verilen ızgara deseninin her satır için faz gradyan hesaplanmıştır. Faz gradyan değerleri integre edilerek faz bilgilerine ulaşılmıştır. Bu işlem GMD'nin değişken parametreleri β ve γ [1,10] aralığında alınarak tekrarlanmıştır. En az hata ile sonuç veren parametrelerin belirlenmesi için faz hataları, hesaplanan faz değerleri ile simüle edilen faz değerleri arasındaki farkların mutlak değeri bulunarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4. 1D SDD faz gradyan yönteminde GMD, Paul (m=10,20,30,40,50) ve Morlet dalgacıkları kullanılarak farklı piksel değerleri için hesaplanan faz hataları

		Piksel numarası (X×Y)			
		50×50	**100×100**	**200×200**	**300×300**
GMD (γ=3)	β				
	3	0.7591	0.3117	0.0095	0.3307
	5	0.3066	0.3854	0	1.0191
	7	1.0537	0.8711	0	1.5428
	10	1.5845	0.9140	0.0231	0.9831
Paul	**m**				
	10	2.1806	0.8552	0.1146	1.3283
	20	1.6835	0.6275	0.1095	0.9102
	30	0.7971	0.5836	0.1988	0.7823
	40	0.6484	0.4886	0.1893	0.5534
	50	0.5731	0.4755	0.1826	0.4001
Morlet		0.6627	0.4445	0.3581	0.7494

Tablo 2'de verilen belirsizlik değerleri incelendiğinde, en iyi çözünürlüğü γ = 3 değerinin verdiği ortaya çıkmaktadır. Test fazı ile GMD, Paul (m=10,20,30,40,50) ve Morlet dalgacıkları kullanılarak 1D SDD faz gradyan yönteminden hesaplanan faz hataları farklı piksel numaraları için tablo 4'de verilmektedir. Bu tablodan da görülebileceği gibi GMD'nda γ ve β değerleri değiştiğinde yapılan faz hesaplarının hassasiyeti değişmektedir. Bu da GMD kullanılırken hangi γ ve β parametresinin seçileceği ile ilgili bilgi verir. Bu simülasyonda

ortalama faz hatası (γ, β) = (3, 3) için $0{,}4081$rad; (γ, β) = (3, 5) için $0{,}5764$ rad; (γ, β) = (3, 7) için $0{,}8769$ rad ve (γ, β) = (3, 10) için $0{,}7014$ rad olarak hesaplanmıştır. Tablo 4 göz önünde bulundurularak GMD'nin değişken parametreleri (γ, β) = (3, 3) olarak seçilmiştir. 1D SDD faz gradyan yönteminde GMD ((γ, β) = (3, 3)), Morlet ve Paul (m=50) dalgacıkları kullanılarak elde edilen faz dağılımları simülasyon sonuçları şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 12. 1D SDD faz gradyan yönteminde (a) GMD ((γ, β) = (3, 3)), (b) Morlet ve (c) Paul (m=50) dalgacıkları kullanılarak elde edilen faz düzeltme işlemi uygulanmış faz dağılımı.

3.4 Temel Izgara Yansıtma Deney Düzeneği

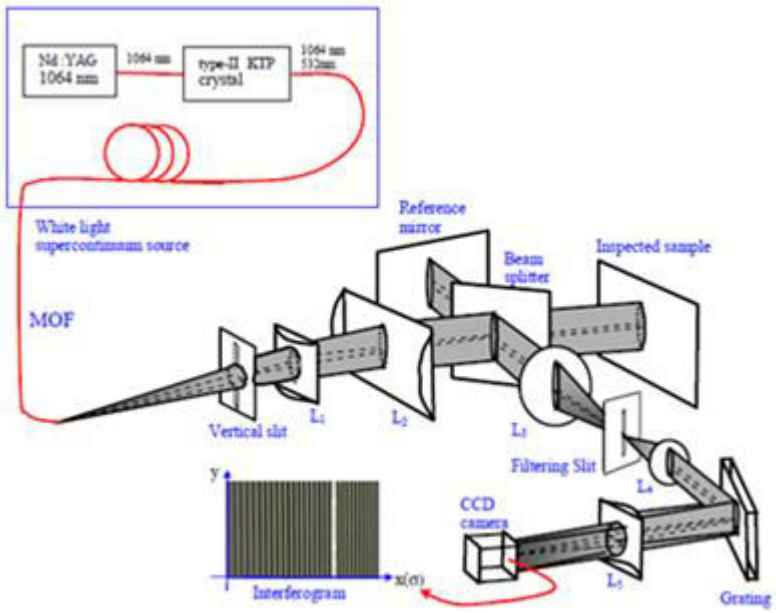
Bu bölümde, proje önerisinde yer alan 1 ve 2 numaralı iş paketi olan ölçüm sisteminin kurulumu öncelikle genel hatları ile açıklanmış, temel ızgara yansıtma kurulumu ile ilgili ayrıntılar verilmiştir.

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 düzlemdedir 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 ayı düzlemdedir. Fakat bunların optik eksenleri hedef cismin orta noktasına yakın bir yerde kesişirler (Takeda ve Mutoh 1983).

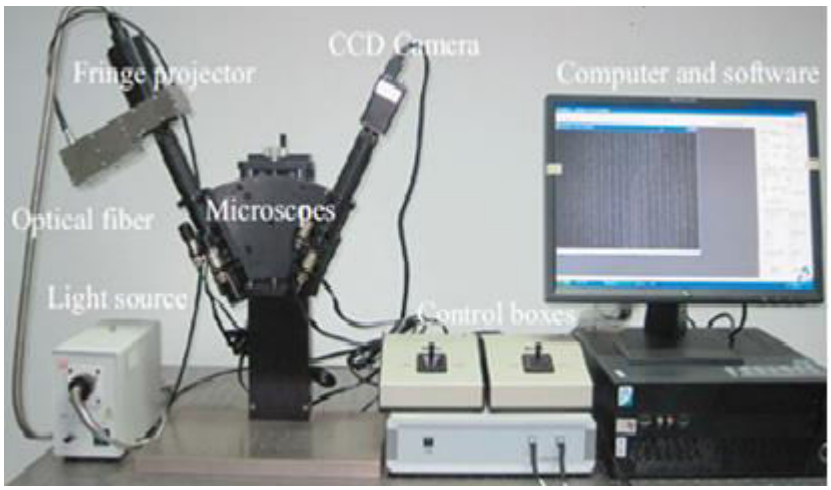
Cisme temas etmeden yapılan ızgara yansıtma tekniği ile mikrometre boyutunda ölçüm yapmak için birçok farklı deney kurulumu vardır. 2001 yılında küçük cisimlerin üç boyutlu (3D) ölçümleri için projeksiyon birimi olarak LCD projektör ve mikroskop, görüntü analiz birimi olarak da faz basamaklama yöntemi kullanılmıştır (Quan ve ark. 2001). Izgara 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 11' 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 11. Beyaz ışık interferometresi kurulumu (white light spectral supercontinuum interferometer) (Reolon ve ark. 2006)

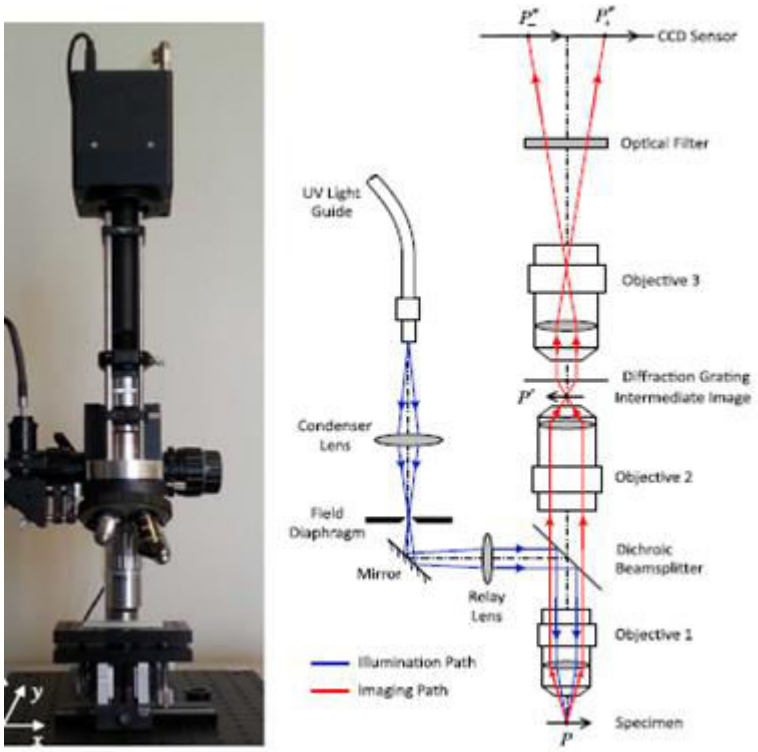
Başka bir çalışmada ise şekil 12' de gösterildiği gibi bir ızgara yansıtma projektörü, CCD kamera ve mikroskoptan oluşan deney düzeneği ile mikrometre boyutunda 3D profil ölçümü gerçekleştirilmiştir (Shi ve ark. 2013).



Şekil 12. 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 kurulumu da şekil 13' 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).

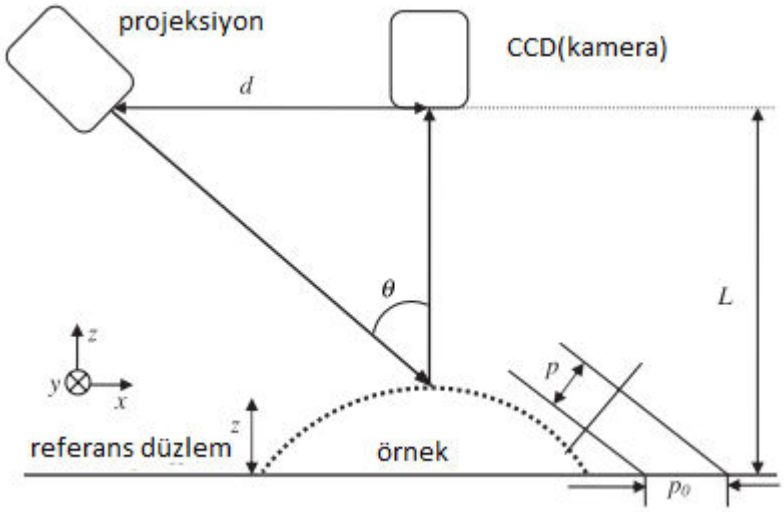


Şekil 13. 3D profil ve yer değiştirme ölçümü için kurulan optik mikroskop (Xia ve ark. 2014)

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).

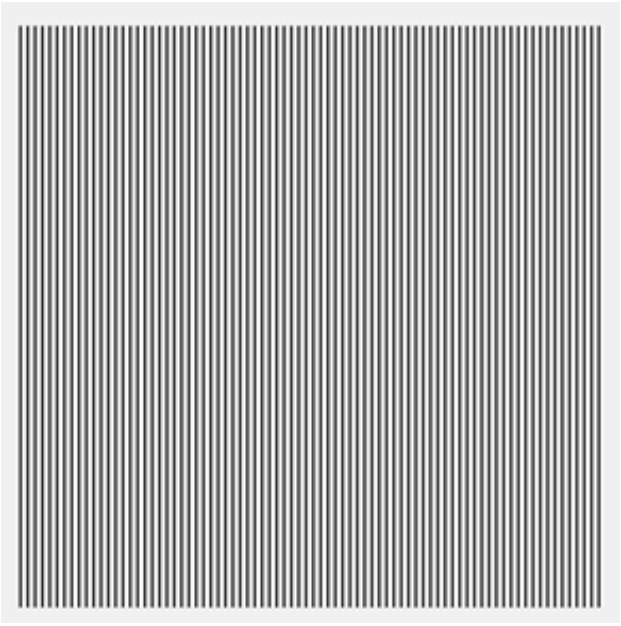
3.4.1 Temel Izgara Yansıtma Deney Düzeneğinin Kurulumu

Santimetre ve milimetre ölçeğinde cisimlerin ölçümü için kullanılan deney düzeneği, çapraz optik eksenli geometri kullanılarak şekil 14' de şematik olarak gösterilen ızgara yansıtma sistemi kurulmuştur.



Şekil 14. Kurulan temel ızgara yansıtma deney düzeneğinin şematik gösterimi

Bilgisayar programında şekil 15' de verilen sinüzoidal ızgara deseni oluşturulmuştur. Izgara yansıtma tekniğinde kullanılan ızgara deseninin bir satırını (y-piksellerini) gösteren, x yönünde değişen tek boyutlu ızgara sinyali denklem 33' de tanımlanmıştır (Afifi ve ark. 2002).



