



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Lazer Projektörlü Izgara Projeksiyon Sisteminin
Doğruluğunun Araştırılması**

Yüksek Lisans Tezi

Burak Özbay

Ocak 2024



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Lazer Projektörlü Izgara Projeksiyon Sisteminin
Doğruluğunun Araştırılması**

Yüksek Lisans Tezi

Burak Özbay

Danışman

Prof. Dr. Zehra Saraç

Ocak 2024

TEZ JÜRİSİ ONAYI

Burak Özbay tarafından hazırlanan "Lazer Projektörlü Izgara Projeksiyon Sisteminin Doğruluğunun Araştırılması" başlıklı bu Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmış ve jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Zehra Saraç

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Üyeler:

Dr. Öğr. Üyesi Haluk Bayram

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sebahattin Eker

İstanbul Teknik Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 8 / Ocak / 2024

BEYANLAR

Yazım ve Kaynak Gösterme Kılavuzu Beyanı

Danışmanlığımda yazılan bu tezin Vancouver yazım ve kaynak gösterme kılavuzunda belirtilen kurallara uygun olarak yapılandırıldığı ve bu kılavuzun metin içi kaynak gösterme standartlarının bu tezde tutarlı olarak uygulandığı tarafımdan incelenerek teyit edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Zehra SARAÇ

Etik İlkeler Sadakat Beyanı

Hazırladığım bu tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

İmza

Burak ÖZBAY

ÖZET

Lazer Projektörlü Izgara Projeksiyon Sisteminin Doğruluğunun Araştırılması

Özbay, Burak

Tezli Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zehra Saraç

Ocak 2024

Lazer projeksiyon teknikleri üç boyutlu (3D) görüntüleme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknolojiler gelecek vaat etmektedir. Bu görüntüleme yönteminde sistemden elde edilen işaretler (saçak desenleri) genellikle değişen ortam, ilgilenilen nesne, gürültü, güçlü ve düzensiz arka ışık nedeniyle bozulur. Bu desenlerin kontrastı da düşüktür. Optik ölçümün doğruluğu büyük ölçüde kaydedilen saçak desenlerinden faz haritasını oluşturmak için kullanılan işaret işleme yöntemlerine bağlıdır. Hataları ve gürültüyü azaltmak için, birkaç metot vardır; bunlardan sistemden saçak desenleri alınırken kullanılan arka planı elimine etmek, faz haritasının çıkarılmasında kullanılan yöntemlerin uygun şekilde seçimi vb. sayılabilir. Hiç kuşkusuz bunlardan en uygunu faz haritasının çıkarılmasında kullanılan yöntemlerin seçimidir.

Bu tezde lazer interferometreli ızgara projeksiyonu tekniğine dayalı üç boyutlu görüntüleme sistemlerinin doğruluğunu etkileyen sinyal analiz teknikleri üzerinde durulacak olup, bu tekniklerden geleneksel Fourier dönüşümüne dayalı saçak deseni analiz yöntemlerinin sistemin doğruluğunu nasıl etkilediği hem deneysel hem de benzetim yolu ile incelenecektir. Böyle görüntüleme sistemlerinde Fourier dönüşümü tekniği tek başına doğruluğu etkileyen faktörleri ortadan kaldıramadığından, çeşitli yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır. Bu tezin amacı bu yöntemlerin üç boyutlu görüntüleme sisteminin doğruluğunu nasıl etkilediğini incelemek ve en etkili yöntemi

belirlemektir. Çalışmada birkaç yöntem ile çıkarılan sayısal haritaları kullanarak elde edilen yüzey profilleri karşılaştırılacaktır. Bu yükseklik haritaları ile ticari sistemden elde edilen sonuçlar arasındaki hata değerleri sonuçları sunulacaktır. Burada kullanılan Fourier dönüşüm tekniğine dayalı yöntemlerden hangisinin sistemin doğruluğunu nasıl etkilediği ortaya çıkarılacaktır. Sonuç olarak en düşük hatayı verip gerçek değerlere yakın sonuçlar sunan yöntem belirlenecektir. Bu tezde yapılan çalışmalardan ve hata değerlerinden EMD-FFT yönteminin gürültüye en duyarsız yöntem olduğu belirlenmiştir. Üstelik EMD-FFT yöntemi sistemin gerçek değerlere yakın, doğru sonuçlar üretmesini sağladığı tespit edilmiştir.

Ayrıca bu çalışma da sistemin kalibrasyonu için yeni bir yaklaşım da önerilmiştir. Bu yaklaşım gerçek bir cismin 3-B görüntüsünün sitemden yeniden elde edilmesi ve kesitsel grafiklerin değerlendirilmesi ile doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen kalibrasyon yönteminin etkinliğini göstermektedir. Bu yaklaşım için balık cismi referans alınarak kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Elde edilen maksimum hata değerleri kullanılan diğer cisimler için kabaca 2 mm kadar olmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Lazer interferometri-Izgara projeksiyon tekniği, Ampirik mod ayrıştırma-Fourier Dönüşüm yöntemi, Pencere Fourier dönüşümü, Savitzky-Golay Filtreli Fourier dönüşümü yöntemi, Kalibrasyon.

ABSTRACT

Investigation of the Accuracy of Fringe Projection System with Laser Projector

Özbay, Burak

Master's Thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Zehra Saraç

January 2024

Laser projection techniques are widely used for three-dimensional (3D) imaging. These technologies are promising. In this imaging method, the signals (fringe patterns) obtained from the system are often distorted due to the changing environment, the object of interest, noise, strong and irregular backlight. The contrast of these patterns is also low. The accuracy of optical measurement largely depends on the signal processing methods used to create the phase map from the recorded fringe patterns. There are several methods to reduce errors and noise; These include eliminating the background used when obtaining fringe patterns from the system, appropriate selection of methods used in extracting the phase map, etc. countable. Undoubtedly, the most appropriate of these is the choice of methods used to create the phase map.

This thesis will focus on signal analysis techniques that affect the accuracy of three-dimensional imaging systems based on laser interferometer fringe projection technique. How traditional Fourier transform based fringe pattern analysis methods affect the accuracy of the system will be examined both experimentally and through simulation. In such imaging systems, the Fourier transform technique alone cannot eliminate the factors affecting accuracy, so it is used together with various methods. The aim of this thesis is to examine how these methods affect the accuracy of the three-dimensional imaging system and to determine the most effective method. In the study, surface profiles obtained

using digital maps obtained by several methods will be compared. The error values between these height maps and the results obtained from the commercial system will be presented. It will be revealed how each of the Fourier transform technique-based methods used here affects the accuracy of the system. As a result, the method that gives the lowest error and provides results close to the real values will be determined. Based on the studies and error values in this thesis, it has been determined that the EMD-FFT method is the most insensitive method to noise. Moreover, it has been determined that the EMD-FFT method enables the system to produce accurate results close to the real values.

In addition, a new approach for the calibration of the system is proposed in this study. This approach was validated by retrieving the 3D image of a real object from the system and evaluating cross-sectional graphics. Experimental results show the effectiveness of the proposed calibration method. For this approach, the calibration process was performed using the fish object as a reference. The maximum error values obtained are roughly 2 mm for other objects used.

Key Words: Laser interferometry-Fringe projection technique, Empirical mode decomposition-Fourier transform method, Windowed Fourier transform, Savitzky-Golay filtered Fourier transform method, Calibration.

ÖNSÖZ

Eğitimim süresince yetişmemde büyük katkıları olan, değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, bilimsel araştırma yolunu bize açan ve her konuda rehberlik edip yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Zehra SARAÇ'a, Tez savunma sınavıma vakit ayırıp katılım sağlayan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Haluk Bayram ve Dr. Öğr. Üyesi Sebahattin Eker'e, her daim yanımda olan anne ve babama çok teşekkür ederim.

Burak ÖZBAY

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SİMGELER	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	1
1.2. Tezin Literatüre Katkıları	5
1.3. Tezin Genel Akışı	6
2. L-FPP SİSTEMİ VE İŞARET ANALİZ YÖNTEMLERİ	7
2.1. Lazer İnterferometri- Izgara Projeksiyon Profilometre Sistemi	7
2.1.1. L-FPP Deney Düzenegi ve Kullanılan Malzemeler	9
2.2. L-FPP Sisteminde Kullanılan Izgara Analiz Yöntemlerinin Prensipleri	12
2.2.1. Geleneksel Fourier Dönüşüm Tekniği -FFT	12
2.2.2. SG Filtre- Fourier Dönüşüm Tekniği (Savitzky–Golay (SG) – FFT)	13
2.2.3. Pencerelemiş Fourier Dönüşüm Yöntemi (W-FFT)	15
2.2.4. 2B Ampirik Mod Ayırıştırma- Fourier Dönüşüm Yöntemi (2D EMD-FFT)	17
2.2.5. Fourier Dönüşüm Tekniğine Dayalı Modülasyon Yöntemi (Gaussian Filtreli-GPM- FFT)	19
2.3. Cismin Yüzey Profili (Yükseltisi)	19
3. L-FPP SİSTEMİNİN BENZETİMİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
3.1. L-FPP Sisteminin Benzetim Çalışmaları ve Sonuçlar	21
3.2. Deneysel Çalışma Sonuçları ve Kalibrasyon	32
3.2.1. L-FPP Sisteminin Kalibrasyonu	32
3.2.2 Kalibrasyon Katsayısı (M) Hesaplanması ve Sonuçlar	36
3.2.2.1 Geleneksel FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata	36
3.2.2.2 SG- FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata	45

3.2.2.3 W- FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata	50
3.2.2.4 EMD- FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata	54
3.2.2.5 GPM- FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata	58
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	64
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

1B	Bir Boyutlu
1D	One Dimensional
2B	İki Boyutlu
2D	Two Dimensional
3B	Üç Boyutlu
3D	Three Dimensional
CCD	Charge Coupled Device (Yük Bağlaşımlı Cihaz)
CWT	Continuous Wavelet Transform (Sürekli Dalgacık Dönüşümü)
DIC	Digital Image Correlation (Dijital Görüntü Korelasyonu)
EMD	Empirical Mode Decomposition (Ampirik Kip Ayırışımı)
FFT	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
FPP	Fringe Projection Profilometry (Izgara Projeksiyon Profilometresi)
GPM	Modulation Method with Gaussian Filter (Gauss Filtreli Modülasyon Yöntemi)
IMF	Intrinsic Mode Functions (İçsel Mod Fonksiyonları)
LCD	Liquid Crystal Display (Sıvı Kristal Ekran)
L-FPP	Laser İnterferometri- Fringe Projection Profilometry
MSE	Mean Squared Error (Ortalama Kare Hatası)
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio (Pik Sinyal Gürültü Oranı)
SG	Savitzky–Golay
SNR	Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
STM	Shearlet Transform Method (Shearlet Dönüşüm Yöntemi)
WFF	Windowed Fourier Filtering (Pencerelenmiş Fourier Dönüşüm Filtreleme)
WFR	Windowed Fourier Ridges (Pencerelenmiş Fourier Dönüşümü 2. Tip)
WFT	Windowed Fourier Transform (Pencerelenmiş Fourier Dönüşümü)
WTM	Wavelet Transform Method (Dalgacık Dönüşümü Yöntemi)

SİMGELER

w	Zaman uzayı açısal frekans
f	Frekans
F	Fourier Dönüşümü
F^{-1}	Ters Fourier Dönüşümü
M	Kalibrasyon katsayısı
ϕ	Faz
t	Zaman
$\otimes$	Konvolüsyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Lazer Interferometrilili- ızgara projeksiyon profilometre sistemi blok şeması....	8
Şekil 2.2 Lazer Projektörlü- Izgara projeksiyon profilometre sistemi blok şema genel görünümü	9
Şekil 2.3 L-FPP sistemi deney düzeneği (Görünüm 1).....	10
Şekil 2.4 L-FPP sistemi deney düzeneği (Görünüm 2).....	11
Şekil 2.5 3B görüntüsü alınacak cisimlerin 2B resimleri : (a) balık, (b) denizatı ve (c) deniz kabuğu	11
Şekil 2.6 Geleneksel Fourier dönüşüm tekniği algoritmasının akış diyagramı.....	13
Şekil 2.7 SG Filtre- Fourier Dönüşüm Yönteminin (SG-FFT) algoritmasının akış diyagramı.....	15
Şekil 2.8 W-FFT yönteminin algoritmasının akış diyagramı.....	17
Şekil 2.9 EMD-FFT yönteminin algoritmasının akış diyagramı.....	18
Şekil 2.10 Gaussian Filtreli Modülasyon Yöntemi (GPM-FFT) algoritmasının akış diyagramı.....	19
Şekil 2.11 Lazer projektör ve kameralı L-FPP sistemi ve parametreler.....	20
Şekil 3.1 (a) Yarım küre, (b) Koni ve (c) Karmaşık tepeli şekil için gerçek faz görüntüleri.....	22
Şekil 3.2 İlgili fazlar(cisimler) kullanılarak simülasyonu yapılmış ızgara desenlerinin 2B görüntüleri: (a) Yarım küre, (b) koni ve (c) karmaşık tepeli şekil için.....	23
Şekil 3.3 Referans $i_{ref}(x,y)$ kullanılarak simülasyonu yapılmış ızgara deseninin görüntüsü.....	23
Şekil 3.4 Yarım küre cismi için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT ve (e) GPM- FFT yöntemleri kullanılarak elde edilen gürültülü faz haritaları $\phi_{son}(x,y)$	24-25
Şekil 3.5 Yarım küre cismi için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden elde edilen ve Şekil 3.4 (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT, (e) GPM- FFT da	

sunulan faz haritaları $\phi_{\text{son}}(x,y)$ ile gerçek faz haritası $\phi(x,y)$ ler kullanılarak Denklem 3.6 ile elde edilen hata haritaları.....	26
Şekil 3.6 Koni cismi için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden (a) FFT, (b) Smoothing FFT(SG-FFT), (c) W-FFT, (d) EMD-FFT ve (e) GPM- FFT yöntemleri kullanılarak elde edilen gürültülü faz haritaları $\phi_{\text{son}}(x,y)$	27-28
Şekil 3.7 Koni cismi için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden elde edilen ve Şekil 3.6 (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT, (e) GPM- FFT da sunulan faz haritaları $\phi_{\text{son}}(x,y)$ ile gerçek faz haritaları $\phi(x,y)$ 'ler arasındaki Denklem 3.6 ile elde edilen hata haritaları.....	28-29
Şekil 3.8 Karmaşık tepeli cisim için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT ve (e) GPM- FFT yöntemleri kullanılarak elde edilen gürültülü faz haritaları $\phi_{\text{son}}(x,y)$	30-31
Şekil 3.9 Karmaşık tepeli cisim için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden elde edilen ve Şekil 3.8(a) FFT, (b) Smoothing FFT(SG-FFT), (c) W-FFT, (d) EMD-FFT ve (e) GPM- FFT de sunulan faz haritaları $\phi_{\text{son}}(x,y)$ ile gerçek faz haritası $\phi(x,y)$ 'ler arasındaki Denklem 3.6 ile elde edilen hata haritaları.....	31-32
Şekil 3.10 Alçı balık cismi kullanılarak L-FPP den elde edilen ızgara deseni.....	33
Şekil 3.11 Alçı denizati cismi kullanılarak L-FPP'den elde edilen ızgara deseni.....	33
Şekil 3. 12 Alçı Deniz kabuğu cismi kullanılarak L-FPP sisteminden elde edilen ızgara deseni.....	34
Şekil 3.13 Referans yani cisim konulmadan L-FPP düzeneğinden elde edilen ızgara deseni.....	34
Şekil 3.14 Saçak periyodu hesabında kullanılan parametre bilgilerinin görsel gösterimi.	35
Şekil 3.15 Cisimlerin Geleneksel FFT ile fazının bulunması ve 3B profilinin (z-yükselti bilgisi) bulunmasını gösteren akış diyagramı.....	36
Şekil 3.16 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sistemi kullanılarak bulunan yüzey profili.	37
Şekil 3.17 Alçı Denizati cisminin 3B L-FPP görüntüleme sistemi kullanılarak bulunan yüzey profili.....	37
Şekil 3.18 Alçı Deniz Kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sistemi kullanılarak bulunan yüzey profili.....	38
Şekil 3.19 Shining 3D firmasının Model OptimScan-5M tarama cihazı kullanılarak Alçı Balık cismi için elde edilen 3B görüntü.....	38

Şekil 3.20 Shining 3D firmasının Model OptimScan-5M tarama cihazı kullanılarak Alçı Denizatı cismi için elde edilen 3B görüntü.....	39
Şekil 3.21 Shining 3D firmasının Model OptimScan-5M tarama cihazı kullanılarak Alçı Deniz kabuğu cismi için elde edilen 3B görüntü.....	39
Şekil 3.22 Alçı Balık cisminin ticari cihaz ile 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (ticari kesit).....	40
Şekil 3.23 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).....	40
Şekil 3.24 Alçı Balık cisminin boyuna ticari kesiti	41
Şekil 3.25 Alçı Balık cisminin boyuna test kesiti.	41
Şekil 3.26 Alçı Balık cisminin kalibre kesiti ve ticari kesitin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi.....	42
Şekil 3.27 (a) Alçı Deniz Kabuğu cisminin boyuna ticari kesit görünümü, (b) Alçı Denizatı cisminin boyuna ticari kesit görünümü.....	43
Şekil 3.28 (a) Alçı Deniz kabuğu cisminin kalibre kesiti ile ticari kesitin karşılaştırma için üst üste çizimi. (b) Alçı Denizatı cisminin kalibre kesiti ile ticari kesitin karşılaştırma için üst üste çizimi.....	44
Şekil 3.29 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde SG-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.	45
Şekil 3.30 Alçı Denizatı cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde SG-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.	46
Şekil 3.31 Alçı Deniz Kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde SG-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.....	46
Şekil 3.32 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden SG-FFT ile elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).....	47
Şekil 3.33 Alçı Balık cisminin SG-FFT için kalibre kesiti ve ticari kesitin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi.....	48
Şekil 3.34 (a) Alçı Deniz kabuğu cisminin SG-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitin karşılaştırma için üst üste çizimi. (b) Alçı Denizatı cisminin SG-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitin karşılaştırma için üst üste çizimi.....	49
Şekil 3.35 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde W-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.	50
Şekil 3.36 Alçı Denizatı cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde W-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.	50

Şekil 3.37 Alçı Deniz Kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde W-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.....	51
Şekil 3.38 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden W-FFT ile elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).....	51
Şekil 3.39 Alçı Balık cisminin W-FFT için kalibre kesiti ve ticari kesitinin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi.....	52
Şekil 3.40 (a) Alçı Deniz kabuğu cisminin W-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (b) Alçı Denizatı cisminin W-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi.....	53
Şekil 3.41 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde EMD-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.	54
Şekil 3.42 Alçı Denizatı cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde EMD-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.	54
Şekil 3.43 Alçı Deniz Kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde EMD-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.....	55
Şekil 3.44 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden EMD-FFT ile elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).....	55
Şekil 3.45 Alçı Balık cisminin EMD-FFT için kalibre kesiti ve ticari kesitinin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi.....	56
Şekil 3.46 (a) Alçı Deniz kabuğu cisminin EMD-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (b) Alçı Denizatı cisminin EMD-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi.....	57
Şekil 3.47 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde GPM-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.	58
Şekil 3.48 Alçı Denizatı cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde GPM-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.	58
Şekil 3.49 Alçı Deniz Kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde GPM-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.....	59
Şekil 3.50 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden GPM-FFT ile elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).....	59
Şekil 3.51 Alçı Balık cisminin GPM-FFT için kalibre kesiti ve ticari kesitinin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi.....	60

Şekil 3.52 (a) Alçı Deniz kabuğu cisminin GPM-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (b) Alçı Denizatı cisminin GPM-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi.....	61
Şekil 3.53 Alçı Deniz kabuğu cismi için Geleneksel FFT, SG-FFT, W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT yöntemlerinden alınan kalibre kesitleri ve ticari kesitin üst üste çizimleri.	62
Şekil 3.54 Alçı Denizatı cismi için Geleneksel FFT, SG-FFT, W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT yöntemlerinden alınan kalibre kesitleri ve ticari kesitin üst üste çizimleri....	63

1. GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Lazer İnterferometri-ızgara projeksiyonu 3D görüntüleme sistemi (L-FPP), temassız, tahribatsız, güvenilir ve hızlı bir sistemdir. Ayrıca L-FPP, gerçek zamanlı ölçüme izin verdiği için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (1-6). Son yıllarda çeşitli alan ve endüstrilerde üç boyutlu (3D) görüntüleme ve şekil ölçümlerine olan talep artmıştır. Bu nedenle bu 3 boyutlu görüntüleme sistemlerinin doğruluğunun belirlenmesi giderek önem kazanmıştır. Bu sistemin doğruluğunu etkileyen faktörleri ortaya çıkarmak için hem deneysel hem de simülasyon için birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, Li ve ark. (2016), FPP'nin geometrik modellemesini ve kalibrasyonunu sağlayan çeşitli yöntemleri karşılaştırarak bir görüntüleme sisteminin doğruluğunu analiz etmiştir (7).

Pérez ve arkadaşları yağlı boya tablonun yüzeyinin 3 boyutlu görüntüsünü FPP ile elde etmişlerdir. Bu çalışmada FPP sisteminin doğruluğunu deneysel olarak tespit etmeye çalışmışlardır. 4 adım faz kayma yöntemi kullanarak yapılan çalışma da deneysel olarak sistemin doğruluğunun mm'nin onda biri olduğu sonucuna varmışlardır (8). Bu tezde ise dönüşüm tekniklerine dayalı L-FPP sisteminin doğruluğu hem teorik hem deneysel olarak araştırılmaktadır.

FPP sisteminde bozuk saçığın yüksek dereceli harmonik bilgisi, faz tahmininde hatalara yol açmaktadır. Bu sorunu çözmek için, 2022 yılında Yin ve arkadaşları, sinir ağına (PWPE-NN) dayalı noktasal bir faz tahmin yöntemi önermişlerdir. Sonuçta sinüzoidal ızgara deseni kullanmayan FPP sistemlerinde geleneksel yöntemlerin sebep olduğu faz hatası, önerilen yöntem ile ortadan kaldırılmaktadır. Daha çok sinyalin SNR değerleri değiştirilerek yöntemin etkinliği ve doğruluğu araştırılmıştır (9). Bu çalışmada yapay zekâya dayalı faz tahmin yöntemi ile sistemin doğruluğu ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasında ise sinyal analizi dönüşüm teknikleri yapılarak L-FPP sisteminin doğruluğu incelenmektedir.

Yüksek verimliliğe, kesinlik ve kullanışlılığa sahip FPP yönteminin teorik analizini, 2022 yılında Lv ve arkadaşları yapmışlardır. Bir FPP ölçüm sürecini dört adıma bölerek (sistem

kalibrasyonu, faz ölçümü, piksel uyumu ve 3B yeniden oluşturma), kapsamlı bir şekilde incelenen kalibrasyon adımı dışında tüm süreç hakkında teorik analizler yapmışlardır (10). Bu çalışma temel FPP özelliklerini ortaya çıkarmada etkili olmuştur. Daha makul ve gerçeğe yakın bir ölçüm sonucu sağlanmıştır. Lv ve arkadaşlarının çalışmasında sinyal analizi, faz kaydırma yöntemi ile yapılmıştır. Fakat bu tezde L-FPP sisteminin doğruluğu Fourier dönüşüm tekniğine dayalı yöntemler kullanılarak araştırılmaktadır.

2021 yılında Nguyen ve arkadaşları üç boyutlu görüntüleme için ızgara projeksiyon profilometresi ve dijital görüntü korelasyon tekniklerinin doğruluk değerlendirmesini yapmaya çalışmışlardır. Bu makale, iki yaygın 3B görüntüleme yönteminin doğruluk karşılaştırmasına ilişkin deneysel bir araştırma sunmaktadır: ızgara projeksiyon profilometresi (FPP) ve 3B dijital görüntü korelasyonu (3D-DIC) teknikleri. Bu çalışma da sistemde kullanılan ızgara analiz yöntemlerinin sistemin doğruluğunu nasıl etkilediği ortaya konulmamış, 3B ölçüm sistemlerinin verdiği sonuçlar arasındaki fark araştırılmıştır (11). Yazarlar, iki 3 boyutlu görüntüleme sisteminin karşılaştırmasını yapmışlar fakat doğruluğu test etmemişlerdir. Bu tez çalışmasında ise L-FPP sisteminin doğruluğu araştırılmaktadır.

López-Torres ve arkadaşları 2019 yılında 3B FPP görüntüleme sisteminde nesnelerin oluşturduğu gölgeleri belirlemek ve kaldırmak için bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada, faz görüntüleri, MSE ve PSNR hesaplamaları ve uygulama sürelerini gösteren, deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Belirtilen makalede sunulan sonuçlar, 3B görüntüleme sürecinde, gölgelerin kaldırılması ile önemli ölçüde iyileşme sağlandığı gösterilmektedir (12). Yazarlar tarafından 3B görüntüleme sisteminde gölgelerin etkisi araştırılmış ancak sistemin doğruluğu üzerine çalışma yapılmamıştır.

2019'da Xu ve ark. yarı saydam nesnelerin yüksek doğrulukla alınan 3D FPP görüntülerine ilişkin bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmadaki deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin kesin ölçüm sonuçlarına ulaşabildiğini ve yarı saydam nesnelerin ölçümünde genel hatayı önemli ölçüde azaltabildiğini göstermiştir. Ayrıca yöntemin yüksek doğruluk gösterdiği ortaya çıkmıştır (13). Bu çalışmada FPP sisteminin yarı saydam nesneleri ölçerken doğruluğu araştırılmış ancak sinyal işleme yöntemlerinin sistemin doğruluğu üzerindeki etkileri ortaya konulmamıştır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalardan görüleceği gibi, FPP sistemlerinde doğruluğu etkileyen sadece teknik mekanizma, sistem bileşenleri ve kurulum, görüş alanı, sistem kalibrasyonu, ölçülen nesnelerin geometrik ve yüzey özellikleri ve ortam aydınlatması değildir (7, 14-16). Böyle sistemlerden elde edilen işaretlerin işlenmesinde kullanılan metotlar da doğruluğu çok fazla etkilemektedir. Örneğin bu çalışmada kullanılacak L-FPP sisteminden elde edilen faz bilgisi; speckle gürültüsü, arka plan, titreşim vb. den çok etkilenmektedir. L-FPP de ızgara analizi yapan ve faz haritasını çıkaran teknikler ikiye ayrılmaktadır: 1. dönüşüm teknikleri (17-20) ve 2. faz kaydırma teknikleri (21-27). Dönüşüm teknikleri gerçek zamanlı ölçüme izin verdiği için çok fazla tercih edilmektedir. Ancak fazı çıkarırken kullanılan dönüşüm tekniği tek başına yeterli olmamaktadır. Yukarıda belirtilen doğruluğu etkileyen faktörleri ortadan kaldırmak için dönüşüm teknikleri çeşitli metotlar ile birlikte kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan teknik ve yöntemler şunlardır: 1. geleneksel Fourier dönüşümü tekniği FFT (1,2,18,20,28–29), 2. SG Filtre-Fourier Dönüşüm Yöntemi (Savitzky–Golay [SG] FFT) (30), 3. Pencerelemiş Fourier Dönüşüm Yöntemi (Gauss pencereli W-FFT) (2), 4. Ampirik Mod Ayırıştırma-Fourier Dönüşüm Yöntemi(EMD-FFT) (31) ve 5. Gaussian Filtre-Fourier Dönüşüm-Modülasyon Yöntemi (GPM-FFT) (32). Bu çalışmada Fourier Dönüşüm tekniğine dayalı metotlar ile L-FPP sisteminde işaret analizi yapılmış olup, her bir yöntemin sistemden elde edilen faz haritasını nasıl etkilediği ortaya konulmuştur.

Literatürde şimdiye kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde sadece dönüşüm ve faz kaydırma metotlarının karşılaştırıldığı görülmektedir (1-2, 4, 16). Örneğin Perry ve ark. geleneksel Fourier dönüşüm tekniği ile yapılan ızgara analizinden farklı olarak faz kaydırma tekniğine dayalı faz bulma algoritmalarının kenar etkileri, süreksizlikler ve gürültü var olduğunda bile sistemin doğruluğunu etkilemediğini göstermişlerdir. Aynı zamanda bu çalışma, faz kaydırma tekniği ve geleneksel Fourier dönüşüm tekniklerinin fazı ve doğruluğu nasıl etkilediğini de ortaya koymuştur (1).

Daha yeni bir çalışmada Huang ve ark. FPP ile çeşitli saçak deseni işleme metotlarını değerlendirmiş ve karşılaştırmıştır. Gürültünün etkileri ve sinüzoidal olmayan ızgaralar kullanıldığında, daha yüksek harmoniklerin etkisi hem simülasyon hem de deneysel sonuçlar ile açıklanmıştır. Dönüşüm tabanlı yöntemler arasında 2D W-FFT ve 2B sürekli

dalgacık dönüşümü (2D CWT) en sağlam algoritmalar gibi görünse de zaman alıcı oldukları ve gerçek zamanlı işleme için uygun olmadıkları sonucuna varılmıştır. Tüm dönüşüm tabanlı algoritmalar, faz haritasındaki süreksizlikler nedeni ile zayıf performans gösterir. Özet olarak, bu tekniklerin güçlü yanlarını geliştirmek ve zayıf yönlerini ortadan kaldırmak için gereksinimlere göre uygun metod seçilmelidir sonucuna varılmıştır (2).

Li ve ark. 2016 yılında shearlet dönüşümü (STM), EMD-FFT ve dalgacık dönüşümü (CWT) kullanılarak FPP sisteminde meydana gelen faz hatalarını hesaplamışlardır (33). Kaya ve ark. 2010 yılında FPP sisteminde girişim saçaklarını Hartley dönüşümü yöntemi ile analiz etmişlerdir. Hartley dönüşümü her ne kadar kısa sürse de geleneksel FFT'nin daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymuşlardır (34).

2004'te Dursun ve ark. Morlet ana dalgacığı kullanarak yansıtılan saçakların bir boyutlu sürekli dalgacık dönüşümü (1D-CWT) gradyan tekniğı ile faz dağılımını ve yüzey profilini hesaplamışlardır. Simülasyonlardan elde edilen veriler, faz değerlendirmesindeki mutlak hatanın, nesnenin fazının yüksek dereceli türevleriyle ilişkili görüldüğünü ortaya çıkarmıştır. Bu hatanın faz fonksiyonu için Taylor açılımlı yaklaşımların kullanılmasından dolayı kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca yaptıkları ön çalışma, Oberon gibi derlenmiş bir dil kullanıldığında uzun hesaplama süresinin yaklaşık on kat azaltılabileceğini göstermiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, 1D-CWT yönteminin birçok farklı alanda yükseklik profili belirleme için çekici olduğunu ortaya koymuştur. Faz bulma açısından 1D-CWT, FFT ve 1D-CWT gradyan tekniklerinden en iyisinin 1D-CWT olduğu sonucuna varmışlardır (35).

Salvi ve ark. yapılandırılmış ışık desenlerine dayalı yüzey profilometrelerini sınıflandırmışlardır. Aynı zamanda bu profilometreleri kullanılan faz belirleme tekniğine göre de ayırmışlardır. Çalışmada faz kaydırma, FFT ve CWT tekniklerinin karşılaştırmalarını yaparak bu yöntemlerin dezavantaj ve avantajlarını sunmuşlardır (16).

Sonuçta 3B FPP görüntüleme sistemlerinin doğruluğı, önemli ölçüde sistem kalibrasyonuna bağlıdır. Görüntüleme sisteminden alınan işaretlerin (ızgara desenleri) analiz edilmesi ile faz bilgisine varılır. Bu bilginin yüzey profiline dönüştürülmesi aşamasında bir takım sistem parametrelerine ve ızgara periyoduna ihtiyaç duyulur. Bu parametrelerde kalibrasyon işleminden sonra belirlenir. Mevcut kalibrasyon yöntemleri

temel olarak iki türe ayrılabilir: stereo görüş yaklaşımları ve haritalama uydurma yaklaşımları. Stereo görüş yaklaşımlarının esnek kalibrasyon hedefi ve lens distorsiyon tahmini gibi avantajları olsa da projektör kalibrasyonu karmaşıktır ve hataya açıktır. Haritalama montaj yaklaşımları ince taneli yüzey yapısı üretebilir, ancak bilinen yükseklikteki yardımcılar ve kurulumlar kalibrasyon prosedürünü hantal hale getirebilir (43-45). Bu tezde ise değişik bir kalibrasyon metodu kurgulanmıştır. Bu metotta kalibrasyon cismi kullanır. Gerçek yükseklik değerleri bilinen bir cisim alınır. Bu cisim kalibrasyonu olmayan L-FPP sistemine konulur ve faz sonucu işaret analizi ile elde edilir. Daha sonra bu faz kullanılarak yüzey profili L-FPP sistemi için belirlenen formül ile bulunur. En sonrada gerçek yükseklik değerleri için bir kesit alınır. Bu kesitin ortalama değeri ile L-FPP sisteminden elde edilen görüntünün kesitinin ortalama değerleri birbirine eşitlenerek bir kalibrasyon çarpanı M tespit edilir. Bu M değeri bundan sonra 3B L-FPP sisteminden alınacak tüm yüzey profillerini hesaplamak için kullanılır.

1.2. Tezin Literatüre Katkıları

Literatürde şimdiye kadar geleneksel Fourier Dönüşüm Tekniğinin sakıncalı yönlerini (Süreksizlikler, kenar etkileri, arka plan gürültüsü vb.) ortadan kaldırmak için önerilen yöntemlerin nasıl avantaj sunduğu ve sistemin doğruluğunu nasıl arttırdığı ile ilgili teorik bir çalışmaya rastlanmamıştır. İşte bu tez literatürdeki bu boşluğu kapatmak için yapılmıştır. Tezde yapılan gerek deneysel gerekse benzetim çalışmalarının aşağıdaki katkıları sağlayacağı düşünülmektedir.