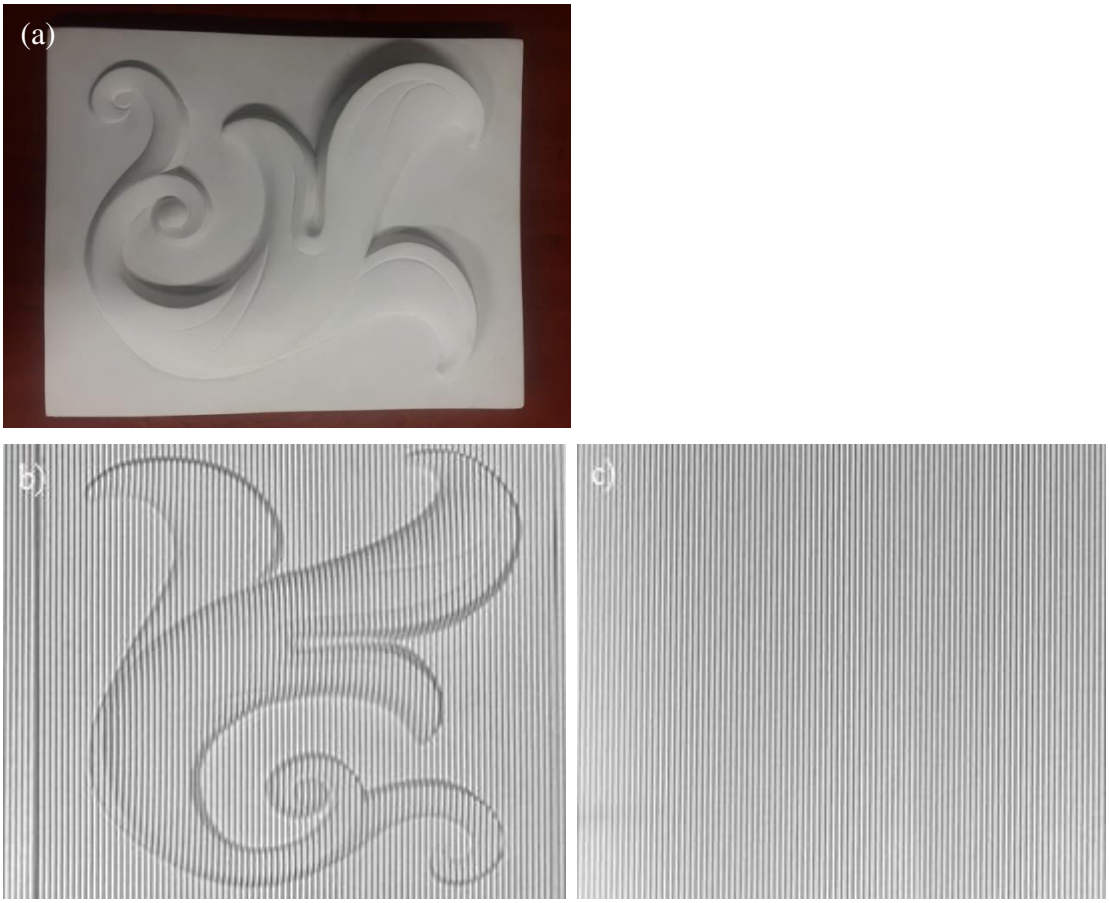
Şekil 15. Bilgisayar programıyla çizdirilen ızgara sinyalinin şekli

Bilgisayar programın da oluşturulan ızgara deseni projeksiyon ile 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.



Şekil 16. Çapraz optik eksenli geometride kurulan deney düzeneğinin kurulumu

Temel ızgara yansıtma deney düzeneği şekil 16' da gösterildiği gibi ayarlanmış ve cisimlerin görüntüleri alınmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan projeksiyon (Sharp XGA XR-10X) 1024x768 piksel çözünürlüğündedir. CCD kamera ise CANON - 400D, 10 mega piksel maksimum çözünürlüğe sahiptir. Çalışmada, kamera ile referans düzlem arası uzaklık $L = 146cm$, kamera-projektör arası uzaklık $d = 17cm$ ve ızgara periyodu $p_0 = 1/f_0 = 4{,}34$ mm olarak ölçülmüştür. Ölçümünü almak üzere santimetre boyutunda bir cisim olan alçıdan rölyef çiçek panosu kullanılmıştır. Sinüzoidal ızgara deseni yansıtılarak öncelikle referans daha sonra da cisim görüntüsü kaydedilmiştir. Şekil 17'de, boyutları 30-40 cm olan çiçek rölyefi fotoğrafı, üzerine ızgara deseni yansıtılmış hali ve referans görüntüsü verilmiştir.

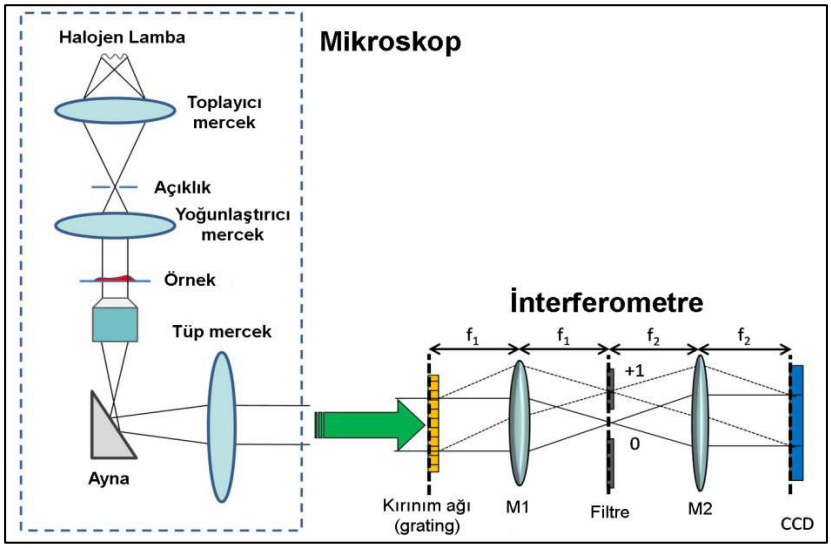


Şekil 17 a) Çiçek rölyefinin fotoğrafı b) Çiçek rölyefi üzerine x yönünde tek taşıyıcı frekansla (f_0 = 0,2) oluşturulmuş ızgara deseninin yansıtılmasıyla elde edilen görüntü ve c) referansı

3.5 Beyaz Işık Kırınım Faz Mikroskopisi Deney Düzeneği

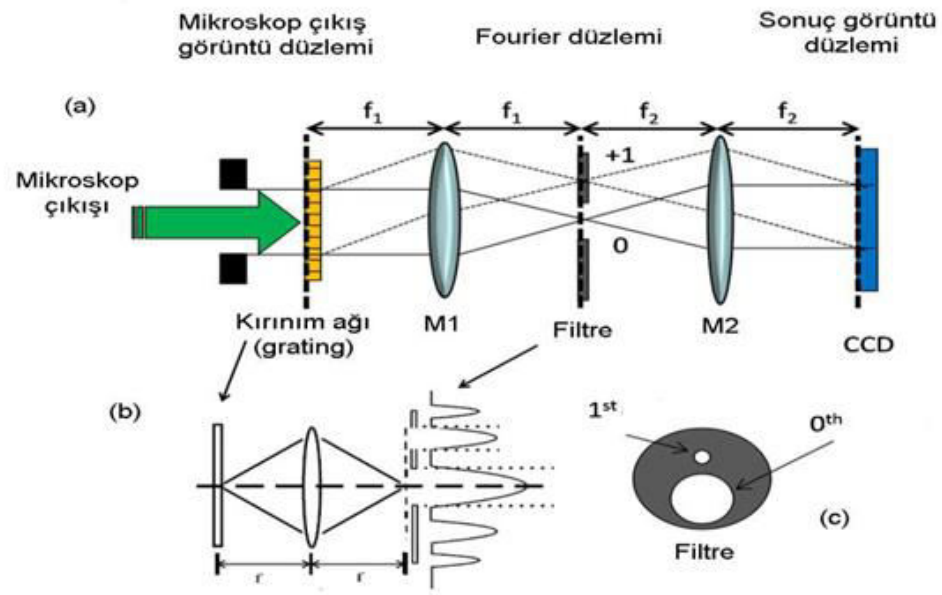
Bu bölümde, proje önerisinde yer alan 1 numaralı iş paketi olan ölçüm sisteminin kurulumu öncelikle genel hatları ile açıklanmış, BKFM kurulumu ile ilgili ayrıntılar verilmiştir. 2 numaralı iş paketinde geçen örneklerin hazırlanması ve BKFM ile görüntülenmesi gerçekleştirilmiş ve elde edilen görüntüler bu bölümde verilmiştir.

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. Şekil 18' de BKFM düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.



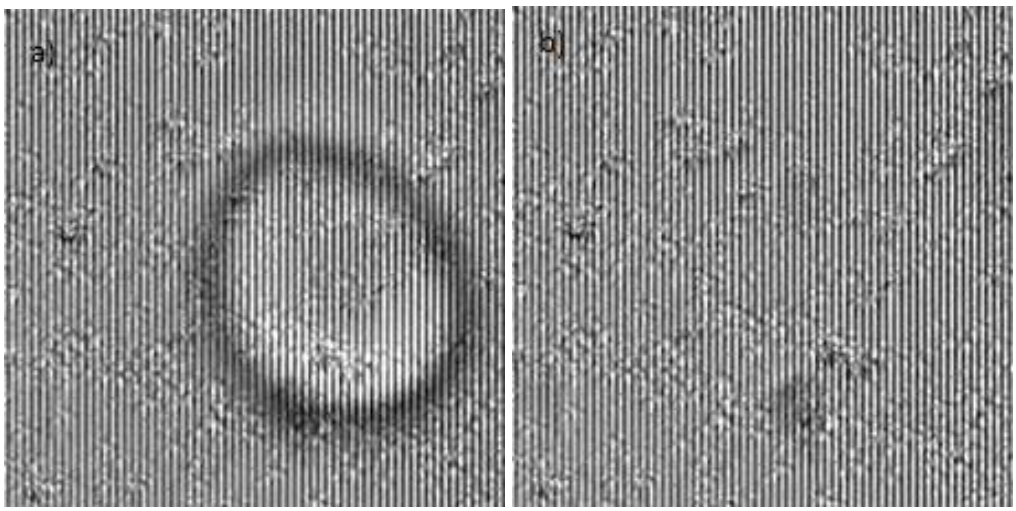
Şekil 18. Beyaz ışık faz kırınım mikroskobisi (BKFM) kurulumu (Pham ve ark. 2013)

Şekil 18' de verilen interferometre kurulumunun daha ayrıntılı haline şekil 19' 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 ve +1 ya da -1. görüntüler filtreden geçirilir. Daha sonra M2 merceğine gelen iki görüntü burada da CCD üzerinde çakıştırılarak, görüntü üzerinde girişim deseni oluşumu sağlanmış olur.



Şekil 19. (a) İnterferometre kurulumunun şeması; (b) Fourier düzlemine geçen görüntünün karakteri ve filtrelenmesi; (c) kullanılan filtrenin genel görünümü

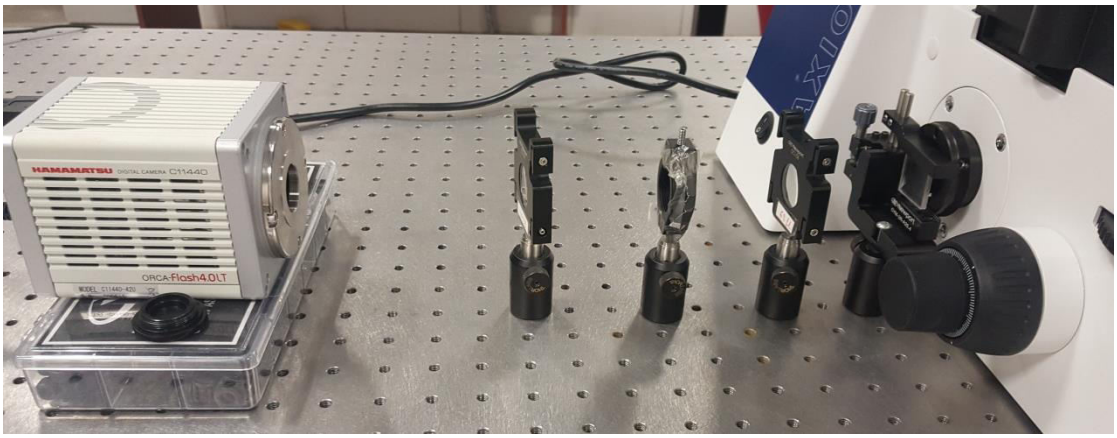
Çeşitli örneklerle yapılan ölçümler, ölçülen cisimlere göre 20X veya 40X objektif kullanılarak elde edilip analiz edilir. Bu düzenekle oluşması gereken görüntüler şekil 20 (a) ve (b) 'de gösterildiği gibidir (Kocahan ve ark. 2017).



Şekil 20. BKFM sisteminden elde edilen ve CCD' den gözlenen örnek bir girişim deseni a) örnekteki eğrilmeler b) referans görüntüsü

3.5.1 Beyaz Işık Kırınım Faz Mikroskopisi Deney Düzeneğinin Kurulumu

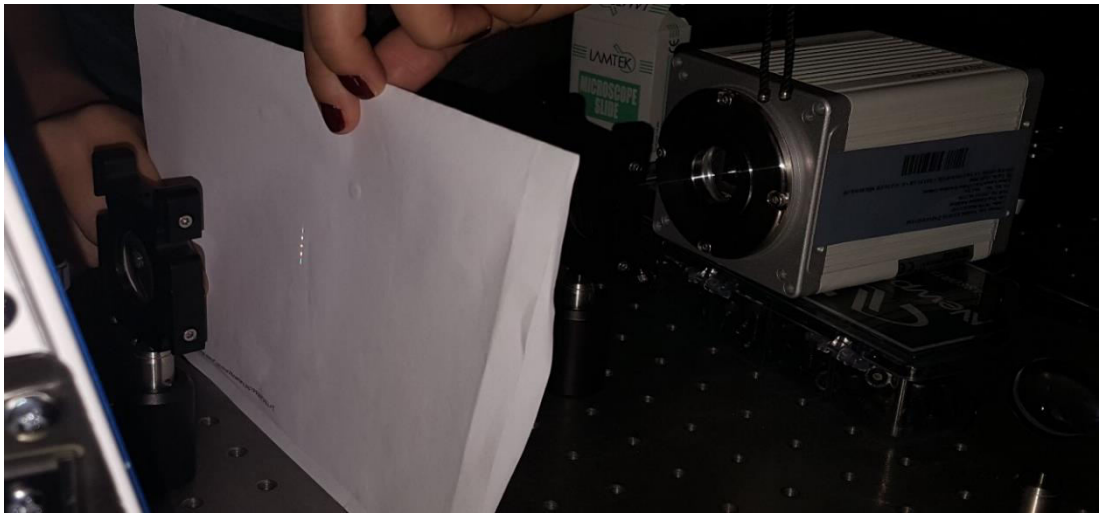
Şekil 21'de üç boyutlu yüzey profili oluşturma işlemi için kurulan BKFM deney sistemi gösterilmiştir. Deney düzeneğinde, halojen ışığa sahip Axio Observer A1, Zeiss inverted mikroskop ve Hamamatsu ORCA Flash CMOS kamera kullanılmıştır.