- 1- Geleneksel ızgara analiz Fourier Dönüşüm Tekniğinin (FFT) kullanılması durumunda L-FPP sistemini etkileyen problemlerin ortaya konulması.
- 2- SG Filtreli Fourier Dönüşüm Yönteminin (SG-FFT) L-FPP sisteminin doğruluğunun nasıl etkilendiğinin ortaya konulması.
- 3- Pencerelemiş Fourier Dönüşüm Yöntemini (W-FFT) kullanarak L-FPP'nin doğruluğunun nasıl etkilendiğini belirlemek.
- 4- Ampirik Mod Kip Ayırıştırma-Fourier Dönüşüm Yönteminin (EMD-FFT) kullanıldığı durumda L- FPP'nin doğruluğunun araştırılması.
- 5- Gaussian Filtreli Modülasyon Yöntemi (GPM-FFT) ile, L-FPP sisteminin doğruluğunun nasıl değiştiğinin araştırılması.
- 6- L-FPP sisteminin kalibrasyonu için yeni bir yöntemin prensiplerinin tanıtımı

1.3. Tezin Genel Akışı

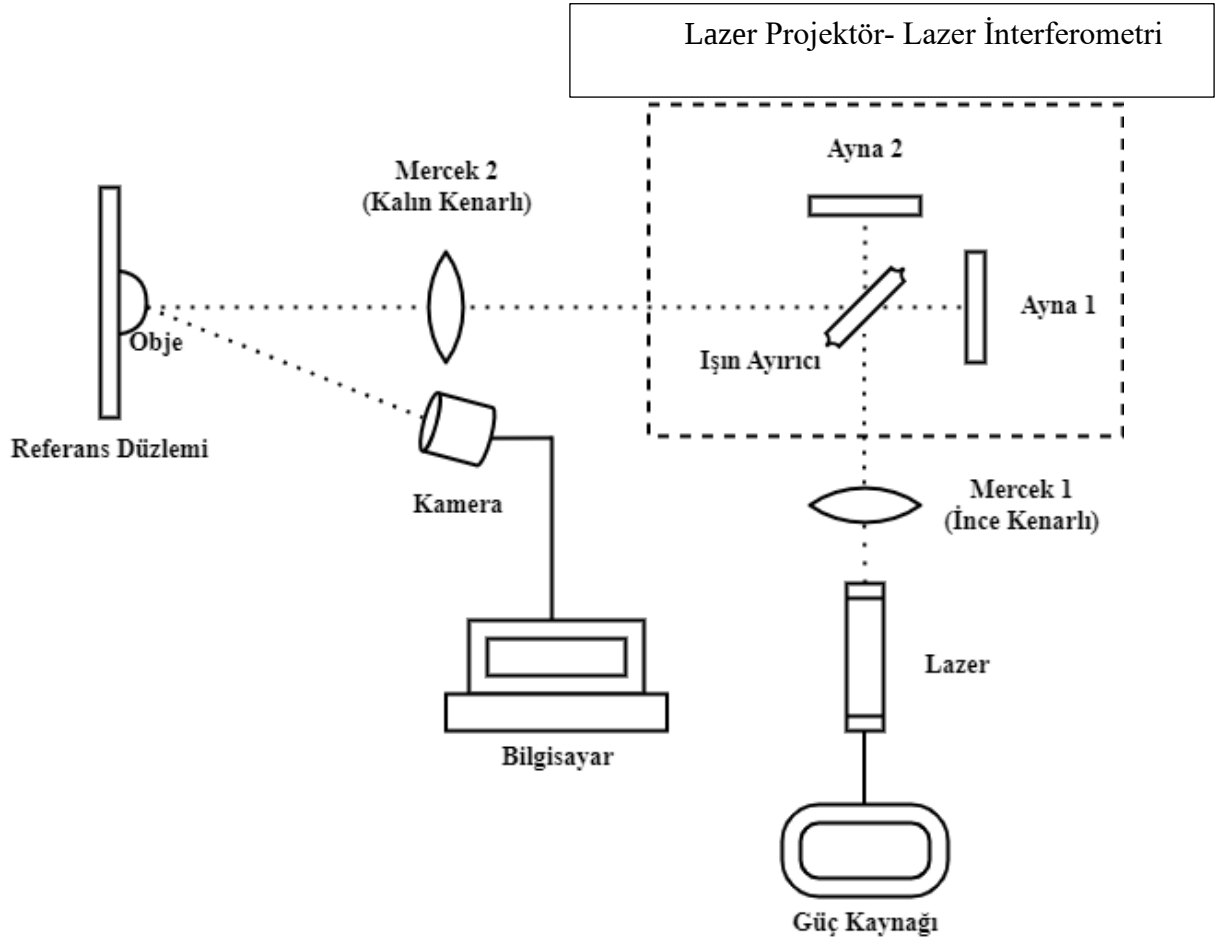
Bu çalışma aşağıda belirtildiği gibi düzenlenecektir. 2. kısımda L-FPP sistemi, L-FPP deney düzeneği, deneyde kullanılan malzemeler, ızgara analiz tekniği FFT, ve FFT'ye dayalı olan metotların tanımları sunulacaktır. 3.kısımda 2. Kısımda sunulan yöntemler ile simüle edilen L-FPP sisteminden alınan ızgara desenlerinden (işaretler) elde edilen fazlar ve faz hataları sunulacaktır. Deneysel olarak L-FPP sistemi ile 3 farklı cismin 3B görüntüsü elde edilmiştir. L-FPP sisteminden elde edilen işaretler analiz edilerek yükselti bilgileri çıkartılmıştır. Ticari olarak kullanılan 3B görüntüleme sisteminden elde edilen yükselti bilgisi ile bu tezde kalibre edilmiş L-FPP sisteminden elde edilen yükselti arasındaki hata değeri ortaya konularak sistemin doğruluğu Kısım 4'de ortaya konulacaktır. Böylece bu tezde geleneksel FFT'ye dayalı tüm işaret analiz yöntemlerinin L-FPP sisteminin doğruluğunu nasıl etkilediği tespit edilebilecektir.

2. L-FPP SİSTEMİ VE İŞARET ANALİZ YÖNTEMLERİ

2.1. Lazer İnterferometrilili Izgara Projeksiyon Profilometre Sistemi (L-FPP)

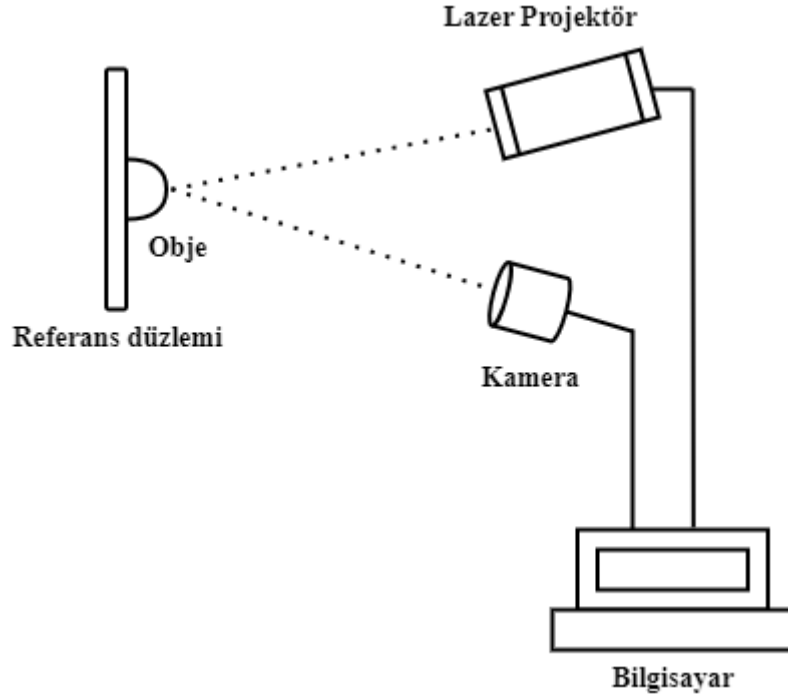
Cisimlerin üç boyutlu yüzey görüntülenmesi yapılırken yüzeye zarar veren yöntemler tercih edilmemektedir. Bu nedenle yüzeye teması olmayacak şekilde 3B görüntüleme yapabilen sistemler tercih edilmektedir. Optik tarama yöntemleri çalışma prensibine göre aktif tarama yöntemleri (Lazer üçgenleme, Lazer interferometri, Yapısal ışıklandırma, Uçuş süresi) ve pasif tarama yöntemleri (Stereo tabanlı, Fotogrametrik, Gölge tabanlı, Siluet tabanlı) olarak ikiye ayrılabilir (10-15). Bunların dışında akustik ve manyetik tabanlı sistemlerde bulunmaktadır. Bu yöntemlerden optik yöntemler farklı alanlarda çok sık kullanılmaktadır. Çünkü onlar yüksek performanslı ışık kaynağı ve görüntüleme cihazlarının gelişimine paralel olarak gittikçe popüler olmaktadır.

Optik interferometri, uçuş süresi (TOF) tekniği, stereo görüş tekniği, yapılandırılmış ışık (SL) ve odaktan şekil (shape from focus) gibi 3B görüntüleme için çeşitli optik ölçüm sistemleri geliştirilmiştir. Bahsedilen optik yöntemleri, farklı optik ölçüm ilkelerine dayalıdır; belirli ölçüm hassasiyetine, uzamsal/zamansal çözünürlüğe ve ölçüm aralığına sahiptir. Bu tez çalışmasında optik üç boyutlu görüntüleme yöntemlerinden biri olan Lazer Interferometrilili-Izgara Projeksiyon Profilometre (L-FPP) sistemi kullanılacaktır. Böyle bir sistemde ızgara üreten lazer projektörün yapısı Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1 Lazer Interferometrilili- ızgara projeksiyon profilometre sistemi blok şeması

Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi projektörün yapısı Michelson İnterferometresine dayalıdır. Bu interferometri de lazerden gelen ışık demeti, ince kenarlı bir mercek ile toplanarak gelen ışığın yarısını geçirip yarısını yansıtan bir demet bölücüyü çarpar. Böylece gelen demet ikiye ayrılır; bir demet hareketli aynaya (Ayna 2) doğru geçer, diğeri ise ayarlanabilir aynaya (Ayna 1) doğru yansıtılır. Her iki ayna da ışığı doğrudan demet bölücüyü doğru geri yansıtır. Ayna 2’den gelen ışığın yarısı ise demet bölücüdün ekrana geçirilir. Bu yolla orijinal ışık demeti bölünür ve oluşan demetlerin bir kısmı tekrar bir araya getirilir. Demetler aynı kaynaktan geldiği için fazları belli bir ilişki içindedir. Lazer kaynağı ve ışın bölücü arasına bir mercek yerleştirildiğinde ışık ikiye bölünür ve aydınlık ve karanlık halkalardan ya da saçaklardan oluşan bir girişim deseni ekranda gözlenir. Girişim deseni (Izgara Deseni-Interference Patern) görüntüsünün daha net büyütülmesi ve ölçülecek tüm cismi kapsama alanı içine almak amacı ile çıkışa kalın kenarlı bir mercek konulmuştur. Yuvarlak oluşan saçak deseni, aynaların ayarlanması ile dikey hale getirilir. Bunun yanında saçak deseninin sıklığı (frekansı) yine bu aynalarla yapılır.



Şekil 2.2 Lazer Projektörlü- Izgara projeksiyon profilometre sistemi blok şema genel görünümü

Düzenekte görülen projektör lazer projektör olup Şekil 2.2’de sunulmaktadır. Şekil 2.2’den görüldüğü gibi FPP tekniğinde üç-boyutlu görüntüsü elde edilecek cisim üzerine ızgara deseni düşürülür. Objeye yüksekliğinden dolayı cismin üzerindeki desenlerde eğrilmeler meydana gelir. Bu değişimlerden çeşitli sinyal analiz yöntemleri ile faz hesap edilir. Fazdan da 3B yükseklik bilgisine varılır. Bu çalışmada alınan görüntüler yukarıdaki sistem ile elde edilecektir.

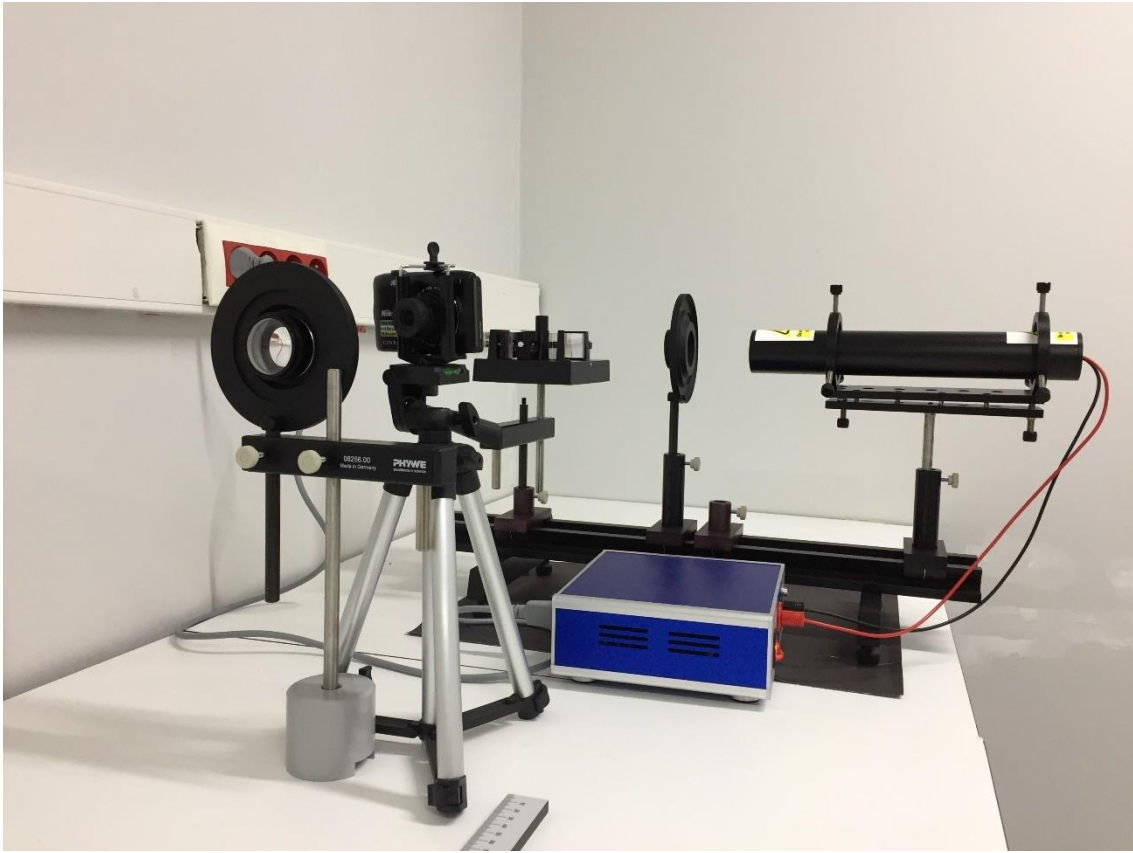
2.1.1. L-FPP Deney Düzeneği ve Kullanılan Malzemeler

Deney düzeneğinde Şekil 2.3 ve 2.4’te görüldüğü üzere 632 nm dalga boylu ve 1mW gücünde He-Ne (Helium-Neon) Lazer kullanılmıştır. 230 VAC değerinde harici bir güç kaynağı ve metal taban plakası 120 x 120 mm olan çıkarılabilir tutma sapı bulunan 30 x 30 mm ayarlanabilir yüzey aynalarına sahip bir Michelson İnterferometresi seçilmiştir.

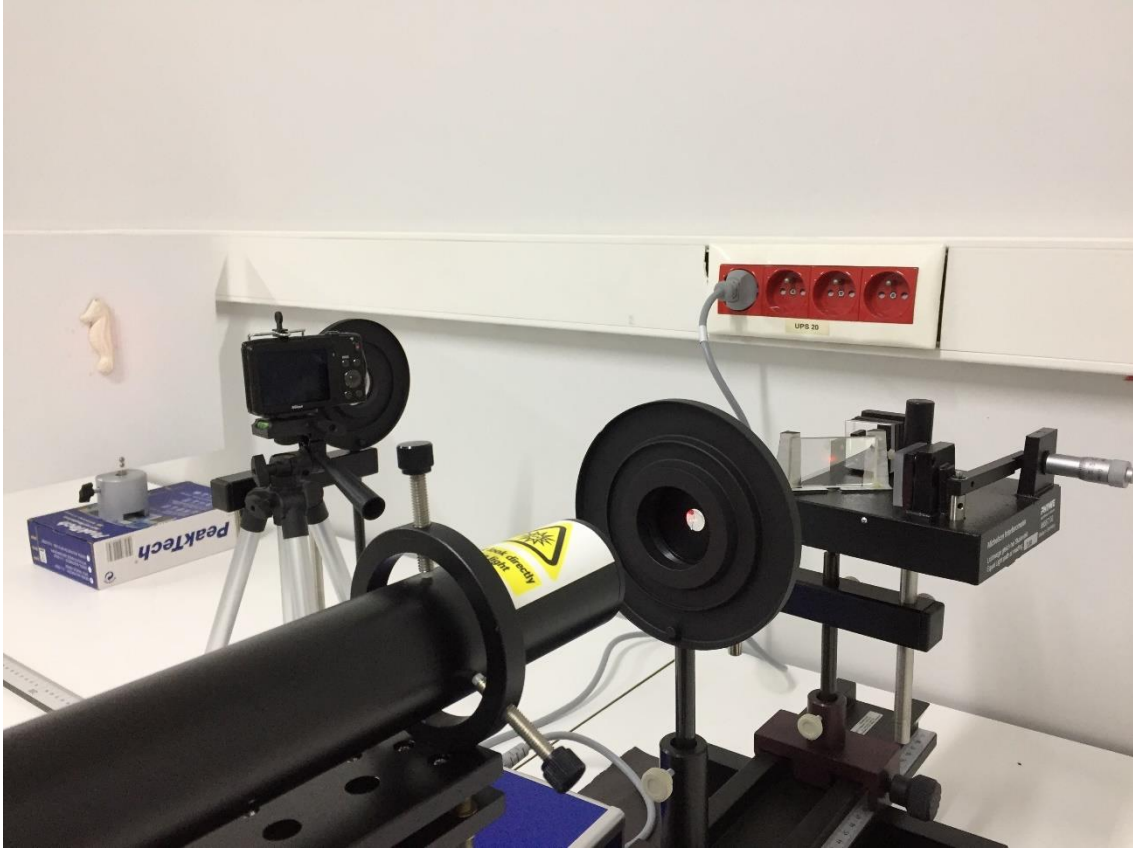
Kamera olarak 16 megapiksel CCD sensörü, 6x optik yakınlaştırma lensi (35 mm eşdeğeri: 26-156 mm), e-VR (elektronik titreşim azaltma), 2,7 inç 230k noktalı LCD

ekran, akıllı portre sistemi, 720p HD video kaydı ve 5 cm minimum odaklama mesafesi gibi özelliklere sahip Nikon Coolpix S3200 cihazı kullanılmıştır.