Şekil 21. 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^2 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 odaklanarak şekil 22' de verildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 22. Mikroskoptan alınan görüntü ile oluşan kırınım desen

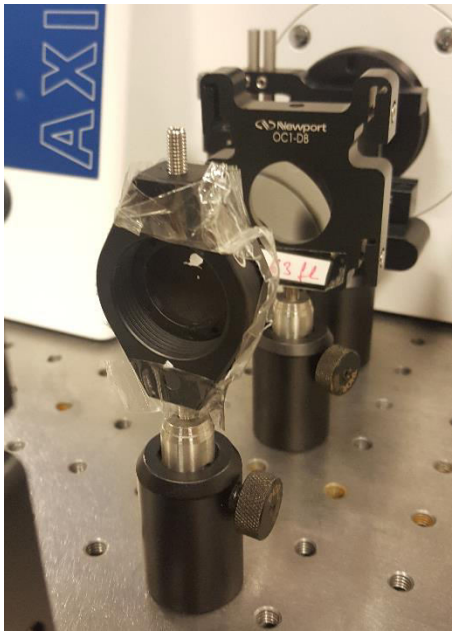
Mikroskoptan çıkan bir görüntü kırınım ağından geçtikten sonra şekil 22' deki gibi 5 adet görüntü bileşeni oluşturur. Farklı açılarda oluşturulan bu kopya görüntüler, M1 merceği ile odaklanarak filtre (pinhole) üzerine düşürülür. Farklı açılardaki bileşenlerden 0. mertebe (merkez) ile +1. mertebedeki (veya -1. mertebedeki) bileşenleri filtreden geçirilip diğer bileşen görüntülerin kameraya ulaşması engellenir.



Şekil 23. Filtreleme işlemi için kırınım deseninin filtre (pinhole) üzerine düşürülmesi

Filtreleme işlemi bu çalışmada büyük önem taşır (şekil 23). Laboratuvarda tasarlanan bir filtre (pinhole, aparture) kullanılarak bu sorun aşılmış ve ölçümler yapılmıştır. Bu işlem için tasarlanan filtre (pinhole) şekil 24' deki 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 $5 \times 2\ \mathrm{mm}^2$ boyutunda daha büyük olan kısım kullanılır.



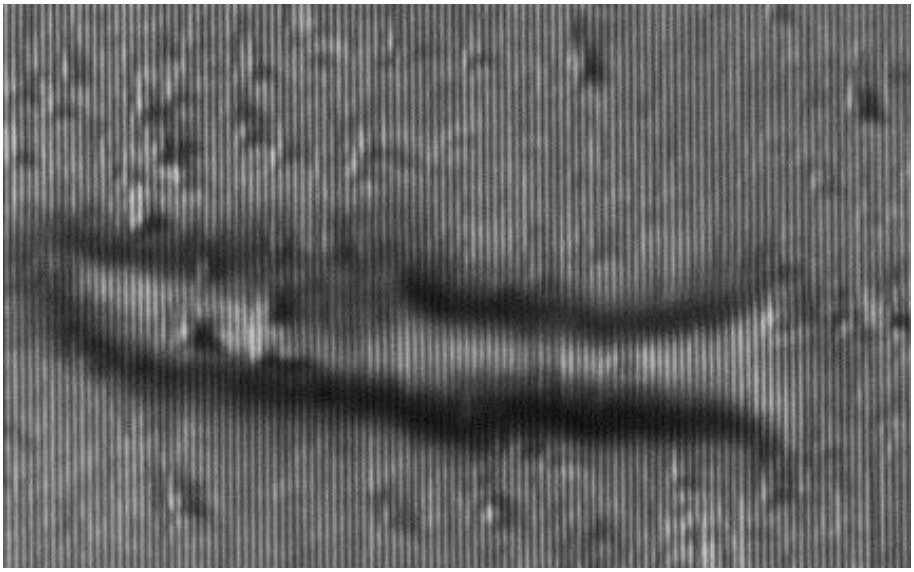
Şekil 24. Laboratuvar ortamında hazırlanan filtre

Filtreden geçmesine izin verilen 0. ve 1. bileşenler 150 mm odak uzaklığına sahip yakınsak M2 merceği ile kamera 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.

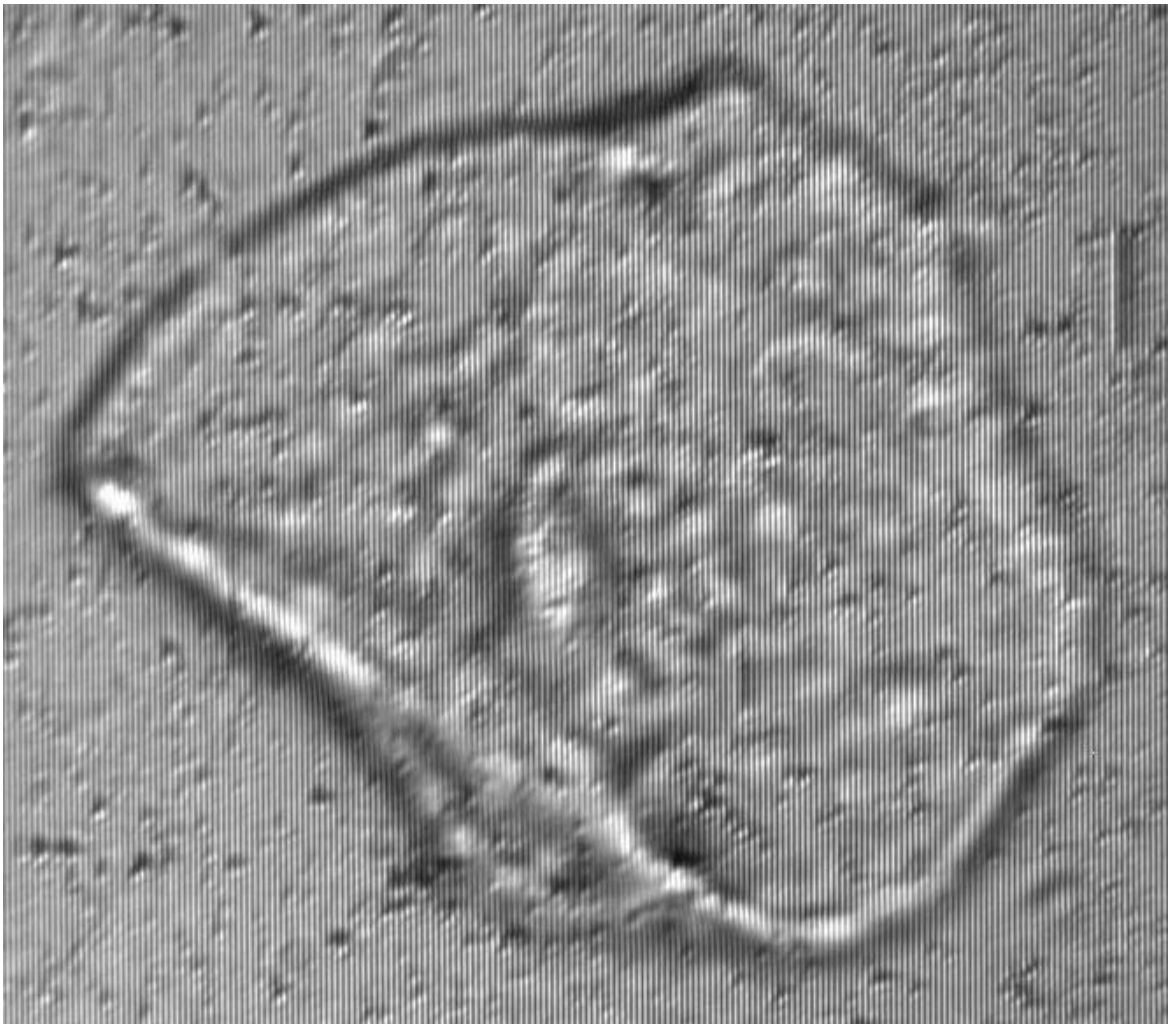
BKFM deney düzeneğinde farklı cisimler için görüntüleme denenmiştir. İnce film yüzeyini görüntülemek için deney düzeneğinde 40X büyütme kullanılmıştır. Kullanılan film,

daha önce kaplama işlemi yapılmış olup Kadmiyum- sülfür (CdS) ince filmidir. CdS ince film yüzeyinde bulunan birikinti incelenmiştir ve şekil 25'de bu birikintinin görüntüsü verilmiştir.



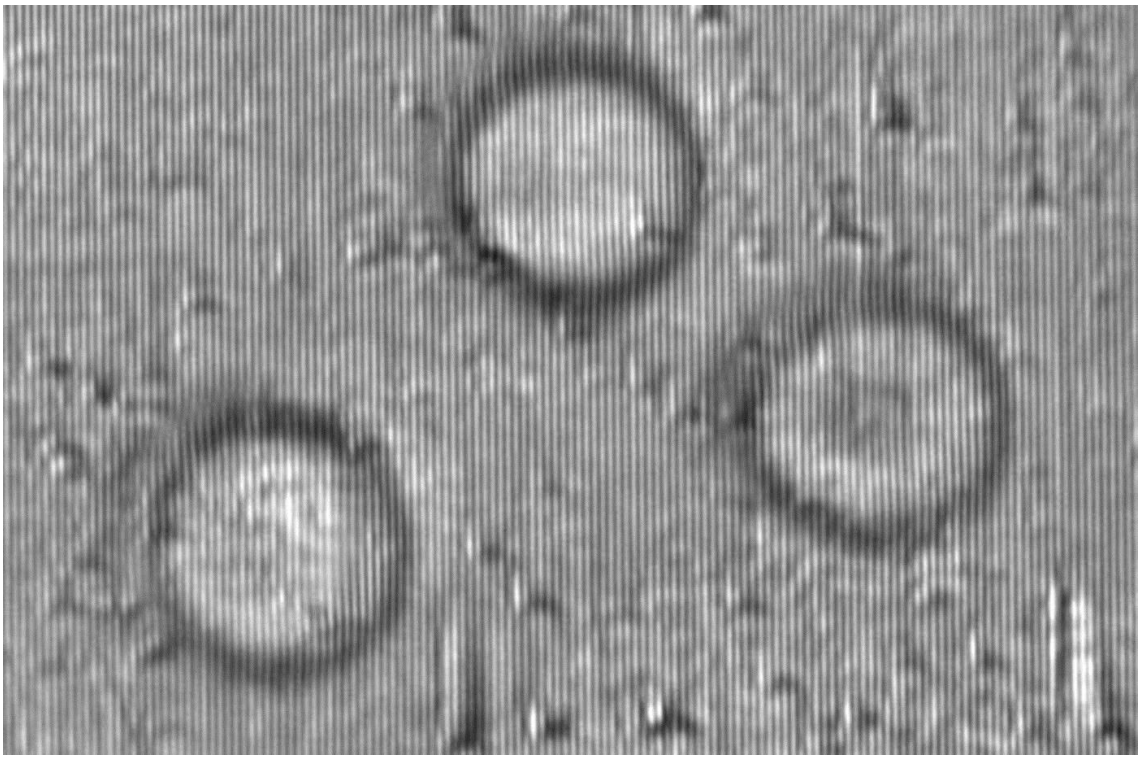
Şekil 25. BKFM deney kurulumundan elde edilen CdS ince film üzerindeki birikintinin interferogramı.

Benzer işlemler epitel doku örneğinde de yapılmıştır. Önce ağızdan çubuk yardımıyla doku örneği alınmıştır. Alınan bu doku örneği lamel üzerinde bırakılarak mikroskoba konmuştur. Şekil 26' da alınan epitel doku görüntüsü mevcuttur.

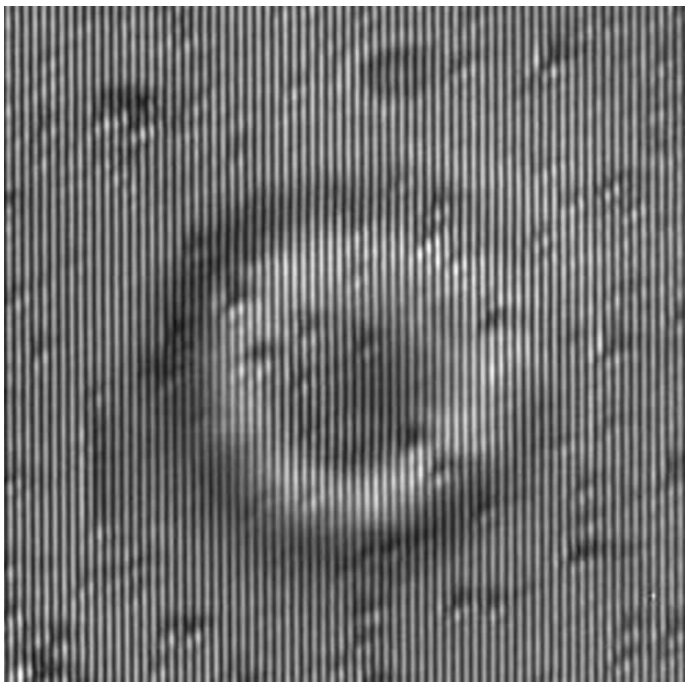


Şekil 26. Ağızdan alınan epitel doku örneği görüntüsü.

BKFM kurulumu yapılarak kan hücresi örneği de incelenmiştir. Bunun için parmaktan alınana kan örneği lamele yayılarak iyi bir görüntü elde etmek üzere mikroskop ayarlanmıştır. Buradan elde edilen görüntü şekil 27'de gösterilmiştir. Ayrıca, hücrenin tümünü net bir şekilde gözleyebilmek için kan örneği iki lamel arasına sıkıştırarak da ölçüm alınmıştır. Bu örneğin görüntüsü ise Şekil 28' de verilmiştir.



Şekil 27. BKFM deney kurulumundan elde edilen kırmızı kan hücresi görüntüsü.



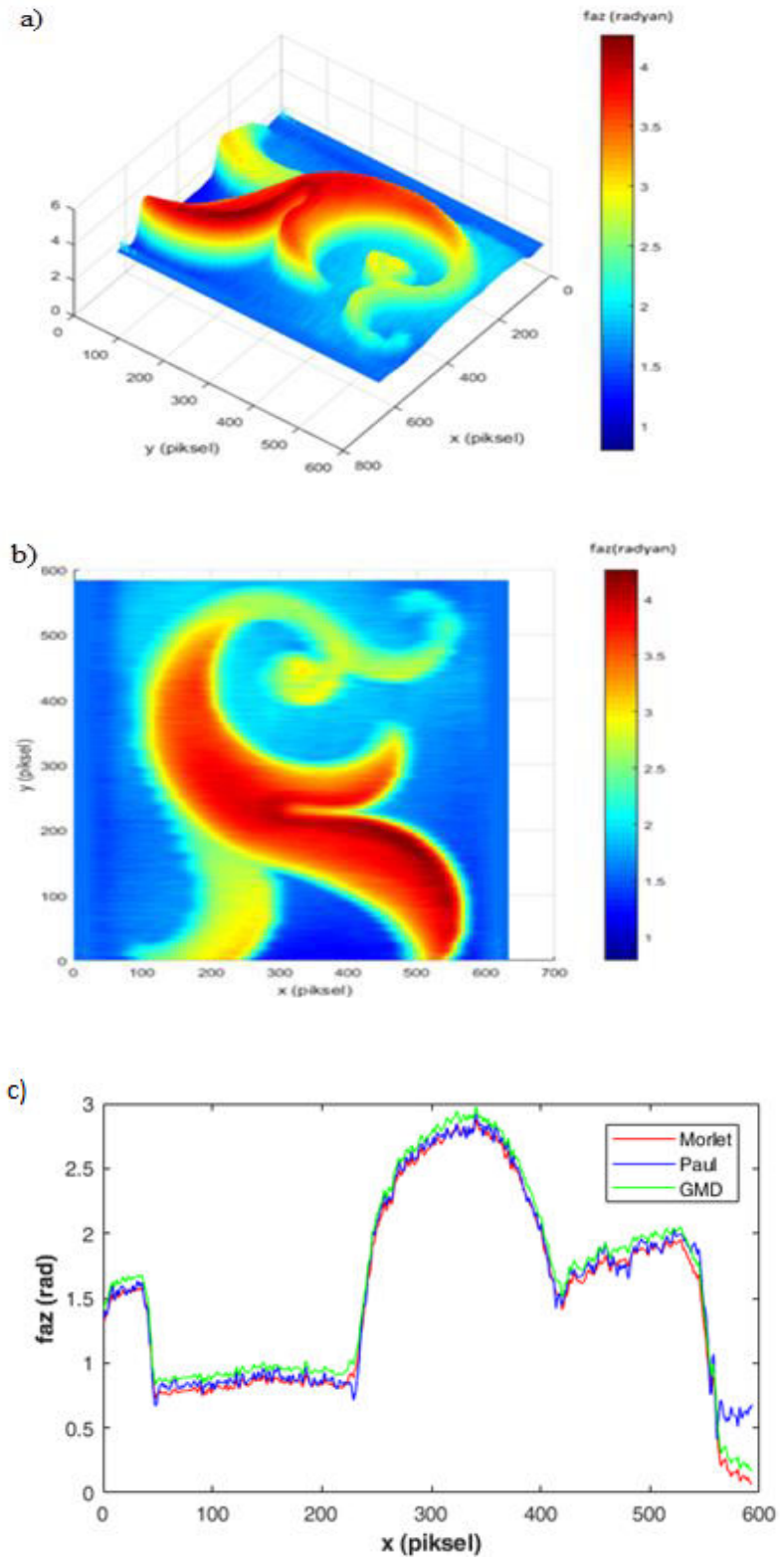
Şekil 28. BKFM deney kurulumundan elde edilen iki lamel arasına konulan kırmızı kan hücresi görüntüsü.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, 6 numaralı iş paketinde yer alan temel ızgara yansıtma ve BKFM deney düzenekleri ile elde edilen görüntülerin 1D SDD yöntemi ile yapılan analizleri ve elde edilen profiller açıklanmıştır.

4.1 Temel Izgara Yansıtma Deney Düzeneği ile Elde Edilen Bulgular

Bölüm 3.4' de gösterilen deney kurulumlarından elde edilen çiçek rölyefi görüntülerinden, GMD (($\gamma,\ \beta) = (3,\ 10)$) kullanılan 1D SDD faz yönteminde her satır için $\varphi_R(x,y)$ referans görüntünün ve $\varphi_O(x,y)$ cismin görüntüsünün faz değerleri hesaplanmıştır, ancak bu fazlarda süreksizlikler oluşmaktadır. Bu faz değerlerindeki süreksizlikleri düzeltmek için de faz düzeltme işlemi uygulanarak örnek cisim için bulunan faz dağılımı bilgisi $\varphi(x,y) = \varphi_R(x,y) - \varphi_O(x,y)$ cismin ve referans görüntünün faz dağılımlarının farkının alınmasıyla şekil 29'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Şekil 29 c' de ise GMD, Morlet ve Paul dalgacıklarıyla bulunan faz değerleri karşılaştırılmıştır. Bu basamakta elde edilen bilgiler ışığında mikrometre ölçeğinde bir cismin faz dağılımı hesaplanmış ve sonraki bölümde elde edilen bulgular verilmiştir.



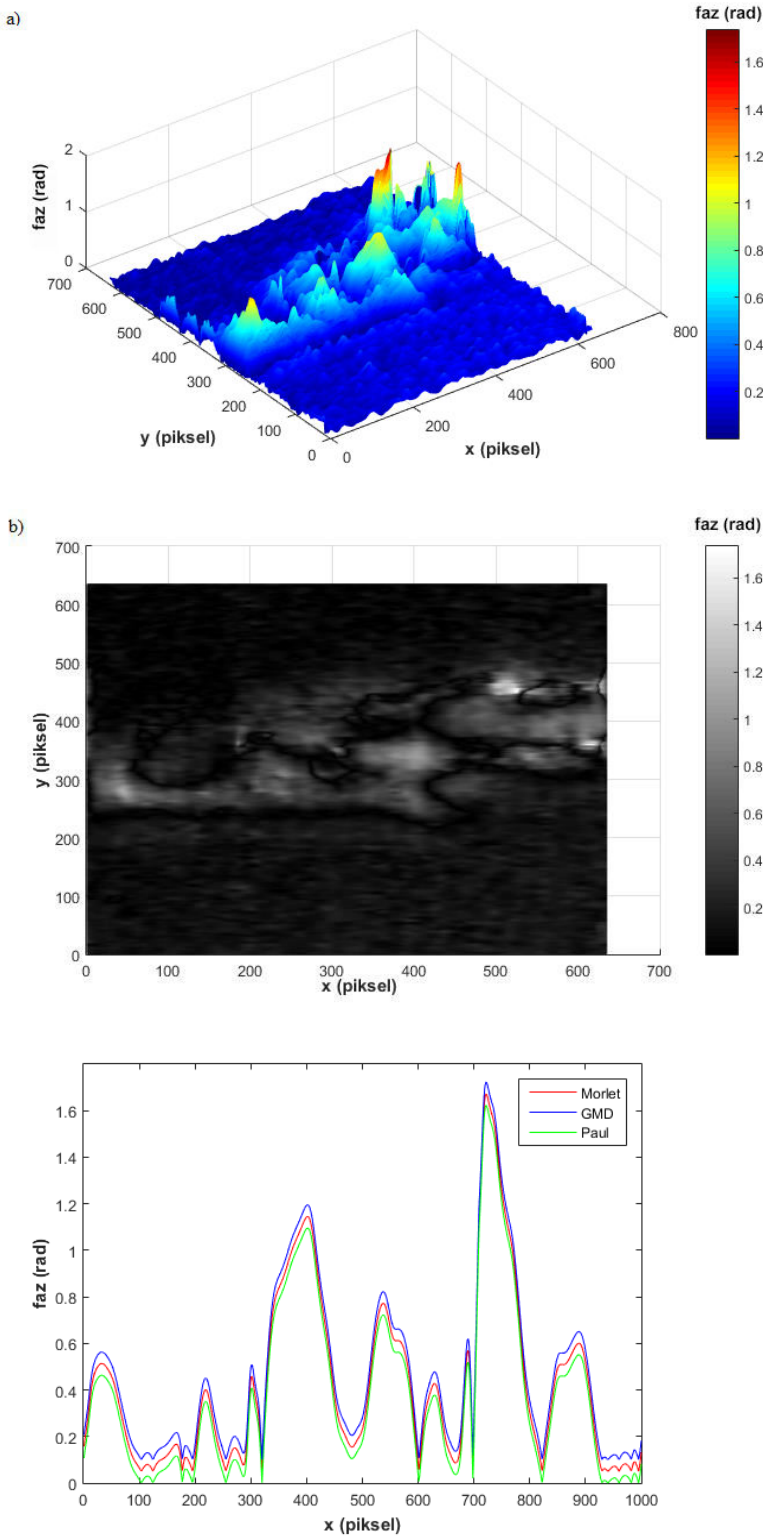
Şekil 29. Izgara yansıtma tekniğinde santimetre ölçeğinde analiz edilen çiçek rölyefinin faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 350$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (mavi), GMD (yeşil) ((γ, β) = (3, 10)).

4.2 Beyaz Işık Kırınım Faz Mikroskopisi Deney Düzeneği ile Elde Edilen Bulgular

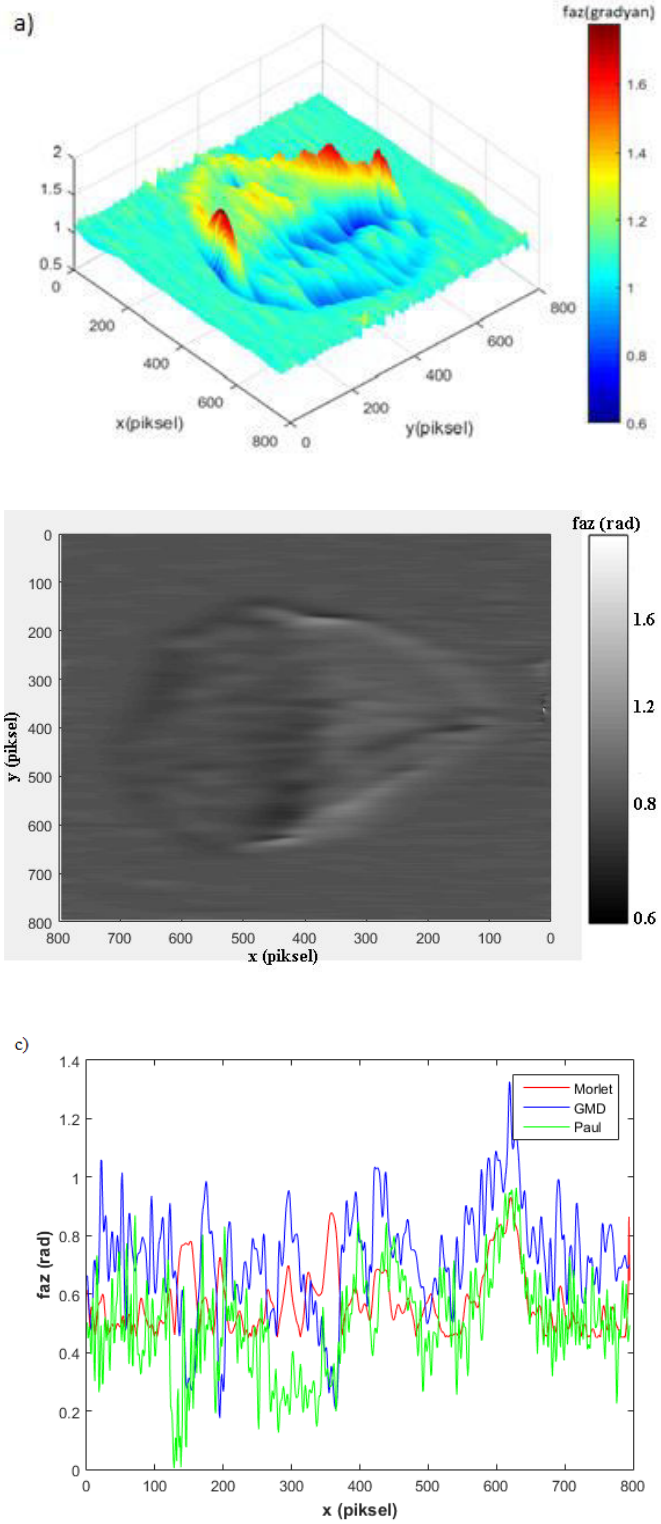
Bölüm 3.5' de gösterilen deney kurulumundan elde edilen görüntülerinden, GMD kullanılan 1D SDD faz yönteminde her satır için $\varphi_R(x,y)$ referans görüntünün ve $\varphi_O(x,y)$ cismin görüntüsünün faz değerleri hesaplanmıştır, ancak bu fazlarda süreksizlikler oluşmaktadır. Bu faz değerlerindeki süreksizlikleri düzeltmek için de faz düzeltme işlemi uygulanarak örnek cisim için bulunan faz dağılımı bilgisi $\varphi(x,y) = \varphi_R(x,y) - \varphi_O(x,y)$ cismin ve referans görüntünün faz dağılımlarının farkının alınmasıyla toplam faz dağılımı hesaplanmıştır.