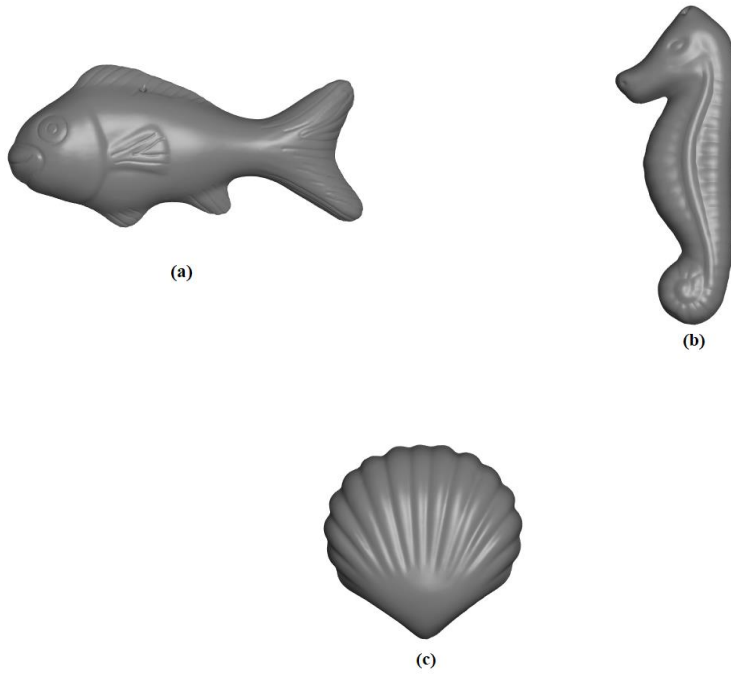
Referans düzlem olarak belirlediğimiz ekran üzerinde 3 adet farklı cismin 3B-Görüntüsü elde edilmiştir. Bu cisimler balık, denizati ve deniz kabuğudur. Balık (4,3x9,5 cm), denizati (3,5x9,5 cm) ve deniz kabuğu (5,5x5,5cm) ebatlarında alçıdan yapılmış cisimlerdir. Cisimlerin, Shining 3D firmasının OptimScan-5M modeli üç boyutlu tarama cihazıyla 0.005-0.015 mm doğruluğu ile taratılmış 3B görüntüleri Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.3 L-FPP sistemi deney düzeneği (Görünüm 1)



Şekil 2.4 L-FPP sistemi deney düzeneği (Görünüm 2)



Şekil 2.5 3B görüntüsü alınacak cisimlerin 2B resimleri : (a) balık, (b) denizatı ve (c) deniz kabuğu.

2.2. L-FPP Sisteminde Kullanılan Izgara Analiz Yöntemlerinin Prensipleri

2.2.1. Geleneksel Fourier Dönüşüm Tekniği -FFT

Geleneksel Fourier dönüşümünü 1982'de Takeda tarafından ızgara analizi için kullanılmıştır (29). Bir ızgara deseninin matematiksel ifadesi 2.1 ile verilebilir.

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos (2\pi f_o x + \phi(x, y)) \quad (2.1)$$

Denklemden, a arka plan şiddet dağılımı ve b 'de ızgara genliğini temsil eder. ϕ ölçülen profil hakkında bilgi taşıyan fazdır.

Bu desen Denklem 2.2 de ki gibi de yazılabilir.

$$i(x, y) = a(x, y) + \frac{1}{2}b(x, y) \{ \exp(i2\pi f_o x) \exp(i\phi(x, y)) + \exp(-i2\pi f_o x) \exp(-i\phi(x, y)) \} \quad (2.2)$$

$$i(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(i2\pi f_o x) + c^*(x, y) \exp(-i2\pi f_o x) \quad (2.3)$$

$$c(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y) \exp(i\phi(x, y)) \quad (2.4)$$

Denklem (2.3)'ün x 'e göre hızlı Fourier dönüşümü denklem (2.5) ile verilir.

$$I(\xi, y) = A(\xi, y) + C(\xi - \xi_o, y) + C^*(\xi + \xi_o, y) \quad (2.5)$$

ξ , x yönündeki uzamsal frekanstır.

Böylece arka plan $A(\xi, y)$, işaretin $\xi - \xi_o$ ve $\xi + \xi_o$ frekansında iki frekans bileşeni Fourier dönüşümü yardımı ile ayrılır. Bir bant geçiren filtre (transfer fonksiyonu $H(\xi, y)$) yardımı ile sadece $C(\xi - \xi_o, y)$ bileşeni alınır. Denklem 2.6 ile bu durum özetlenir.

$$C(\xi, y) = (\xi - \xi_o, y) = I(\xi, y)H(\xi, y) \quad (2.6)$$

Sonra ters hızlı Fourier dönüşümü ile $c(x, y)$ elde edilir.

$$c(x, y) = \text{ifft}\{I(\xi, y)H(\xi, y)\}$$

Süreksiz (Wrap) Faz ise aşağıdaki gibi bulunur.

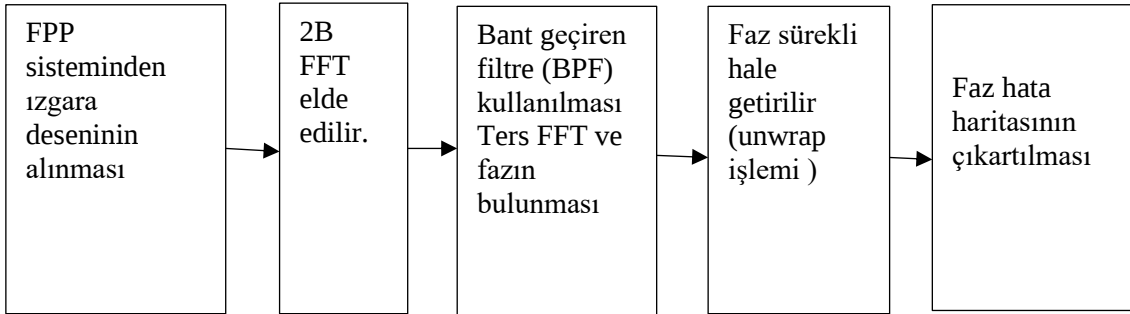
$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{im}\{c(x, y)\}}{\text{re}\{c(x, y)\}}$$

$\text{im}\{c(x, y)\}$; $c(x, y)$ nin imajiner kısmı, $\text{re}\{c(x, y)\}$; reel kısmıdır. Bu süreksiz faz $-\pi$ ile $+\pi$ arasındadır. Bu faz uygun bir unwrap algoritması kullanılarak sürekli hale $[\theta(x, y)]$ getirilir. Faz, hem referans hem de obje konularak çekilen görüntü için hesaplanır ve fark Denklem 2.7’de sunulur.

$$\Delta\theta = \theta_o - \theta_{ref} \quad (2.7)$$

Burada θ_o , unwrap edilmiş obje görüntüsünden elde edilen fazdır ve θ_{ref} ‘de referans görüntüden elde edilmiş unwrap fazdır.

Aşağıda bu metodun algoritması için kullanılan akış diyagramı Şekil 2.6’da sunulmaktadır.



Şekil 2.6 Geleneksel Fourier dönüşüm tekniği algoritmasının akış diyagramı

2.2.2. SG Filtre- Fourier Dönüşüm Yöntemi (Savitzky–Golay (SG) – FFT)

Izgara desenindeki gürültü problemini çözmek için, SG filtresi kullanılabilir (36). En küçük kareler tekniği ile verilerin ayırt edilmesi ve yumuşatılmasını hesaplamak için basitleştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemin hesaplama hızı en küçük kareler tekniğinden daha iyidir. Yöntemin en büyük dezavantajları: İlk ve son veri noktalarından bazıları, orijinal Savitzky-Golay yöntemiyle düzeltilemez. Ancak J. Steinier ve diğerleri ve A. Khan bu sorunun aşıldığı bu makalede sunulan yöntemi geliştirmişlerdir (37).

Filtre uzunluğu veya çerçeve boyutu, N tektir. $N = 2M + 1$ ve $N \geq d + 1$ olduğu varsayılır; burada $d =$ polinom derecesidir. x_n , gürültülü örneğimiz varsa, $n = 0, 1, \dots, L - 1$ ve bunları yumuşatılmış çıktılara y_n 'lere $n = 0, 1, \dots, L - 1$; dönüştürmek istiyorsak, o zaman veri vektörü x , $n = L$ giriş noktaları ve x 'in her bir kenarı N boyutlu ve M noktalı olmak üzere; $x = [x_{-M}, \dots, x_{-1}, x_0, x_1, \dots, x_M]^T$ yerine $x = [x_0, x_1, \dots, x_{L-1}]^T$ yerleştirilir. Çıkışı hesaplamak için ilk $M + 1$ çıkış y_i hesaplanır.

$$y_i = b_{M-i}^T w(M), \quad i = 0, 1, \dots, M$$

Burada durum vektörü

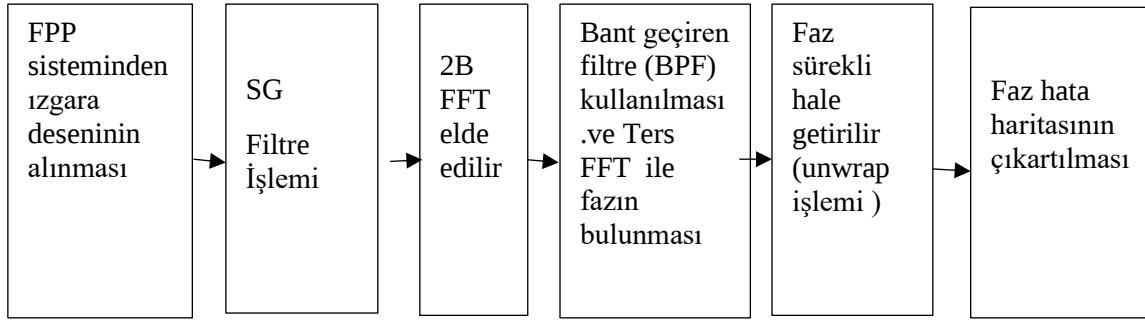
$$w(M) = \begin{bmatrix} x_{N-1} \\ \vdots \\ x_0 \end{bmatrix}$$

Katsayı matrisi B aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

S-G filtre katsayıları $(b_0, b_1, \dots)$, B matrisinin elemanlarıdır.

$$B = [b_{-M}, \dots, b_{-1}, b_0, b_1, \dots, b_M]$$

Savitzky – Golay (SG) filtreleme, verilerin polinomlarla yerel en küçük kareler uyumuna dayalı, verileri yumuşatmak ve gürültülü verilerin türevlerini hesaplamak için popüler bir yöntemdir. Veri işlemenin birçok alanında analitik kimyadaki spektrumlardan yer bilimleri ve tıbbı kadar popüler olmuştur. SG filtreleri genellikle eşit mesafeli veri noktalarına uygulanır ve her bir veri noktası k 'nın (genellikle simetrik) bir $k - m \dots k + m$ komşuluğundaki verilere verilen n . dereceden bir polinoma uydurmaya dayanır (bu aralık $2m + 1$ veri noktası içerir). 1964'te çeşitli polinomlar ve alt küme boyutları için evrişim katsayıları tabloları yayınlayan Abraham Savitzky ve Marcel J. E. Golay tarafından popüler hale getirilmiştir. Tablolardaki bazı hatalar düzeltilmiştir. Yöntem, 2 ve 3 boyutlu verilerin işlenmesi için sonradan genişletilmiştir (37). SG Filtre- Fourier Dönüşüm Yönteminin (SG-FFT) akış diyagramı Şekil 2.7'de sunulmaktadır.



Şekil 2.7 SG Filtre- Fourier Dönüşüm Yönteminin (SG-FFT) algoritmasının akış diyagramı

2.2.3. Pencerelemiş Fourier Dönüşüm Yöntemi (W-FFT)

Bu yöntem Geleneksel Fourier dönüşümüne dayanmaktadır. Izgara deseninin (Bkz (2.1)) 1B Fourier dönüşümü aşağıdaki denklem ile verilebilir.

$$I(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} i(x) \exp(-j\xi x) dx \quad (2.8)$$

$$i(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi) \exp(j\xi x) d\xi \quad (2.9)$$

$I(\xi)$, $i(x)$ 'in Fourier dönüşümüdür. $i(x)$ 'in pencerelemiş Fourier dönüşümü ve tersi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S(u, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} i(x) g(x - u) \exp(-j\xi x) dx \quad (2.10)$$

$$i(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u, \xi) g(x - u) \exp(j\xi x) d\xi du \quad (2.11)$$

$S(u, \xi)$ pencerelemiş Fourier spektrumu olarak bilinir; $g(x)$ Gaussian fonksiyonu olarak seçilen penceredir.

$$g(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.12)$$

σ , $g(x)$ 'in uzunluğunu kontrol eden parametredir. Normal Fourier dönüşümünde $i(x)$ $I(\xi)$ 'e dönüştürülür fakat sadece frekans bilgisi vardır, konum bilgisi hemen hemen hiç

tanımlanamaz. $I(\xi)$ 'den spektrumdaki frekans bilgisi elde edilir fakat işaretle bu frekansların nerede olduğu bilinemez. Bunun aksine W-FFT kullanarak sadece frekans bileşeni değil, aynı zamanda konum bilgisine de ulaşmak mümkün olur. Temelde bu dönüşüm tekniği iki avantaj sunmaktadır.

- 1- W-FFT, $g(x)$ 'in uzunluğu ile belirlenen bir alan üzerinde gerçekleştirildiğinden, mesafelerinin Gauss penceresinin etkin yarıçapından daha büyük olması koşuluyla, spektral analizde bir konumdaki sinyal başka bir konumdaki sinyali etkilemeyecektir.
- 2- Bir yerel alandaki sinyalin spektrumunu incelemek, tüm alan spektrumunu incelemekten daha kolaydır. Bu nedenle W-FFT spektrumu daha kolay yorumlanır.

W-FFT'nin spektrumu iki yolla incelenebilir.

- 1- Eşikleme yapılarak düşük genliğe sahip spektral bileşenler sıfırlanır. Böylece gürültü tüm spektruma yayılır. Gürültü ortadan kalktıkça, yüksek kaliteli bir 3B görüntü oluşturulabilir.
- 2- Spektrumun tepe noktasına karşılık gelen frekans, yerel frekans veya anlık frekans olarak kabul edilir. Bu yaklaşım, yerel bir alandaki sinyalin spektrumunun oldukça basit olduğunu ve sadece bir frekanstan oluştuğunu gösterir.

W-FFT'ye dayalı olarak, ızgara demodülasyonu için iki farklı yaklaşım mümkündür ve bunlar sırasıyla pencerelenmiş Fourier filtreleme (W-FFT) yöntemi ve pencerelenmiş Fourier sırtları (W-FFR) yöntemi olarak adlandırılır. İlk yaklaşım, pencerelenmiş Fourier alanındaki ızgara desenini filtreler ve ikinci yaklaşım, ızgara deseni ile bilgisayar tarafından oluşturulan pencerelenmiş üstel öğeler arasındaki en iyi eşleşmeyi sağlar. Bu çalışmada W-FFT yöntemi kullanılacaktır ve aşağıda kısaca açıklanacaktır (38,39).