Şekil 30' da Cds ince filmin yüzeyindeki bir birikintinin GMD ((γ, β) = (3, 10)) ile bulunan faz dağılımı ve $y = 350$. satır için Morlet ve Paul dalgacıkları ile elde edilen faz değerleri ile yapılan karşılaştırma gösterilmektedir.

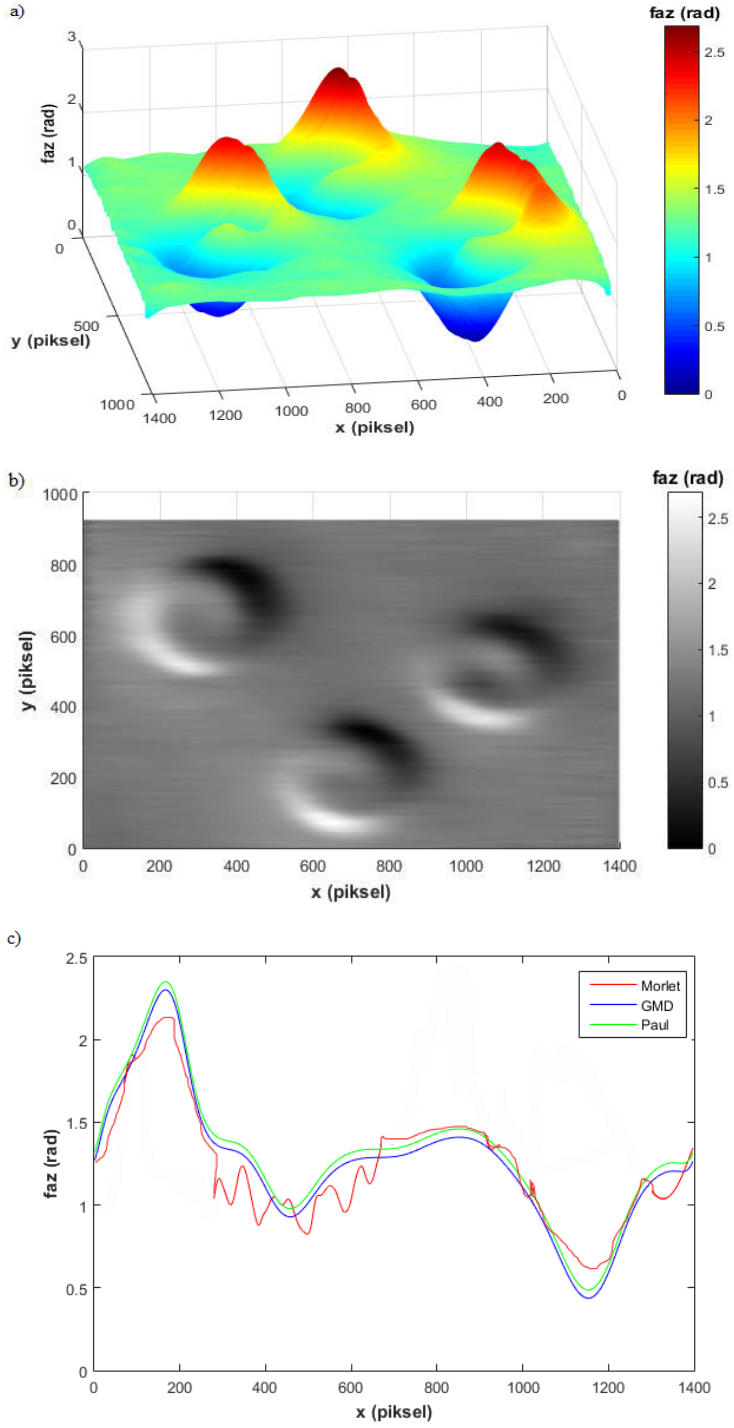
BKFM düzeneği ile görüntüsü alınan bir diğer örnek şekil 31' de gösterilen epitel doku örneğidir. Bu analiz için ağızdan çubuk yardımıyla epitel doku örneği alınmış ve diğer örneklerde olduğu gibi mikroskoba konularak üzerlerinde girişim deseni oluşması sağlanmış ve 1D SDD ile GMD kullanılarak faz dağılımı hesaplanmıştır. Şekil 31 c' de ise GMD, Morlet ve Paul dalgacıklarıyla bulunan faz değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 30. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen Cds ince filmin faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 350$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)).



Şekil 31. BKFM ölçüm sisteminden görüntülenen epitel hücrelerinin faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 300$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)).



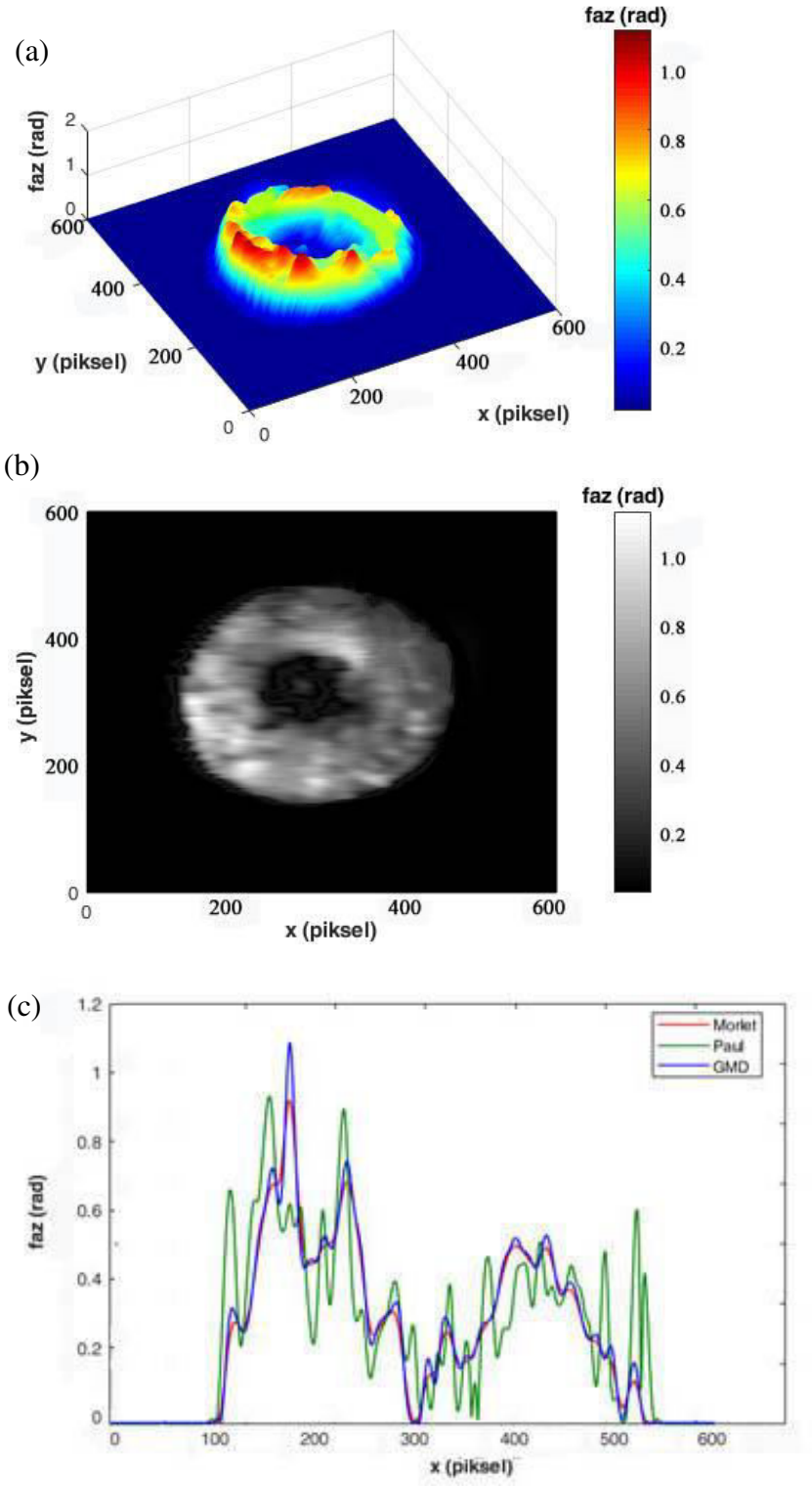
Şekil 32. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen kan hücrelerinin faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 600$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)).

BKFM düzeneği ile kırmızı kan hücreleri görüntülenmiş ve bunların faz değerleri hesaplanmıştır. Şekil 32' de GMD ile hesaplanan faz değerleri verilmiştir. Ayrıca, Morlet ve

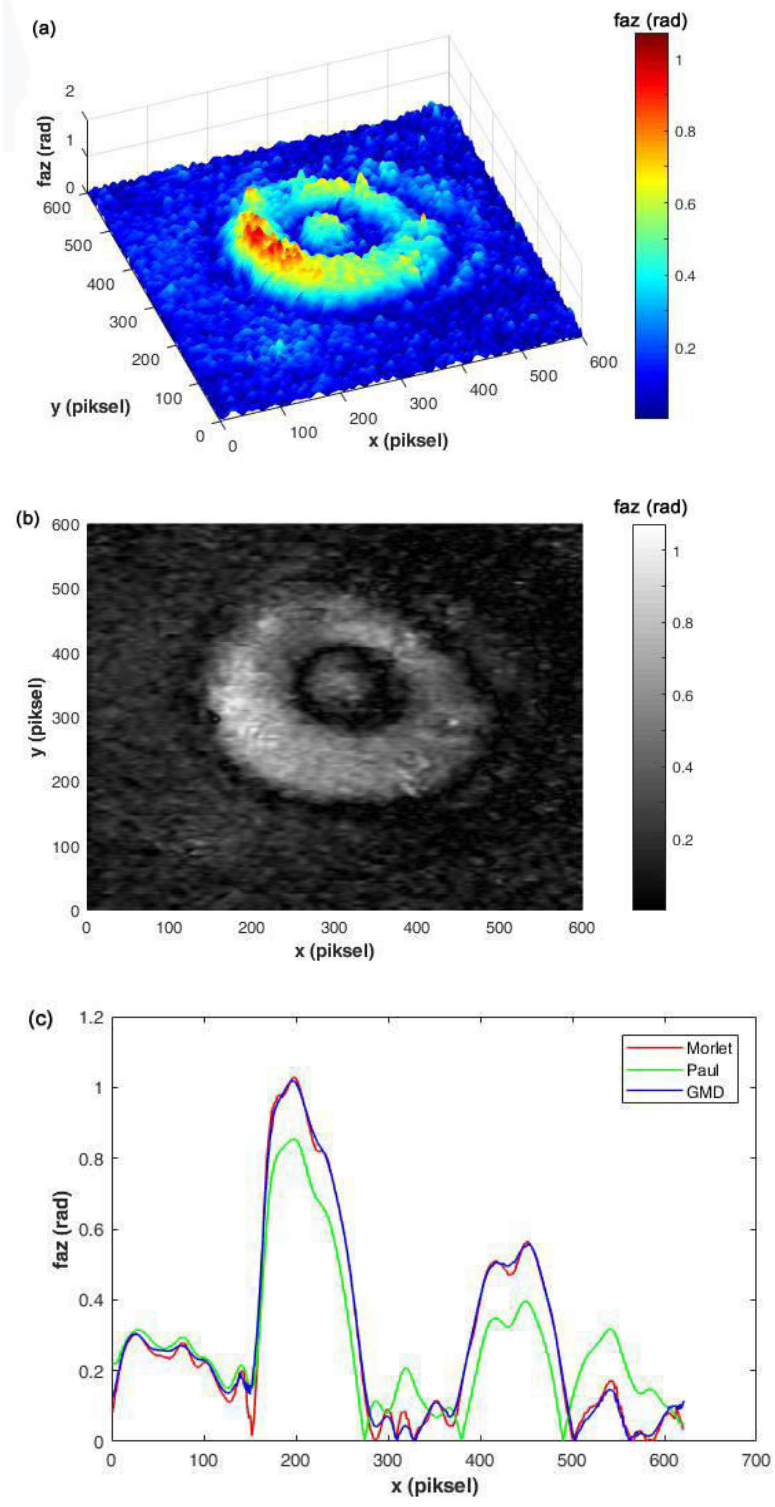
Paul dalgacıklarıyla bulunan faz değerleri ile karşılaştırılmıştır. Burada kan hücrelerinin üç tanesinin birlikte olduğu hali gösterilmiştir.

Şekil 32 (a)' da 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 bulunduğu plazmalarından kaynaklı oluşmuş sarkmalar olduğu öğrenilmiştir. Kan hücreleri plazma içinde eğik durdukları için analiz işlemi sonucu burada eğimli çıkmıştır. Gerçekte bulundukları 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 33' de verildiği gibi elde edilebilir. Bu şekilde 1D SDD faz yöntemi ile hesaplanan faz değerleri verilmektedir. 1D SDD faz gradyan yöntemi ile de aynı görüntü için analiz yapılmış ve şekil 34'de verilmiştir (O. Kocahan vd. 2018).

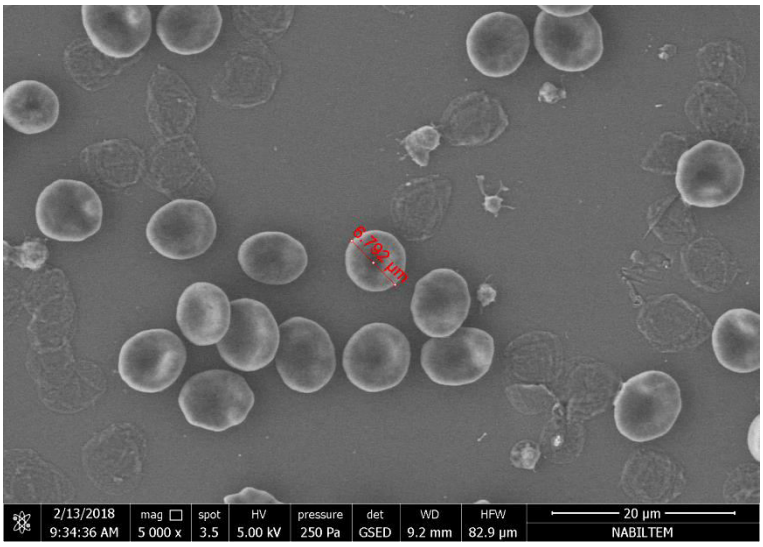
Kan hücresi ölçümleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM- scanning electron microscope) olarak adlandırılan ölçüm aleti de kullanılmıştır. Bu proje kapsamında SEM ile BKFM deney düzeneğini karşılaştırmak amacıyla kırmızı kan hücrelerinin SEM görüntüleri, NABİLTEM'de (Namık Kemal Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuarı) bulunan FEI-Quanta FEG250 yüksek çözünürlüklü SEM cihazıyla Gsed (Gaseous detection device) detektöründe elde edilmiştir. 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. Kan hücreleri için yapılan görüntüleme sırasında, hücrelerin birçoğunun SEM cihazı içindeyken basınç ve sıcaklıktan dolayı patladığı ve parçalandığı görülmüştür (bkz şekil 35). Ayrıca SEM görüntülerinin elde edilmesi için kan numunelerinin bir ön hazırlık işlemine tabi tutulması gerekmiştir (Buys vd. 2013). SEM görüntüleme için örnek hazırlığı işlemi de yine NABİLTEM tarafından yapılmıştır. Sağlıklı ve ilaç kullanmayan insandan alınan kan örneğinden elde edilen kırmızı kan hücresi SEM görüntüleri şekil 35'de gösterilmiştir.

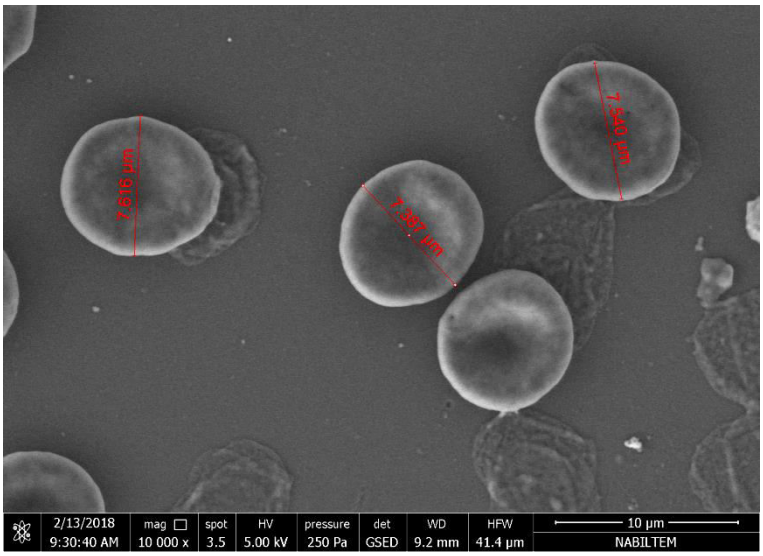


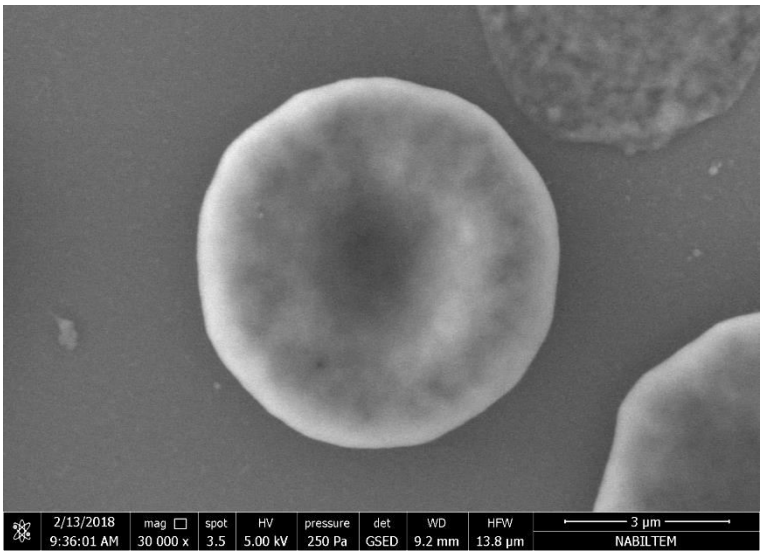
Şekil 33. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin 1D SDD faz yöntemi ile elde edilen faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 300$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)).



Şekil 34. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin 1D SDD faz gradyan yöntemi ile elde edilen faz dağılımının a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 300$. satır için çizilen faz değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=50) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 3)).



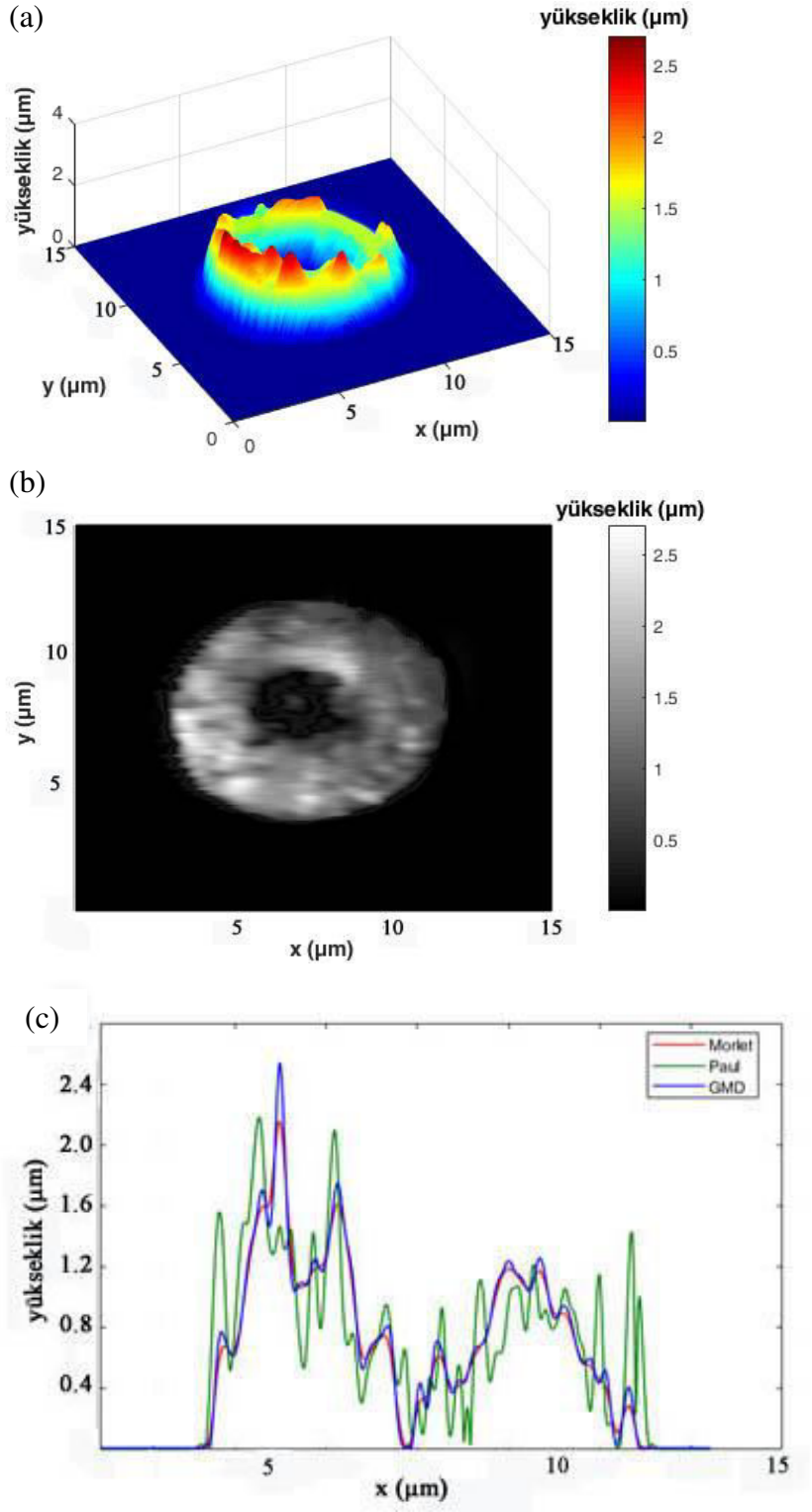




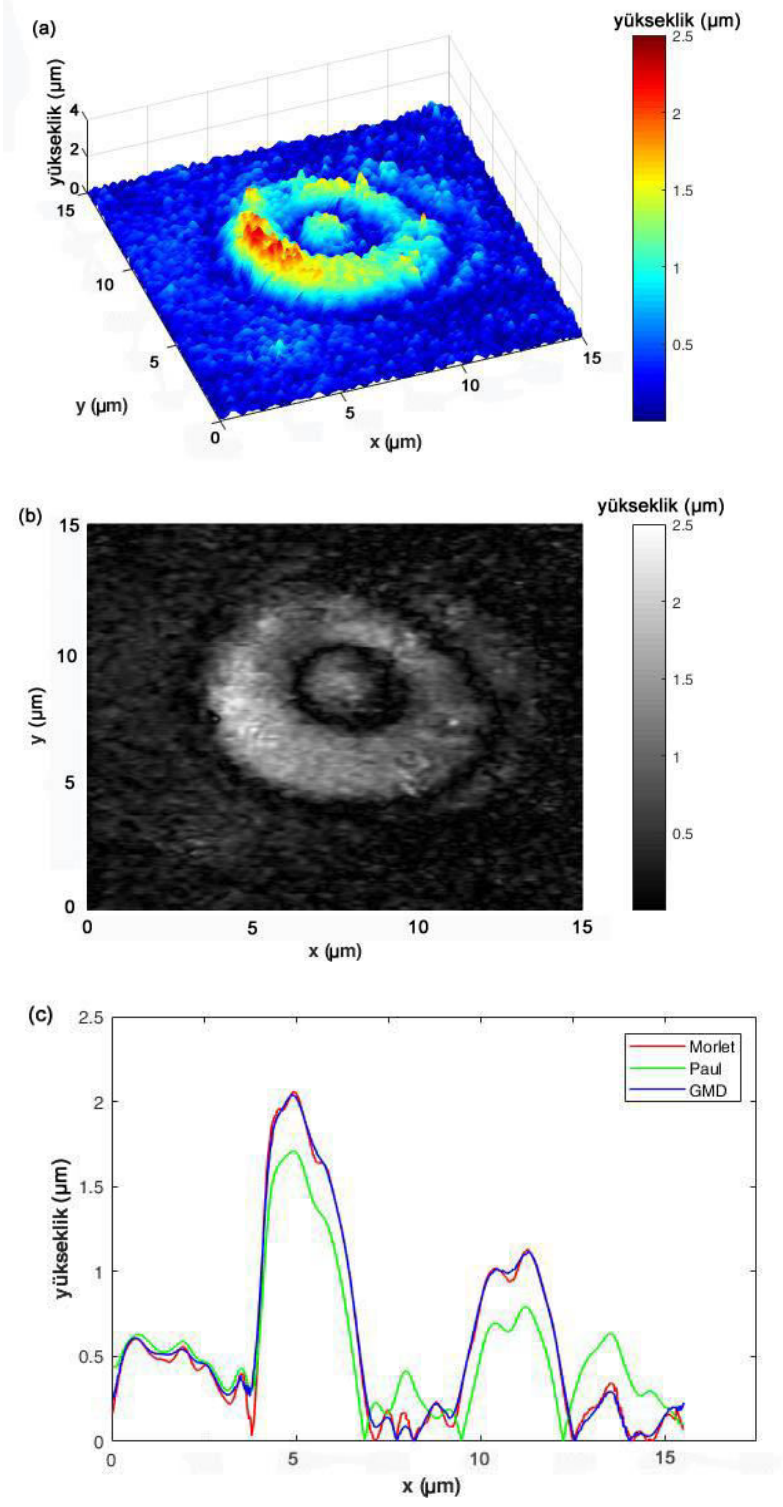
Şekil 35. SEM ile elde edilen kırmızı kan hücrelerinin görüntüsü

SEM ile elde edilen görüntülerde kırmızı kan hücrelerinin çapı 7,5 μm civarında ölçülmüştür. Karşılaştırma amacıyla BKFM deney düzeneği ile elde edilen kan hücresi profili faz değerinden yüksekliğe çevrilmiştir. Mikroskopta kullanılan beyaz ışığın orta dalgaboyu λ = 550 nm olmak üzere yükseklik değerleri $Z(x,y) = \lambda\varphi(x,y)/\left|2\pi(n_c - n_p)\right|$ (Popescu vd. 2006) denkleminden hesaplanmıştır. Burada kırmızı kan hücresinin kırılma indisi n_c = 1.41 ve hücreyi çevreleyen kan plazmasının kırılma indisi n_p = 1.34'dir. Yükseklik ekseni μm birimine çevrildiği için, yatay eksenler de piksel biriminden μm birimine dönüştürülmelidir. Bunun için kullanılan Hamamatsu ORCA Flash CMOS kameranın teknik detayları ile ilgli dönküman incelendiğinde 2048x2048 piksel büyüklüğündeki görüntünün bir hücresi 6,5 μm olarak verildiği görülmüştür. Ayrıca mikroskopta kullanılan objektif 40X büyütme yapmaktadır. Buna ek olarak interferometrede kullanılan merceklerin sağladığı toplam büyütme 2,38X olarak hesaplanmıştır. Bu büyütmeler dikkate alındığında kaydedilen ham görüntünün bir pikselinin boyu ve eni 0,0683 μm olarak bulunmuştur. Elde edilen bu ham görüntüye zenginleştirme işlemi uygulandığında görüntü boyutu değişmektedir. Bu değişim miktarına göre ölçeklendirildiğinde şekil 36'da verildiği gibi çapının 7,5 μm civarında olduğu görülebilir. Ayrıca 1D SDD faz gradyan yöntemi ile hesaplanan faz değerleri yüksekliğe çevrildiğinde şekil 37'de gösterildiği gibi kırmızı kan hücresi profili elde edilmiştir (O. Kocahan vd. 2018).