Denklem 2.2'den görüldüğü gibi ızgara deseni iki üstel fonksiyondan ve bir arka plan şiddetinden oluşur. Taşıyıcı frekansını ele aldığımızda frekans bölgesinde üç spektrum bileşeni vardır. Denklem 2.2'nin W-FFT biçimi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$i(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{[i(x) \otimes h(x, \xi)] \otimes h(x, \xi)\} d\xi \quad (2.13)$$

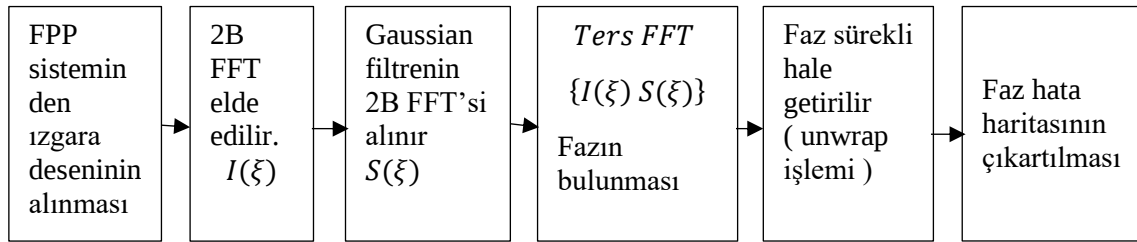
$h(x, \xi) = g(x)\exp(j\xi x)$ olarak alınır ve $\otimes$ konvolüsyonu göstermektedir. W-FFT belirli bir bölgede alınarak yazılırsa aşağıda verilen denklem ile ifade edilebilir.

$$\overline{i(x)} = \frac{1}{2\pi} \int_a^b [i(x) \otimes h(x, \xi)] \otimes h(x, \xi) d\xi \quad (2.14)$$

Eğer $|i(x) \otimes h(x, \xi)|$ belli bir eşik değerinden daha küçük ise gürültü olarak davranır ve sıfırlanarak kaldırılır. Eşik değeri seçimi önemlidir. İntegral sınırları a ile b arasında sınırlandırılmıştır. Böylece 2B spektrumda üç frekans bileşeninden sadece pozitif frekanslı kısmın spektrumu elde edilecektir. Bu durumda faz 2B da aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{im}\{\overline{i(x, y)}\}}{\text{re}\{i(x, y)\}} \quad (2.15)$$

Bu faz denklem (2.7) 'de yerine yazılarak faz farkı elde edilir. W-FFT yönteminin akış diyagramı Şekil 2.8'de sunulmaktadır.



Şekil 2.8 W-FFT yönteminin algoritmasının akış diyagramı

2.2.4. Ampirik Mod Kip Ayrıştırma-Fourier Dönüşüm Yöntemi (EMD-FFT)

Huang ve arkadaşları tarafından geliştirilen EMD yönteminde durağan olmayan sinyal, Hilbert-Huang dönüşümünü kullanarak durağan hale getirilir (40). Bu yöntemde, sinyalin aynı anda birden fazla farklı eş zamanlı salınım kiplerine (IMF'ler) sahip olabileceği düşüncesi yer almaktadır. Bu düşünceden yola çıkılarak karmaşık bir sinyal, kolayca modellenebilen birkaç IMF ve bir arta kalanlar (residue) toplamına ayrıştırılabilmektedir. Burada, IMF'ler karmaşık sinyalin yerel karakteristik ölçeğine dayanılarak çıkarılmaktadır. EMD'de IMF ve arta kalanlar toplanarak bilgi kaybı ve hata olmadan orijinal işaret elde edilmektedir. IMF'ler oluşturulurken birtakım koşulları

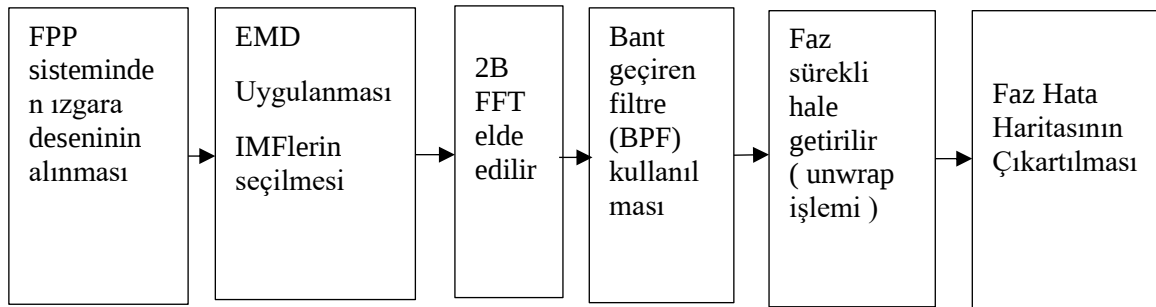
sağlamalıdır. Örneğin sıfır geçişlerinin sayısı, uç noktalarının sayısına eşit olmalı ya da aralarındaki fark bir olmalıdır. Diğer koşul ise işaretin her bir zaman örneği için üst zarf ve alt zarfın ortalama değeri sıfır olmalıdır. Üst zarf maksimum noktaların interpolasyonu alt zarf da minimum noktaların ara değerlemesi ile bulunmaktadır. Sonuçta bulunan IMF'ler neredeyse birbirlerine diktir. (41)'de iki boyutlu (42)'de tek boyutlu EMD açıklanmaktadır. Burada iki boyutlu EMD kullanılmaktadır.

IMF'ler bulunurken önce sinyalin tüm yerel maksimum-minimum noktaları belirlenir. Üst zarf ve alt zarf adı verilen fonksiyonlar bu noktalar kullanılarak ve ara değerlendirme (interpolation) ile oluşturulur. Devamında bu iki zarf fonksiyonunun ortalaması alınarak orijinal sinyalden daha düşük frekansa sahip bir bileşen elde edilir. Zarf ortalamalarının orijinal sinyalden çıkarılması ile de en yüksek frekanslı bileşen (IMF1) elde edilir. Aşağıdaki denklemde ifade edildiği üzere EMD, bir $x(t)$ sinyalini uyarlamalı olarak bir L sayısına ayırıştırır. IMF'ler $h_{(i)}(t)$, kalan $r(t)$ ve $1 \leq i \leq L$ olarak alınırsa $x(t)$ aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$x(t) = \sum_{i=1}^L h_{(i)}(t) + r(t) \quad (2.16)$$

Elde edilen dalganın maksimum ve minimum nokta sayıları ve sıfır geçiş sayıları arasında yalnızca 1 fark varsa ve dalganın yerel ortalaması sıfır ise bu dalga IMF olarak tanımlanır. Eğer bu şartlar ilk tekrarda sağlanamazsa aynı işlemler şartlar sağlanana kadar tekrarlanır. Simülasyonda ise $i(x, y)$ işaretinin IMF'leri bulunur, daha sonra hangi numaralı IMF'ler alınıyorsa alınıp, toplanır ve filtrelenmiş işaret Denklem 2.3'deki gibi olur. Bu işaret geleneksel Fourier dönüşümündeki sırası ile Denklem 2.5 ve 2.7'deki işlemlere tabii tutulup, faz farkı elde edilir.

EMD-FFT yönteminin akış diyagramı Şekil 2.9'da sunulmaktadır.



Şekil 2.9 EMD-FFT yönteminin algoritmasının akış diyagramı

2.2.5. Gaussian Filtreli Modülasyon Yöntemi (GPM-FFT)

Bu yöntemde $i(x)$ ve $g(x)$ Gaussian penceresi çarpılır. Daha sonra Fourier dönüşümü ile uzamsal frekans düzlemine geçilir. Bundan sonra geleneksel Fourier dönüşüm tekniğindeki basamaklar uygulanır ve faz elde edilir. Aşağıda sırası ile yöntemin denklemleri sunulmaktadır.

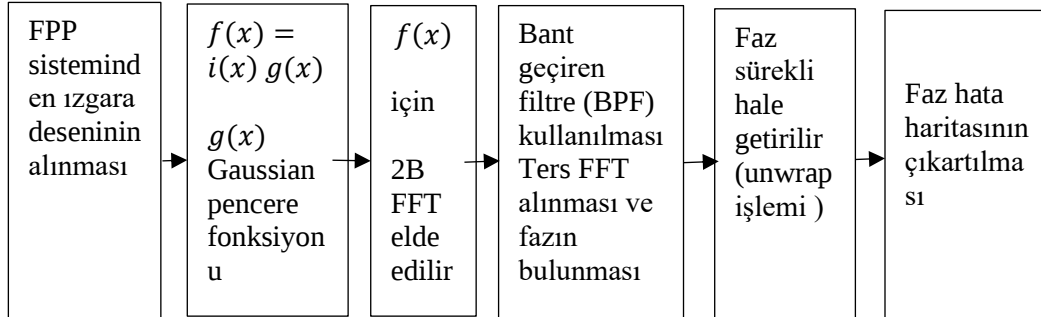
Girişim deseninin ve Gaussian penceresinin çarpımı aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$f(x) = i(x) g(x) \quad (2.17)$$

Çarpım uzamsal düzlemde modülasyonu göstermektedir. Fourier dönüşümü, Denklem (2.18) ile elde edilerek, modülasyon işlemi frekans düzleminde elde edilir.

$$F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-j\xi x) dx \quad (2.18)$$

Buradan sonra kenar etkileri giderilen yüksek frekanslı gürültü bileşenleri elimine edilen işaret, geleneksel Fourier dönüşümü (2.6 daki gibi) ile işlenerek faz farkı Denklem 2.7 ile elde edilir. Şekil 2.10'da yöntemin akış diyagramı resmedilmektedir (32).



Şekil 2.10 Gaussian Filtreli Modülasyon Yöntemi (GPM-FFT) algoritmasının akış diyagramı

2.3. Cismin Yüzey Profili (Yükseltisi)

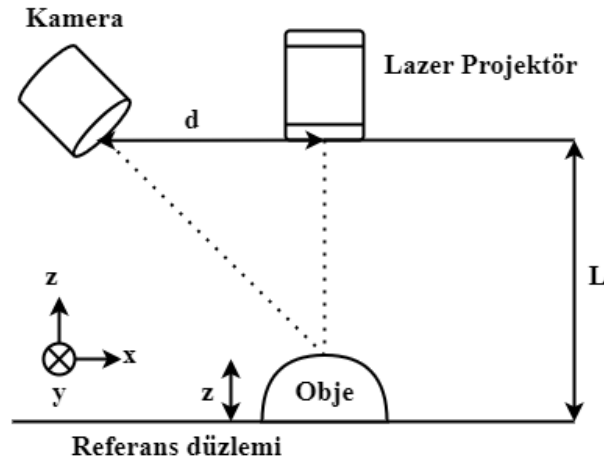
L-FPP sisteminde cismin yüzey profilinin elde edilmesi için matematiksel yöntem Şekil 2.11'de verilen ızgara projeksiyon düzeneği dikkate alınarak ortaya konabilir (29). Şekilde görülebileceği gibi kamera ve projektörün optik eksenleri cismin yüzeyinde

kesişmektedir. Burada, d : projektör ile kamera arasındaki uzaklık, p_0 : referans düzlemindeki saçak periyodu, L : kamera projektör düzlemi ile referans düzlemi arasındaki uzaklığı göstermektedir. Hem referanstan hem de nesneden elde edilen saçak desenlerinin sürekli hale getirilmiş (unwrapped) faz dağılımları arasındaki fark denklem (2.19)'da ki gibi bulunabilir.

$$\phi_{son}(x, y) = \phi_0(x, y) - \phi_{ref}(x, y) \quad (2.19)$$

Cismin yükseltisi (z) ise aşağıda Denklem 2.20 'de gösterilmiş ve parametreler Şekil 2.11'de çizilerek açıklanmıştır. Denklemdeki saçak periyodunun (p_0) nasıl hesaplandığı Bölüm 3'te ayrıca anlatılmıştır.

$$z(x, y) = \frac{L \cdot p_0 \cdot \left(\frac{\phi_{son}(x, y)}{2\pi} \right)}{p_0 \cdot \left(\frac{\phi_{son}(x, y)}{2\pi} \right) - d} \quad (2.20)$$



Şekil 2.11 Lazer projektör ve kameralı L-FPP sistemi ve parametreler.

3. L-FPP SİSTEMİNİN BENZETİMİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. L-FPP Sisteminin Benzetim Çalışmaları ve Sonuçlar

3B L-FPP görüntüleme sisteminden alınan işaretin benzetimini yapmak için üç cisim seçilmiştir. Bunlar Şekil 3.1’de gösterilen yarım küre, koni ve karmaşık tepeli cisimleridir. Böyle bir sistemde kamera ile yakalanan 2B ızgara deseni matematiksel olarak denklem (3.1) ile verilebilmektedir.

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y)) + noise \quad (3.1)$$

Bu denklemdeki $\phi(x, y)$ fazı, Şekil 3.1’de matematiksel olarak türetilen cisimlere eşittir. L-FPP sisteminden alınan ızgara deseni $i(x, y)$; 512x512 piksel olarak üretilmiştir. $\phi(x, y)$ de; 512x512 piksel boyutunda üretilir ve yarım küre denklem (3.2) ile elde edilir.

$$\phi(x, y) = Re \left\{ 10 \sqrt{1 - \frac{(x - 256)^2 + (y - 256)^2}{240^2}} \right\} \quad (3.2)$$

Burada $Re\{ \}$ kompleks ifadenin gerçel kısmını göstermektedir. Izgara deseninin uzamsal frekansı $f_0 = 1/16$ olarak ayarlanmıştır. $a(x, y)$ arka plan şiddeti, 1 olarak tanımlanmıştır. $b(x, y)$ modülasyon şiddeti ise 1’dir. Gürültü olarak beyaz gauss gürültüsü (WGN) seçilmiş ve skaler olarak belirtilen gürültü örneklerinin gücü 8 dBW olarak alınmıştır.

Benzetimi yapılmış yarım küre için Denklem 3.2’deki gerçel $\phi(x, y)$ fazı, Denklem 3.1’de yerine koyularak Şekil 3.1(a) elde edilir.

Koni cismi için denklem (3.1)’deki faz Denklem (3.3) ile hesaplanır. Ancak 200’den küçük yerler sıfır alınarak elde edilen faz (3.1)’de yerine konulur.

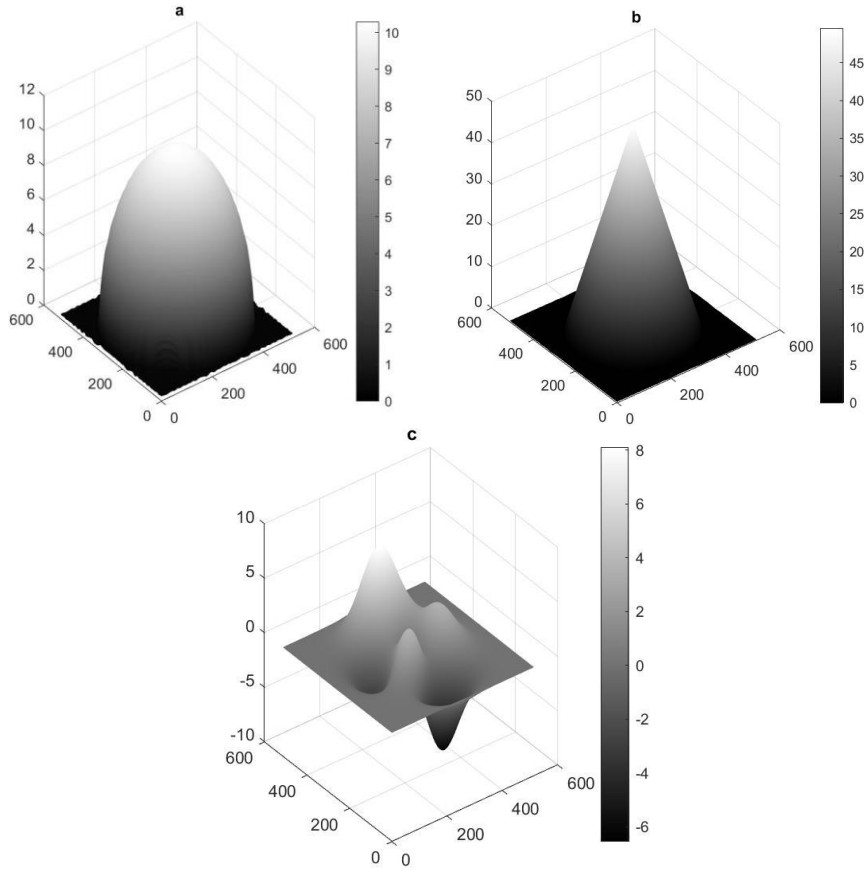
$$\phi(x, y) = 50 \left(1 - \frac{\sqrt{(x - 256)^2 + (y - 256)^2}}{200} \right) \quad (3.3)$$

Benzetimi yapılmış koni, yani gerçel faz Şekil.3.1(b)’de verilmektedir.

Karmaşık tepeli cisim için Denklem (3.1)'deki faz ifadesi Denklem (3.4) ile elde edilir.

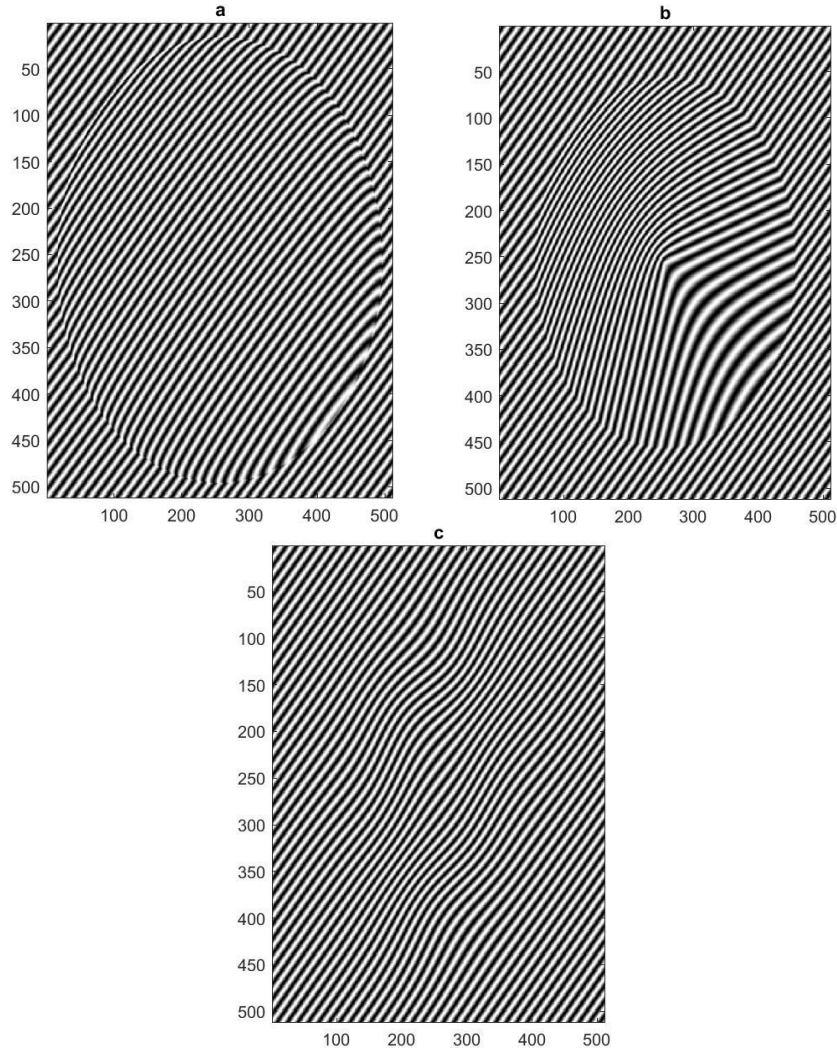
$$\phi(x, y) = 3(1 - x)^2 e^{(-x^2 - (y+1)^2)} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) e^{(-x^2 - y^2)} - \frac{1}{3} e^{(-(x+1)^2 - y^2)} \quad (3.4)$$

Benzetimi yapılmış karmaşık tepeli cisimin gerçek fazı, $\phi(x, y)$ Şekil.3.1(c)'de verilmektedir.



Şekil 3.1 (a) Yarım küre, (b) Koni ve (c) Karmaşık tepeli şekil için gerçek faz görüntüleri.

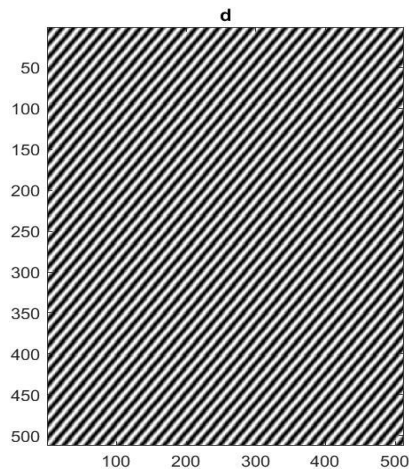
Bu cisimler kullanılarak 3B Izgara projeksiyon sisteminden elde edilecek ızgara desenlerinin simülasyon sonuçları Şekil 3.2'de sırası ile sunulmaktadır.



Şekil 3.2 İlgili fazlar(cisimler) kullanılarak simülasyonu yapılmış ızgara desenlerinin 2B görüntüleri: (a) Yarım küre, (b) koni ve (c) karmaşık tepeli şekil için.

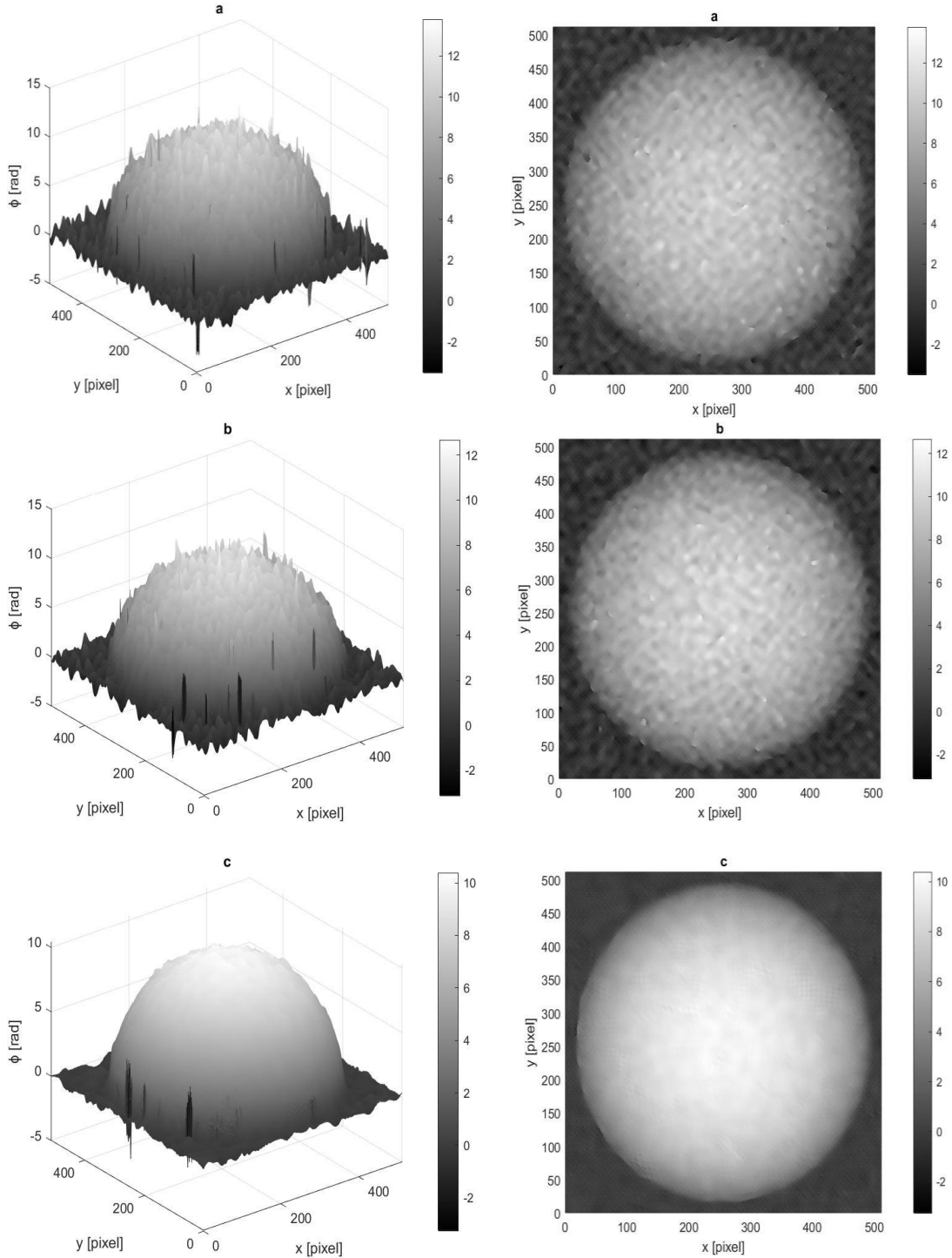
Ayrıca cisim konulmadan L-FPP sisteminden elde edilecek simülasyonu yapılmış referans görüntü Denklem (3.5) ile bulunur ve Şekil 3.3’de sunulmaktadır.

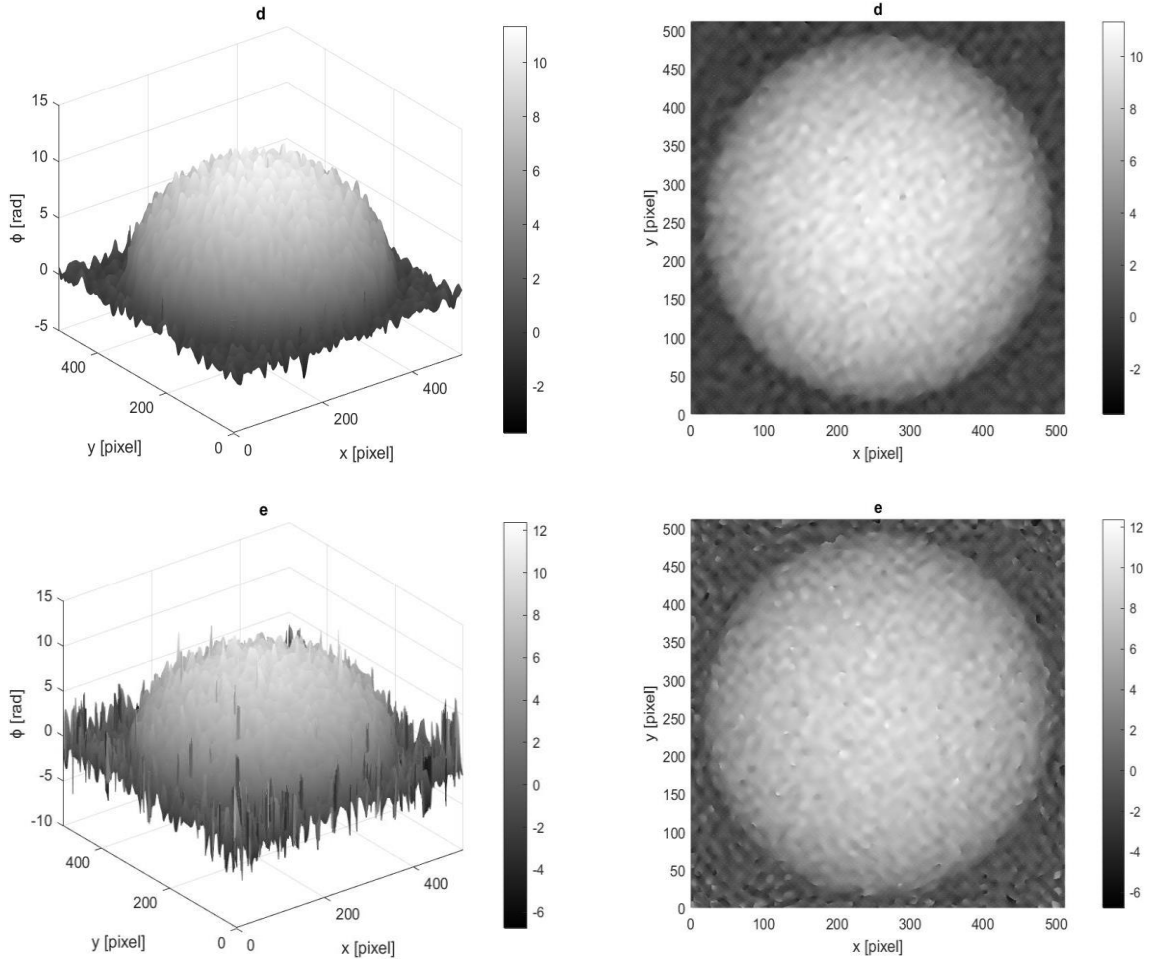
$$i_{ref}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_o x) + noise \quad (3.5)$$



Şekil 3.3 Referans $i_{ref}(x, y)$ kullanılarak simülasyonu yapılmış ızgara deseninin görüntüsü

Yarı küresel bir nesne için L-FPP sisteminin benzetiminden elde edilen $i(x, y)$ and $i_{ref}(x, y)$ ızgara desenleri kullanılarak sürekli hale getirilen (unwrap) fazlar (ϕ_0, ϕ_{ref}) hesaplanır. Gürültülü faz haritası ($\phi_{son}(x, y)$), Denklem 2.19 ile elde edilir. Yarım küre cisim için benzetimi yapılmış cismin ızgara deseni ve referans desen kullanılarak, FFT ile elde edilen 3B yarım küre faz haritası Şekil 3.4(a)'da sunulmaktadır. SG- FFT sonucu Şekil 3.4(b)'de verilmektedir. Diğer yöntemlerle W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT kullanılarak elde edilen sonuçlarda sırası ile c, d ve e şıklarında resmedilmektedir.

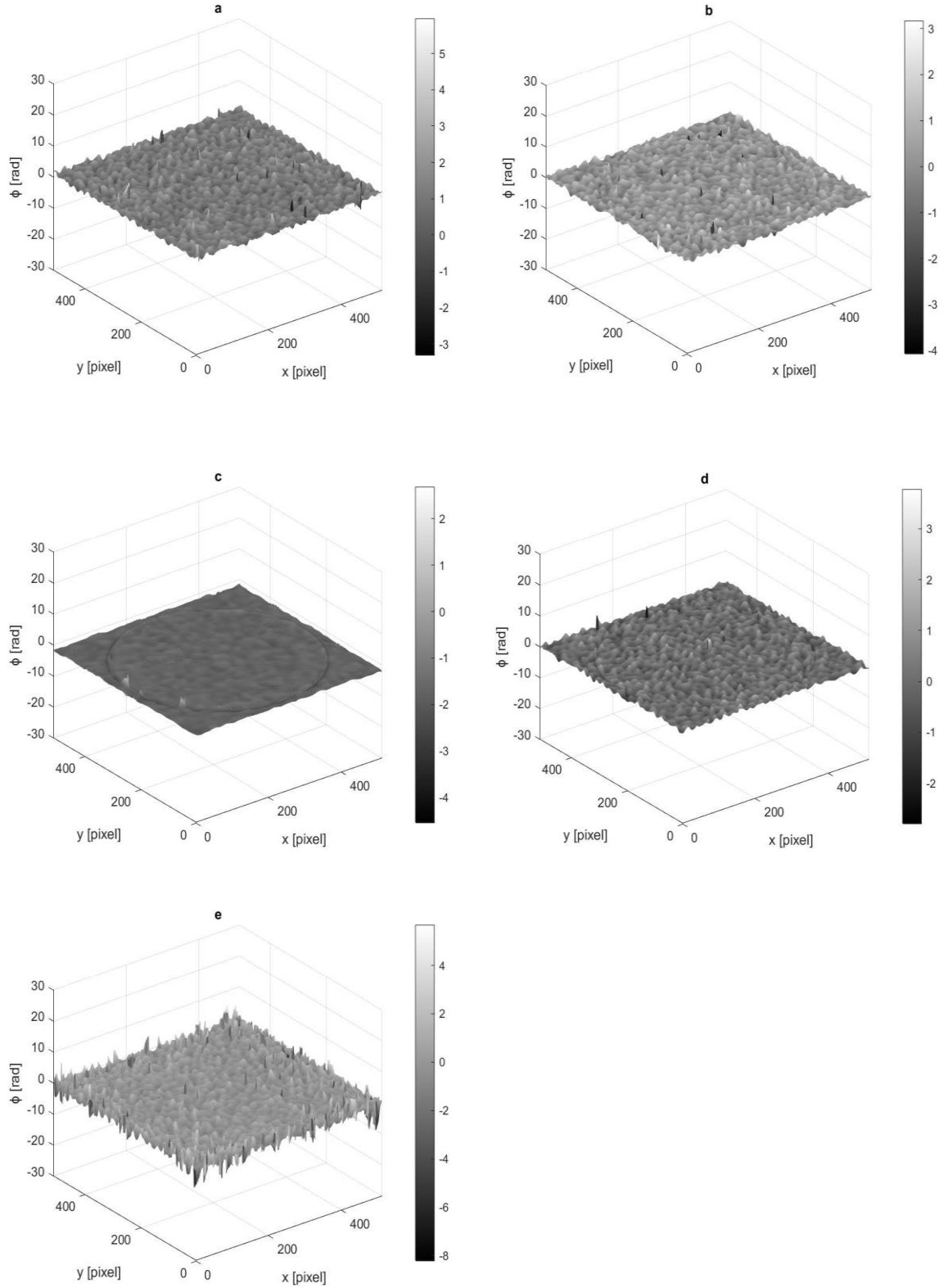




Şekil 3.4 Yarım küre cismi için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT ve (e) GPM- FFT yöntemleri kullanılarak elde edilen gürültülü faz haritaları $\phi_{son}(x, y)$

Bu yöntemlerin hangisi en doğru sonucu verdiğini bulmak için karşılaştırma hata (error=e) değeri bulunarak yapılmaktadır. Burada hata değeri denklem (3.6) ile bulunur. Şekil 3.4 (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT, (e) GPM- FFT verilen $\phi_{son}(x, y)$ değerleri kullanılarak elde edilen hata değerleri aynı sırayla Şekil 3.5’de sunulur.