Bu bölümde, proje önerisinde yer alan 6 numaralı iş basamağı için elde edilen bulgular verilmiştir. BKFM ile alınan farklı örneklerin ızgara desenli görüntüleri, hazırlanan GMD ile 1D SDD programında işlenerek doğru yükseklik (faz dağılımı) bilgisi elde edilmiş ve bu iş paketi başarıya ulaşmıştır. Görüntüler, Morlet ve Paul dalgacıkları için yazılan programla da analiz edilerek karşılaştırılmıştır. SEM ölçümleriyle sonuçların denetlenmesi için kan örnekleri kullanılmıştır.



Şekil 36. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin 1D SDD faz yöntemi ile elde edilen yükseklik değerleri; a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 300$. satır için çizilen yükseklik değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=10) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 10)).



Şekil 37. BKFM ölçüm sisteminde görüntülenen iki lamel arasına sıkıştırılan kan hücrelerinin 1D SDD faz gradyan yöntemi ile elde edilen yükseklik değerleri; a) 3D profil görünümü; b) karşıdan görüntüsü; c) $y = 300$. satır için çizilen yükseklik değerleri (Morlet (kırmızı), Paul (m=50) (yeşil), GMD (mavi) ((γ, β) = (3, 3)).

5. SONUÇ

Bu çalışmada, 1D SDD faz yönteminde GMD kullanılarak faz hesaplanması için algoritmanın geliştirilmesi sunulmuştur. GMD, değişken iki parametreye sahiptir ve bu parametrelerin değişmesi lokalizasyon özelliğini etkilemektedir. Tablo 2'de verilen belirsizlik değerleri ışığında $\gamma = 3$ en iyi belirsizlik değerini verdiği için seçilmiştir. Tablo 3'ten görülebileceği gibi GMD için, γ ve β değerleri değiştiğinde hesaplanan faz hatası değeri değişmektedir. Faz hesaplama işlemi simülasyon fazı ile farklı β değerleri için tekrarlanmış ve β'nın artan değerleri için faz hatasının azaldığı görülmüştür. Bu nedenle GMD'nın değişken parametreleri (γ, β) = (3, 10) olarak seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışması Paul ve Morlet dalgacıkları ile de tekrarlanmış ve sonuçlar tablo 3'de karşılaştırılmıştır. Benzer simülasyonlar 1D SDD faz gradyan yöntemi ile de tekrarlanmıştır. Buradan da görülebileceği gibi en düşük faz hatası değeri 1D SDD faz yönteminde GMD kullanımında elde edilmiştir. Böylece, projenin birinci hedefi olan daha düşük hata ile faz hesaplanması gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3.4' de gösterilen deney kurulumlarından elde edilen çiçek rölyefi görüntülerinden GMD, Morlet ve Paul dalgacıklarıyla bulunan faz değerleri karşılaştırılmıştır. Bu basamakta elde edilen bilgiler mikrometre ölçeğinde bir cismin faz dağılımı hesabında yol gösterici olmuştur. Proje önerisinde yer alan 6 numaralı iş basamağı için elde edilen bulgular şekil 30, 31, 32 ve 35'de verilmiştir. BKFM ile alınan ince film yüzey birikintisi, epitel doku ve kırmızı kan hücresi görüntüleri, hazırlanan GMD ile 1D SDD programında işlenerek 3D, dinamik (her açıdan gözlenebilen) ve her noktada yüksekliği (faz dağılımı) bilinen profilleri oluşturulmuştur. Böylece proje önerisinde yer alan ikinci hedefe ulaşılmıştır. Görüntüler, Morlet ve Paul dalgacıkları için yazılan programla da analiz edilerek karşılaştırılmıştır. SEM ölçümleriyle sonuçların denetlenmesi için kan örnekleri kullanılmıştır.

SEM de alınan görüntü ile BKFM deney kurulumundan elde edilen analiz sonucu karşılaştırıldığında; BKFM ile yapılan ölçümün hassasiyetinin deneyde kullanılan mikroskop, objektif, mercekler ve CCD'nin gücüne bağlı olarak benzer ölçeklere inebildiği görülmüştür. Üstelik BKFM ile elde edilen sonuç 3 boyutlu olarak gösterilebilmektedir. Bunun yanı sıra örnekle temas olmaması, örneğe zarar vermemesi ve bir ön hazırlık işlemi gerektirmemesi bakımından BKFM deney düzeneğinin daha üstün ölçüm yeteneğine sahip olduğu görülebilir.

Bu çalışma kapsamında kurulan BKFM deney sistemi ile ince film yüzey morfolojisinin genelleştirilmiş Stockwell dönüşümü ile belirlenmesi konulu BAP (Namık Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi) projesi kabul edilmiştir. Ayrıca, kırmızı kan hücrelerinin morfolojik değişimlerinin incelenmesiyle ilaç etkileşimi ve hastalık tanısı konularında yeni projeler hazırlanmaktadır. Özellikle Alzheimer hastalarında kırmızı kan hücresi morfolojisini inceleyen ve literatürde çok yeni olan çalışmalar bulunmaktadır. Farklı disiplinlerle ortak olarak önerilmesi planlanan yeni projeler ile bu konuların derinlemesine incelenmesi, konu ile ilgili uzman-araştırmacı yetiştirilmesi, proje ekibinin bundan sonraki hedefleridir.

KAYNAKLAR

Addison, Paul S. 2002. *The Illustrated Wavelet Transform Handbook*. *Institute of Physics Publishing*. IOP. doi:10.1201/9781420033397.

Addison, Paul S. 2005. "Wavelet transforms and the ECG: a review." *Physiological measurement* 26 (5): R155-99. doi:10.1088/0967-3334/26/5/R01.

Afifi, M, A. Fassi-Fihri, M Marjane, K Nassim, M Sidki, ve S Rachafi. 2002. "Paul wavelet-based algorithm for optical phase distribution evaluation". *Optics Communications* 211 (1–6): 47–51. doi:10.1016/S0030-4018(02)01828-X.

Afifi, M, A Fassi-fihri, M Marjane, K Nassim, M Sidki, ve S Rachafi. 2002. "Paul wavelet-based algorithm for optical phase distribution evaluation" 211 (October): 47–51.

Berryman, Fiona, Paul Pynsent, ve 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. doi:10.1016/S0143-8166(02)00071-4.

Bhaduri, Basanta, Hoa Pham, Mustafa Mir, ve Gabriel Popescu. 2012. "Diffraction phase microscopy with white light." *Optics letters* 37 (6): 1094–96. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23292428.

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.

Buys, Antoinette V, Mia-Jean Van Rooy, Prashilla Soma, Dirk Van Papendorp, Boguslaw Lipinski, ve Etheresia Pretorius. 2013. "Changes in red blood cell membrane structure in type 2 diabetes: a scanning electron and atomic force microscopy study". *Cardiovascular Diabetology* 12 (1). Cardiovascular Diabetology: 25. doi:10.1186/1475-2840-12-25.

Chen, Wenjing, Peng Bu, Suzhen Zheng, ve Xianyu Su. 2007. "Study on Fourier transforms profilometry based on bi-color projecting". *Optics & Laser Technology* 39 (4): 821–27. doi:10.1016/j.optlastec.2006.02.002.

Coskun, Emre. 2012. "İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İntegral Dönüşüm Yöntemleri ile Belirlenmesi". Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.

Creath, K, ve JC Wyant. 1992. "Moiré and fringe projection techniques". *Optical shop testing*. doi:10.1002/9780470135976.ch16.

Daubechies, I. 1990. "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis". *IEEE Transactions on Information Theory* 36 (5): 961–1005. doi:10.1109/18.57199.

De Groot, Peter. 2015. "Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography". *Advances in Optics and Photonics* 7 (1): 1. doi:10.1364/AOP.7.000001.

Demren, Esra. 2015. "Dalgacık Dönüşümünün Fourier Dönüşümü ile Karşılaştırılması ve

Uygulama". İstanbul Teknik Üniversitesi.

Dong, Jing-tao, ve Rong-sheng Lu. 2012. "A five-point stencil based algorithm used for phase shifting low-coherence interference microscopy". *Optics and Lasers in Engineering* 50 (3). Elsevier: 502–11. doi:10.1016/j.optlaseng.2011.09.020.

Dursun, Ali, Serhat Özder, ve F Necati Ecevit. 2004. "Continuous wavelet transform analysis of projected fringe patterns". *Measurement Science and Technology* 15 (9): 1768–72. doi:10.1088/0957-0233/15/9/013.

Endo, Takashi, Yoshiaki Yasuno, Shuichi Makita, Masahide Itoh, ve Toyohiko Yatagai. 2005. "Profilometry with line-field Fourier-domain interferometry." *Optics express* 13 (3): 695–701. doi:org/10.1364/OPEX.13.000695.

Farge, M. 1992. "Wavelet Transforms and their Applications to Turbulence". *Annual Review of Fluid Mechanics* 24 (1): 395–458. doi:10.1146/annurev.fl.24.010192.002143.

Gabor, D. 1946. "Theory of communication". *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, sayı 93: 429–41.

Gorthi, Sai Siva, ve Pramod Rastogi. 2010. "Fringe projection techniques: Whither we are?" *Optics and Lasers in Engineering* 48 (2): 133–40. doi:10.1016/j.optlaseng.2009.09.001.

Grossmann, A, ve J. Morlet. 1984. "Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape". *SIAM Journal on Mathematical Analysis* 15 (4): 723–36. doi:10.1137/0515056.

Ha, Young Myoung, Jae Won Choi, ve Seok Hee Lee. 2008. "Mass production of 3-D microstructures using projection microstereolithography". *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 (3): 514–21. doi:10.1007/s12206-007-1031-8.

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. doi:10.1016/j.optlaseng.2005.10.012.

Kocahan, Ozlem, Erhan Tiryaki, Emre Coskun, ve Serhat Ozder. 2018. "Determination of phase from the ridge of CWT using generalized Morse wavelet". *Measurement Science and Technology* 29 (3): 35203. doi:10.1088/1361-6501/aa9d56.

Kocahan, Ozlem, Erhan Tiryaki, Cagla Durmus, Merve Naz Elmas, Emre Coskun, ve Serhat Ozder. 2017. "Quantitative phase imaging of red blood cell by diffraction phase microscopy". Içinde *2017 Computing and Electromagnetics International Workshop (CEM)*, 21–22. IEEE. doi:10.1109/CEM.2017.7991867.

Kocahan, Özlem. 2008. "İntegral dönüşümler kullanilarak cisimlerin profillerinin belirlenmesi". Çanakkale Onsekiz Mart University.

Kocahan, Özlem, Emre Coşkun, ve Serhat Özder. 2014. "Generalized Morse wavelets for the phase evaluation of projected fringe pattern". *Measurement Science and Technology* 25 (10): 105701. doi:10.1088/0957-0233/25/10/105701.

Kwok, H.K., ve D.L. Jones. 2000. "Improved instantaneous frequency estimation using an

adaptive short-time Fourier transform". *IEEE Transactions on Signal Processing* 48 (10): 2964–72. doi:10.1109/78.869059.

Lai, Cheng-chung, ve I-jen Hsu. 2007. "Surface profilometry with composite interferometer". *Optics Express* 15 (21): 13949. doi:10.1364/OE.15.013949.

Leonardi, M, A Rmiie, ve J. Lenarcic. 2014. "A system for measurement and visualisation of human back shape for estimation of 3D deformities". Içinde *Information Technology Applications in Biomedicine. ITAB '97. Proceedings of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Region 8 International Conference*, 95–97. IEEE. Erişim Temmuz 11. doi:10.1109/ITAB.1997.649423.

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. doi:10.1080/09500340512331309057.