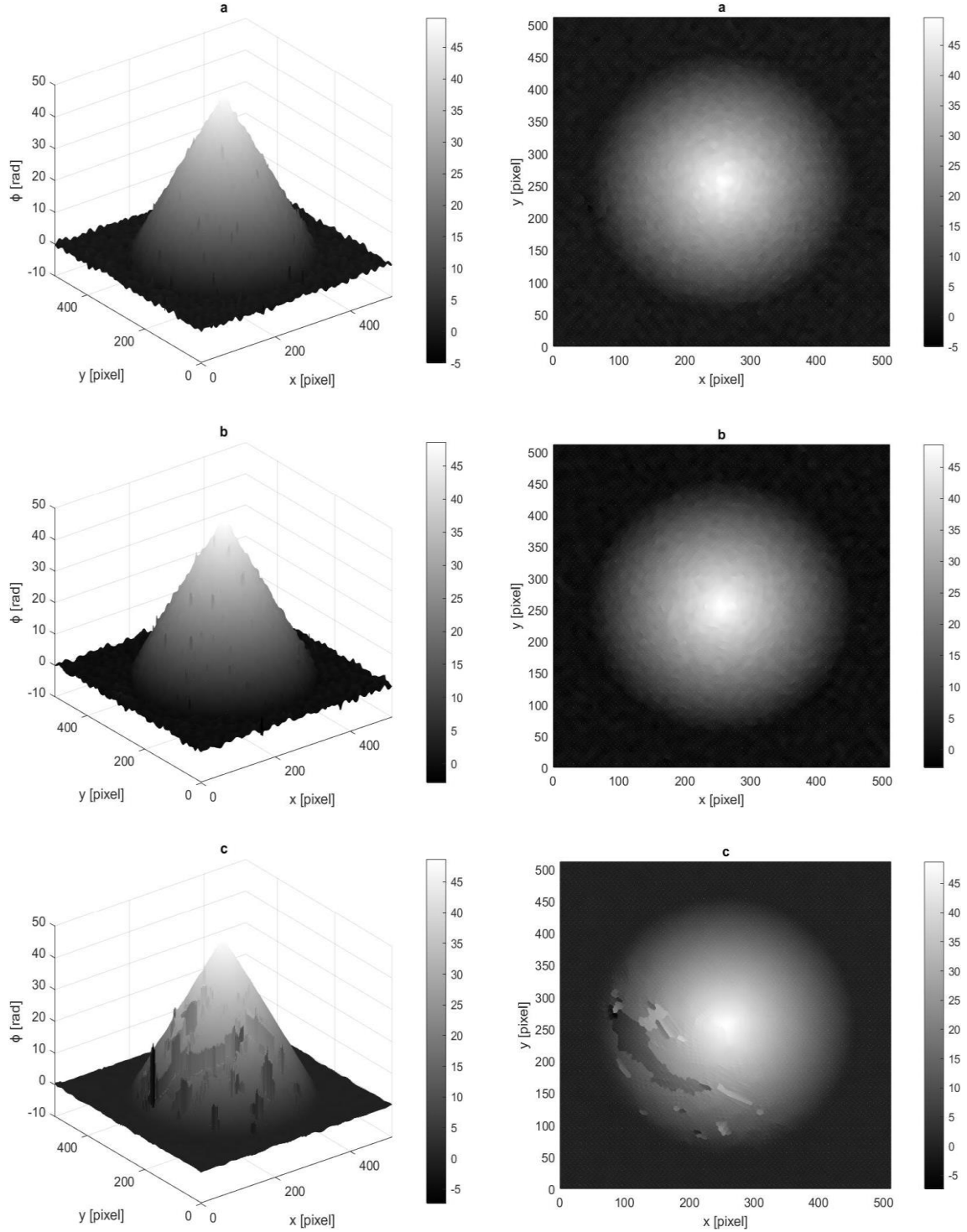
$$e = \phi_{son}(x, y) - \phi(x, y) \quad (3.6)$$

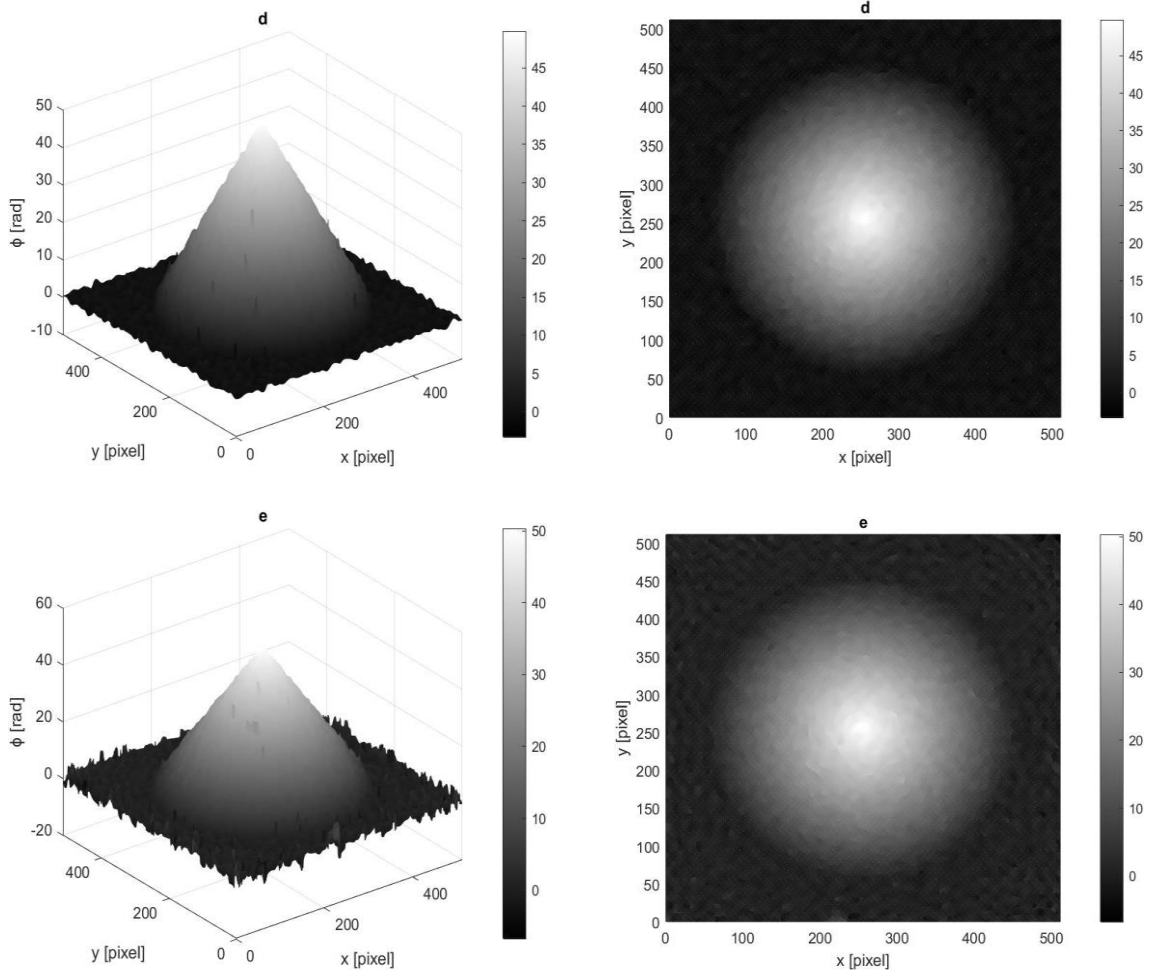


Şekil 3.5 Yarım küre cismi için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden elde edilen ve Şekil 3.4 (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT, (e) GPM-FFT da sunulan faz haritaları $\phi_{son}(x, y)$ ile gerçek faz haritası $\phi(x, y)$ ler kullanılarak Denklem 3.6 ile elde edilen hata haritaları.

Koni cisim için benzetimi yapılmış cismin ızgara deseni ve referans desen kullanılarak, FFT ile elde edilen 3B koni faz haritası Şekil 3.6(a)'da sunulmaktadır. SG-FFT sonucu

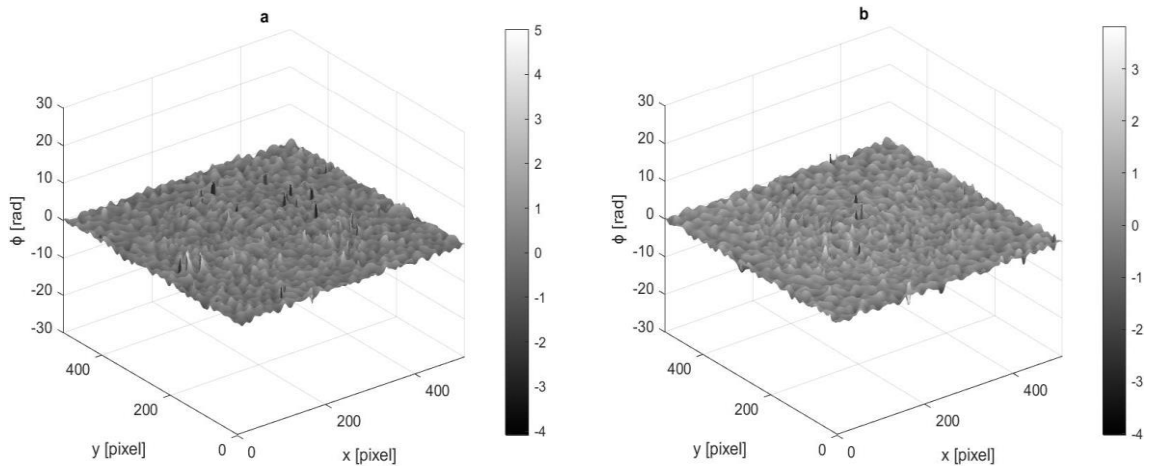
Şekil 3.6(b)'de verilmektedir. Diğer yöntemler; W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT; kullanılarak elde edilen sonuçlarda sırası ile c, d ve e şıklarında resmedilmektedir.

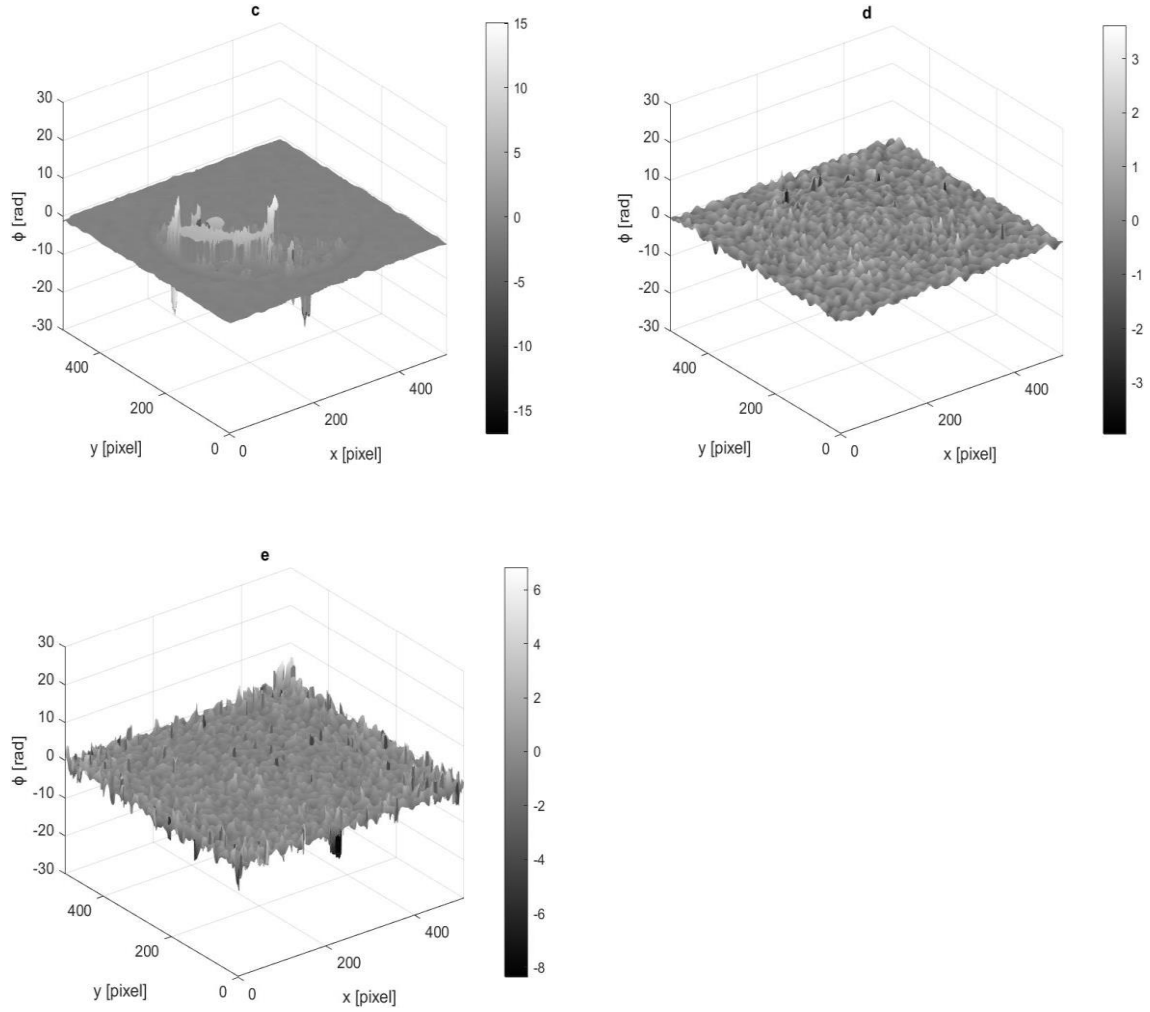




Şekil 3.6 Koni cismi için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden (a) FFT, (b) Smoothing FFT(SG-FFT), (c) W-FFT, (d) EMD-FFT ve (e) GPM- FFT yöntemleri kullanılarak elde edilen gürültülü faz haritaları $\phi_{son}(x, y)$

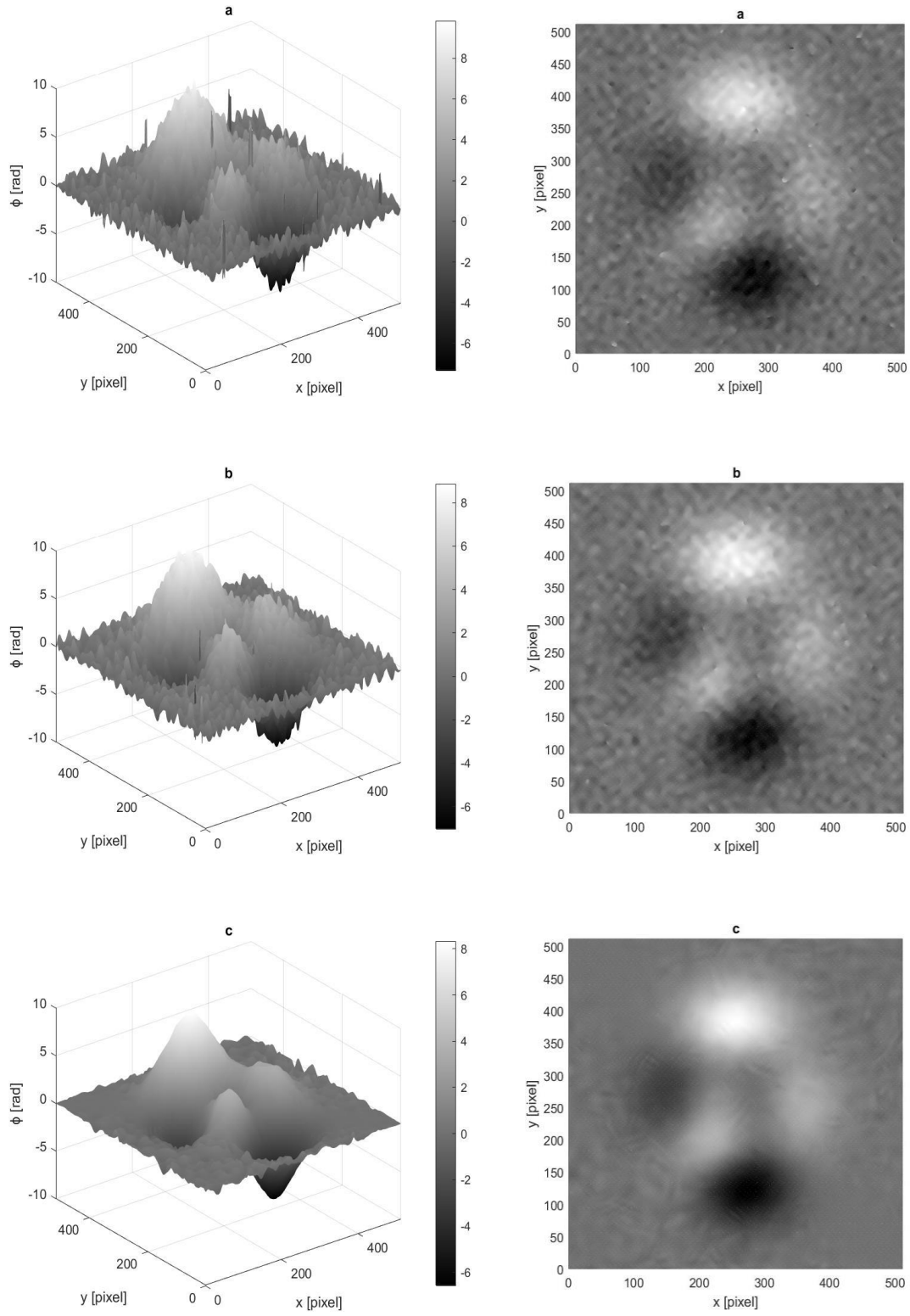
Hata (error=e) değerleri ise, Şekil 3.6 (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT, (e) GPM- FFT da sunulan $\phi_{son}(x, y)$ değerleri kullanılarak aynı sıra ile Şekil 3.7’de verilmektedir.