Li, Sikun, Xianyu Su, ve Wenjing Chen. 2010. "Wavelet ridge techniques in optical fringe pattern analysis". *Journal of the Optical Society of America A* 27 (6): 1245–54. doi:10.1364/JOSAA.27.001245.

Lilly, J.M., ve S.C. Olhede. 2009. "Higher-Order properties of analytic wavelets". *IEEE Transactions on Signal Processing* 57 (1): 146–60. doi:10.1109/TSP.2008.2007607.

Lilly, Jonathan M, ve Sofia C Olhede. 2012. "Generalized Morse Wavelets as a superfamily of analytic wavelets". *IEEE Transactions on Signal Processing* 60 (11): 6036–41. doi:10.1109/TSP.2012.2210890.

Meyers, S D, B. G. Kelly, ve 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. doi:10.1175/1520-0493(1993)121<2858:AITWAI>2.0.CO;2.

Moore, C.J., D.R. Burton, O. Skydan, P.J. Sharrock, ve M. Lalor. 2006. "3D Body Surface Measurement and Display in Radiotherapy Part I: Technology of Structured Light Surface Sensing". *International Conference on Medical Information Visualisation--BioMedical Visualisation (MedVis'06)*. Ieee, 97–102. doi:10.1109/MEDIVIS.2006.3.

Nicchiotti, G. 2014. "A system for 3D reconstruction and VRML conversion for virtual museums applications". Içinde *Proceedings of 13th International Conference on Digital Signal Processing*, 1:421–24. IEEE. Erişim Ağustos 19. doi:10.1109/ICDSP.1997.628133.

Okamura, Shuhei. 2011. "The Short Time Fourier Transform and Local Signals".

Olhede, S.C., ve A.T. Walden. 2002. "Generalized Morse Wavelets". *IEEE Transactions on Signal Processing* 50 (11): 2661–70. doi:10.1109/TSP.2002.804066.

Özder, Serhat, Emre Coşkun, Oguz Köysal, ve Özlem Kocahan. 2007. "Determination of birefringence dispersion in nematic liquid crystals by using an S-transform". *Optics Letters* 32 (14): 2001. doi:10.1364/OL.32.002001.

Pham, Hoa, Huafeng Ding, Nahil Sobh, Minh Do, Sanjay Patel, ve Gabriel Popescu. 2011.

"Off-axis quantitative phase imaging processing using CUDA: toward real-time applications". *Biomedical Optics Express* 2 (7): 1781. doi:10.1364/BOE.2.001781.

Pham, Hoa V, Christopher Edwards, Lynford L Goddard, ve Gabriel Popescu. 2013. "Fast phase reconstruction in white light diffraction phase microscopy." *Applied optics* 52 (1): A97-101. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23292428.

Polikar, Robi. 2006. "THE WAVELET TUTORIAL". *2006 Index to Series of Tutorials to Wavelet Transform*.

Popescu, Gabriel. 2008. "Chapter 5 Quantitative Phase Imaging of Nanoscale Cell Structure and Dynamics". Içinde *Methods in Nano Cell Biology*, 1.baskı, 90:87–115. Elesvier Inc. doi:10.1016/S0091-679X(08)00805-4.

Popescu, Gabriel. 2011. *Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues*. The McGraw-Hill Companies, Inc. https://www.accessengineeringlibrary.com/browse/quantitative-phase-imaging-of-cells-and-tissues.

Popescu, Gabriel, Kamran Badizadegan, Ramachandra R. Dasari, ve Michael S. Feld. 2006. "Observation of dynamic subdomains in red blood cells". *Journal of Biomedical Optics* 11 (4): 40503. doi:10.1117/1.2221867.

Posch, T E. 1989. "Wavelet transform and time-frequency distributions". *Proc.\ SPIE: Advanced Algorithms and Architectures for Signal Processing IV* 1152: 477–82.

Quan, C, X.Y. He, C.F. Wang, C.J. Tay, ve H.M. Shang. 2001. "Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting". *Optics Communications* 189 (1–3): 21–29. doi:10.1016/S0030-4018(01)01038-0.

Quan, C, C.J Tay, ve H.M Shang. 1999. "Fringe projection technique for the 3-D shape measurement of a hydroformed shell". *Journal of Materials Processing Technology* 89–90 (Mayıs): 88–91. doi:10.1016/S0924-0136(99)00147-8.

Reolon, D, M Jacquot, I Verrier, G Brun, ve C Veillas. 2006. "Broadband supercontinuum interferometer for high-resolution profilometry." *Optics express* 14 (1): 128–37. doi:org/10.1364/OPEX.14.000128.

Sharma, Manoj Kumar, Charu Gaur, Paramasivam Senthilkumaran, ve Kedar Khare. 2015. "Phase imaging using spiral-phase diversity". *Applied Optics* 54 (13): 3979. doi:10.1364/AO.54.003979.

Shi, Hongjian, Hongwei Ji, Guobiao Yang, ve Xiaoyuan He. 2013. "Shape and deformation measurement system by combining fringe projection and digital image correlation". *Optics and Lasers in Engineering* 51 (1). Elsevier: 47–53. doi:10.1016/j.optlaseng.2012.07.020.

Singh, H, ve J S Sirkis. 1994. "Direct extraction of phase gradients from Fourier-transform and phase-step fringe patterns." *Applied optics* 33 (22): 5016–20. doi:10.1364/AO.33.005016.

Sinha, Aloka, ve 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. doi:10.1016/j.optlaseng.2005.02.005.

Skydan, Oleksandr a., Michael J. Lalor, ve David R. Burton. 2005. “Using coloured structured light in 3-D surface measurement”. *Optics and Lasers in Engineering* 43 (7): 801–14. doi:10.1016/j.optlaseng.2004.08.008.

Su, Xianyu, ve Wenjing Chen. 2001. “Fourier transform profilometry”: *Optics and Lasers in Engineering* 35 (5): 263–84. doi:10.1016/S0143-8166(01)00023-9.

Takeda, M, ve K Mutoh. 1983. “Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes.” *Applied optics* 22 (24): 3977. doi:http://dx.doi.org/10.1364/AO.22.003977.

Thian, S C H, W Feng, Y S Wong, J Y H Fuh, H T Loh, K H Tee, Y Tang, ve L Lu. 2007. “Dimensional measurement of 3D microstruture based on white light interferometer”. *Journal of Physics: Conference Series* 48 (Temmuz): 1435–46. doi:10.1088/1742-6596/48/1/265.

Thomas, Lijo, J Solomon Ivan, P. A. Ameen Yasir, Richa Sharma, Rakesh Kumar Singh, C S Narayanamurthy, ve K S Dasgupta. 2015. “Phase-sharing using a Mach–Zehnder interferometer”. *Applied Optics* 54 (4): 699. doi:10.1364/AO.54.000699.

Torrence, Christopher, ve Gilbert P Compo. 1998. “A Practical Guide to Wavelet Analysis”. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (1): 61–78. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.

Utsumi, Yuzuko, Yoshio Iwai, ve Masahiko Yachida. 2006. “Performance Evaluation of Face Recognition in the Wavelet Domain”. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, sayı 3(Ekim). Ieee: 3344–51. doi:10.1109/IROS.2006.282510.

Vanherzeele, J., Patrick Guillaume, ve Steve Vanlanduit. 2005. “Fourier fringe processing using a regressive Fourier-transform technique”. *Optics and Lasers in Engineering* 43 (6): 645–58. doi:10.1016/j.optlaseng.2004.09.010.

Watkins, L R, S M Tan, ve T H Barnes. 1999. “Determination of interferometer phase distributions by use of wavelets”. *Optics Letters* 24 (13): 905. doi:10.1364/OL.24.000905.

Xia, Shuman, Zhipeng Pan, ve Jingwen Zhang. 2014. “Optical microscope for three-dimensional surface displacement and shape measurements at the microscale”. *Optics Letters* 39 (14): 4267. doi:10.1364/OL.39.004267.

Xue, Liang, Jiancheng Lai, Shouyu Wang, ve Zhenhua Li. 2011. “Single-shot slightly-off-axis interferometry based Hilbert phase microscopy of red blood cells”. *Biomedical Optics Express* 2 (4): 987. doi:10.1364/BOE.2.000987.

Yaqoob, Zahid, Toyohiko Yamauchi, Wonshik Choi, Dan Fu, Ramachandra R Dasari, ve Michael S Feld. 2011. “Single-shot full-field reflection phase microscopy.” *Optics express* 19 (8): 7587–95. doi:10.1364/OE.19.007587.

Zwemer, D.a., G. Petriccione, ve 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.* Ieee, 953–60. doi:10.1109/ITHERM.2006.1645449.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. ÖZLEM KOCAHAN YILMAZ
Proje No:	115F168
Proje Başlığı:	Mikrometre Boyutlu Cisimlerin Üç Boyutlu Yüzey Profillerinin Belirlenmesi İçin Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı Faz Hesaplama Yöntemi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	EMRE COŞKUN, SERHAT ÖZDER
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	NAMIK KEMAL Ü. FEN EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2015 - 01/03/2018
Onaylanan Bütçe:	506028.0
Harcanan Bütçe:	418311.75
Öz:	Bu çalışmada, bir boyutlu sürekli dalgacık dönüşümü (1D SDD) faz yönteminde genelleştirilmiş morse dalgacığı (GMD) kullanılarak faz hesaplanması için algoritmanın geliştirilmesi sunulmaktadır. Optik ölçüm yöntemi olan ızgara yansıtma tekniği ile mikrometre mertebesinde, nanometre hassasiyetinde ölçüm yapabilen bir deney kurulumundan elde edilen verilerin analizi için literatürde ilk kez GMD kullanılmıştır. GMD, değişken iki parametreye sahiptir ve bu parametrelerin değişmesi lokalizasyon özelliğini etkilemektedir. 1D SDD analizinde lokalizasyon özelliğine göre hesaplar gerçekleştirilmektedir. Bundan dolayı daha az hata ile faz hesaplamak için 1D SDD analizinde analiz dalgacığı olarak GMD kullanma fikri ortaya çıkmıştır. Yapılan simülasyon çalışması sonucunda değişken parametreleri (?, ?) = (3, 10) olarak seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar Paul ve Morlet dalgacıkları ile de tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılarak en düşük faz hatası değeri GMD kullanımında elde edilmiştir. Böylece, projenin birinci hedefi olan daha düşük hata ile faz hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Beyaz ışık kırınım faz mikroskopisi deney kurulumu ile alınan ince film yüzey birikintisi, epitel doku ve kırmızı kan hücresi görüntüleri, hazırlanan GMD ile 1D SDD programında işlenerek 3D, dinamik (her açıdan gözlenebilen) ve her noktada yüksekliği (faz dağılımı) bilinen profilleri oluşturulmuştur. Böylece proje önerisinde yer alan ikinci hedefe ulaşılmıştır. Görüntüler, Morlet ve Paul dalgacıkları için yazılan programla da analiz edilerek karşılaştırılmıştır. SEM ölçümleriyle sonuçların denetlenmesi için kan örnekleri kullanılmıştır. Bu çalışmada kurulan BKFM deney sistemi ile ince film yüzey morfolojisinin genelleştirilmiş Stockwell dönüşümü ile belirlenmesi konulu BAP (Namık Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi) projesi kabul edilmiştir. Ayrıca, proje çalışması kapsamında bir adet yüksek lisans tezi tamamlanmış, bir yüksek lisans bir de doktora tezi yazım aşamasındadır. Çalışmaların çoğunluğu bildiri ve makale olarak yayınlanmıştır (2 adet SCI indeksli uluslarlarsı dergide makale, 3 adet alan indekslerinde taranan bildiri kitaplarında tam metin bildiri, 2 adet uluslararası toplantıda poster ve en iyi poster ödülü). Proje kapsamında alınan cihazlar sayesinde Namık Kemal Üniversitesi Fizik Bölümü araştırma altyapısına çok büyük katkılar sağlanmıştır. Optik araştırma altyapısı bulunmayan bölümümüze kazandırılan optik laboratuarı sayesinde yeni proje öneri çalışmaları yapılabilmekte ve optik konusunda uzmanlaşacak yeni lisansüstü öğrenciler yetişebilmektedir. Sahip olunan imkanlar sayesinde özellikle biyolojik örneklerin hızlı bir şekilde dinamik profilleri hesaplanabilmekte, böylece Tıp Fakültesi ve Mühendislik Fakülteleri ile işbirliği projeleri hazırlanabilmektedir.
Anahtar Kelimeler:	Genelleştirilmiş morse dalgacığı, sürekli dalgacık dönüşümü, optik ölçüm, profil belirleme
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Theoretical determination of the refractive index and extinction coeffient of an absorbing thin film by using morse wavelet (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 2- Determination of the refractive index of dielectric films from the transnittance spektrum by using morse wavelet (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 3- Optical phase distribution evaluation by using zero order Generalized Morse Wavelet (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 4- 3D profile measurements of objects by using zero order Generalized Morse Wavelet (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 5- The generalized Morse wavelet method to determine refractive index dispersion of dielectric films (Makale - İndeksli Makale), 6- Determination of phase from the ridge of CWT using generalized Morse wavelet (Makale - Diğer Hakemli Makale), 7- Quantitative Phase Imaging of Red Blood Cell by Diffraction Phase Microscopy (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 8- FARKLI BOYUTLARDA CİSİMLERİN ÜÇ BOYUTLU YÜZEY PROFİLLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN TEMEL IZGARA YANSITMA YÖNTEMİ (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi), 9- Beyaz Işık Faz Mikroskopisi İle İnce Filmlerin Yüzeylerinin Görüntülenmesi Ve Faz Dağılımlarının Genelleştirilmiş Stockwell Dönüşümü Kullanılarak Hesaplanması (Yeni Proje - Ulusal Proje - BAP),

TÜBİTAK