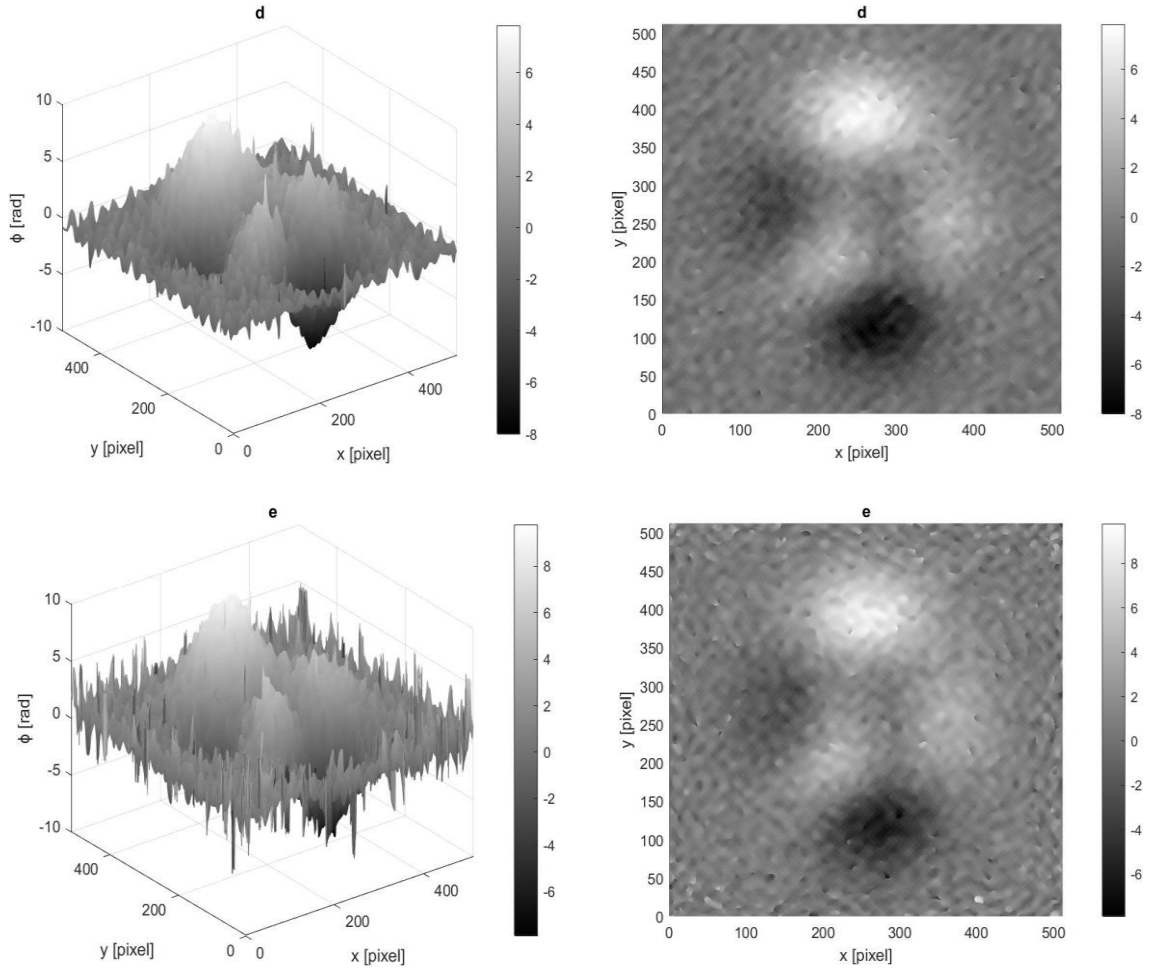




Şekil 3.7 Koni cismi için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden elde edilen ve Şekil 3.6 (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT, (e) GPM-FFT da sunulan faz haritaları $\phi_{son}(x, y)$ ile gerçek faz haritaları $\phi(x, y)$ 'ler arasındaki Denklem 3.6 ile elde edilen hata haritaları.

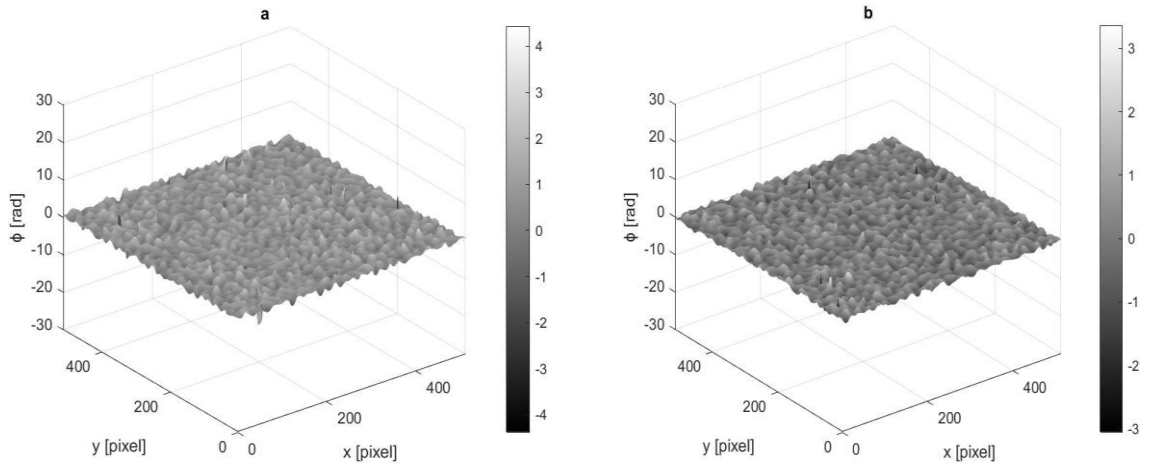
Karmaşık tepeli cisim için benzetimi yapılmış L-FPP sisteminden elde edilen cisim ve referans ızgara desenleri kullanılarak, FFT ile elde edilen 3B karmaşık tepeli cismin faz haritası Şekil 3.8(a)'da sunulmaktadır. SG-FFT sonucu Şekil 3.8(b)'de verilmektedir. Diğer yöntemler; W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT; kullanılarak elde edilen sonuçlarda sırası ile c, d ve e şıklarında resmedilmektedir.

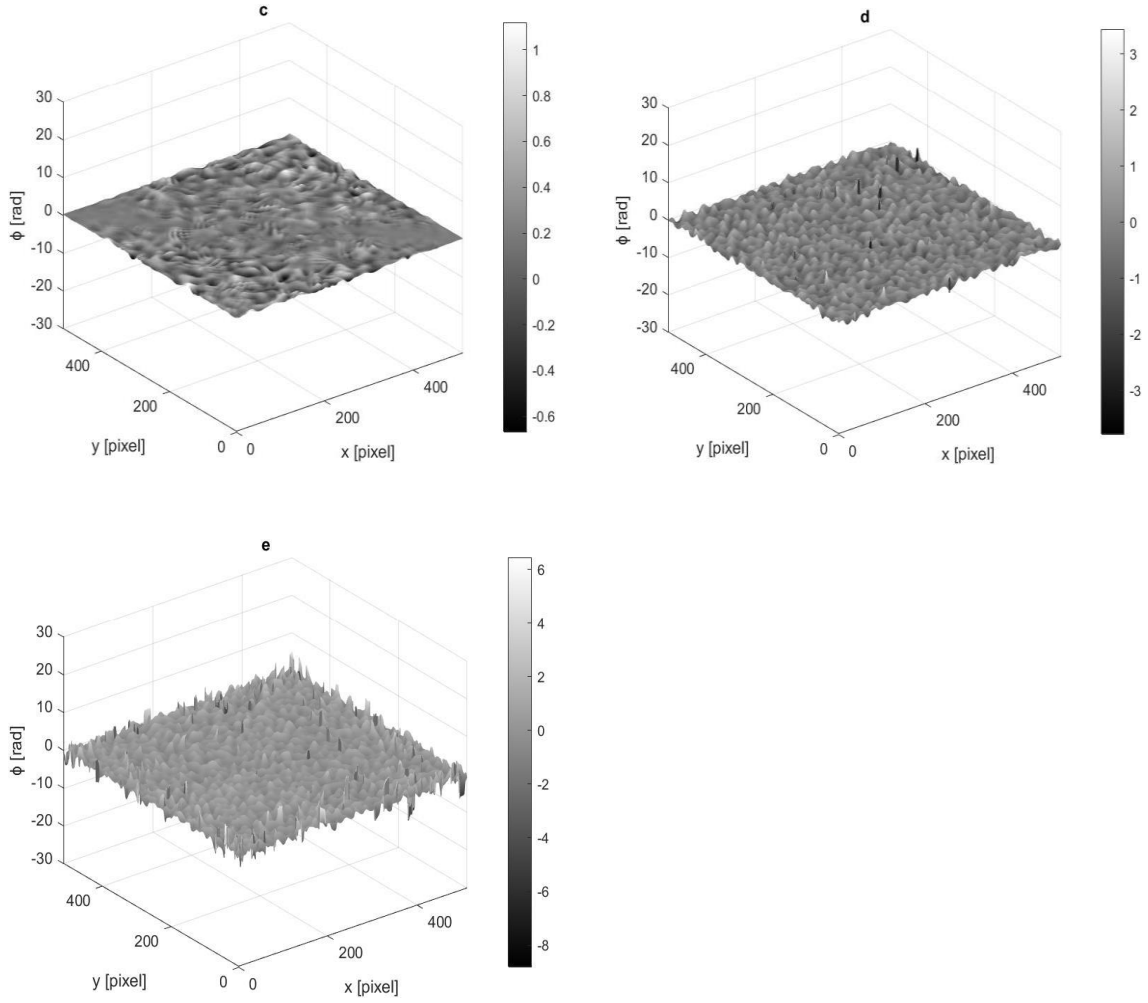




Şekil 3.8 Karmaşık tepeli cisim için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden (a) FFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) EMD-FFT ve (e) GPM- FFT yöntemleri kullanılarak elde edilen gürültülü faz haritaları $\phi_{son}(x, y)$

Hata (error=e) değerleri ise, Şekil 3.8 (a) FFT, (b) Smoothing FFT(SG-FFT), (c) W-FFT, (d) EMD-FFT, (e) GPM- FFT ile elde edilen $\phi_{son}(x, y)$ değerleri kullanılarak aynı sıra ile Şekil 3.9’da verilmektedir.





Şekil 3.9 Karmaşık tepeli cisim için simülasyonu yapılmış ızgara deseni görüntülerinden elde edilen ve Şekil 3.8(a) FFT, (b) Smoothing FFT(SG-FFT), (c) W-FFT, (d) EMD-FFT ve (e) GPM- FFT de sunulan faz haritaları $\phi_{son}(x, y)$ ile gerçek faz haritası $\phi(x, y)$ ‘ler arasındaki Denklem 3.6 ile elde edilen hata haritaları.

3.2. Deneyisel Çalışma Sonuçları ve Kalibrasyon

3.2.1 L-FPP sisteminin kalibrasyonu

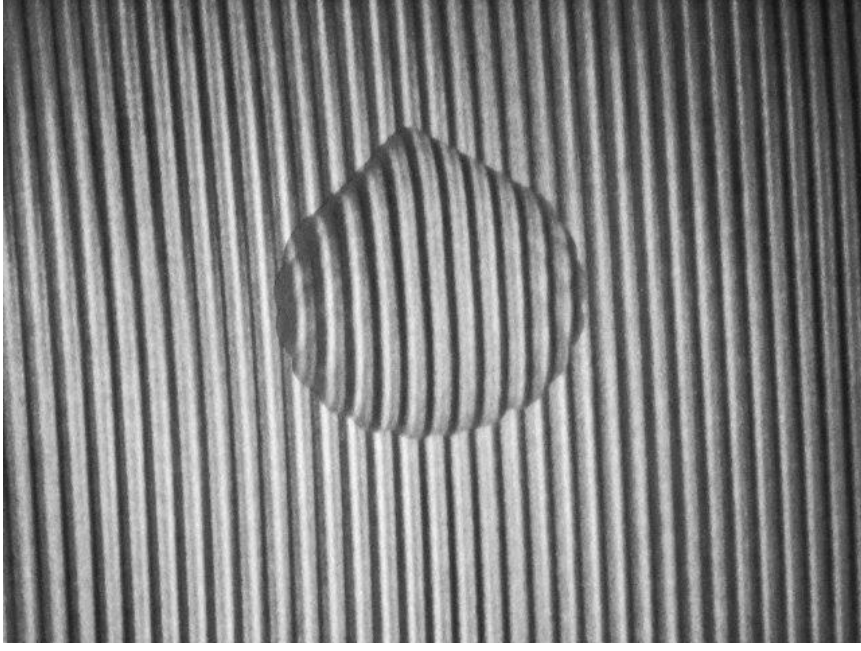
Laboratuvar ortamında Şekil 2.3’te gösterilen L-FPP düzeneğinde michelson interferometresi ile oluşturulan ızgara deseni, referans düzlemine yerleştirilen alçı balık, denizatı ve deniz kabuğu objelerinin üzerlerine yansıtılmıştır. Şekil (3.10), (3.11), (3.12) ve (3.13)’de sunulan görüntüler ve referans görüntü dahil kamera ile sırasıyla kaydedilmiştir.



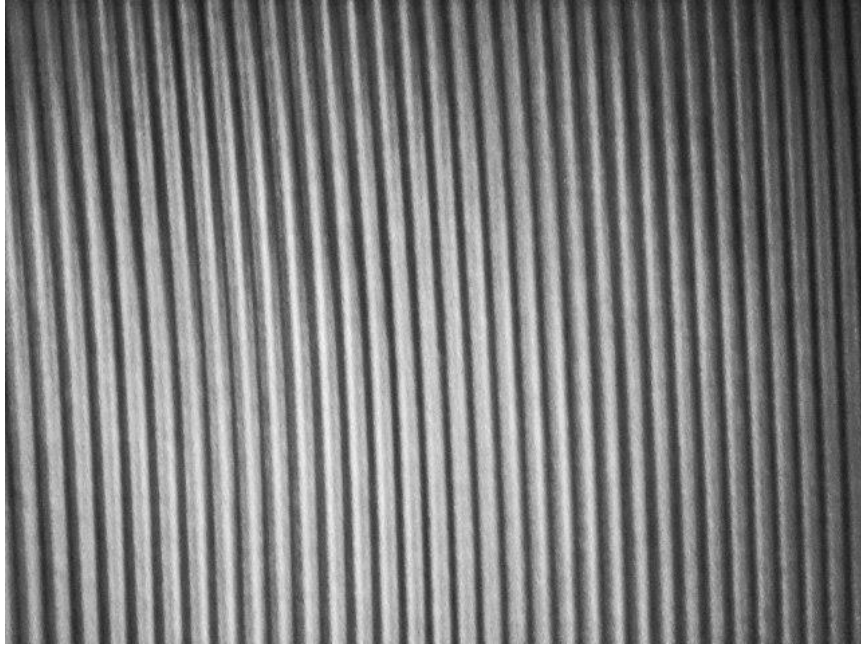
Şekil 3.10 Alçı balık cismi kullanılarak L-FPP den elde edilen ızgara deseni.



Şekil 3.11 Alçı denizatı cismi kullanılarak L-FPP'den elde edilen ızgara deseni.



Şekil 3. 12 Alçı Deniz kabuğu cismi kullanılarak L-FPP sisteminden elde edilen ızgara deseni



Şekil 3.13 Referans yani cisim konulmadan L-FPP düzeneğinden elde edilen ızgara deseni

İlk olarak Kısım 2.2.1’de anlatıldığı şekilde geleneksel Fourier dönüşüm yöntemi kullanılarak analiz edilen bu görüntülerden Şekil (3.16), (3.17) ve (3.18)’de gösterilen üç-boyutlu profiller elde edilmiştir. 3B profiller bulunurken yani (z) yükselti aşağıdaki denkleme göre hesaplanmış ve algoritma akış diyagramı da Şekil 3.15’te gösterilmiştir.

$$z(x, y) = M \frac{L \cdot p_0 \cdot \left(\frac{\phi_{son}(x, y)}{2\pi} \right)}{p_0 \cdot \left(\frac{\phi_{son}(x, y)}{2\pi} \right) - d} \quad (3.7)$$

Burada p_0 ızgara periyodudur ve aşağıda nasıl bulunacağı anlatılacaktır. M kalibrasyon katsayısı 3.2.2 kısmında açıklanacaktır. d : projektör ile kamera arasındaki uzaklık, L : kamera projektör düzlemi ile referans düzlemi arasındaki uzaklıktır. $\phi_{son}(x, y)$ Denklem (2.19)'dan elde edilir.

Cismin yükselti değişimi (z) hesaplanır iken ızgara periyodu (p_0) değişkeni aşağıdaki gibi bulunur;

$$gu = \frac{(ku)(fu)}{du} \quad (3.8)$$

$$p_0 = 2 \left(\frac{gu}{s} \right) \quad (3.9)$$

Burada

du : Izgara deseni düşürülen görüntüdeki cismin eni (piksel)

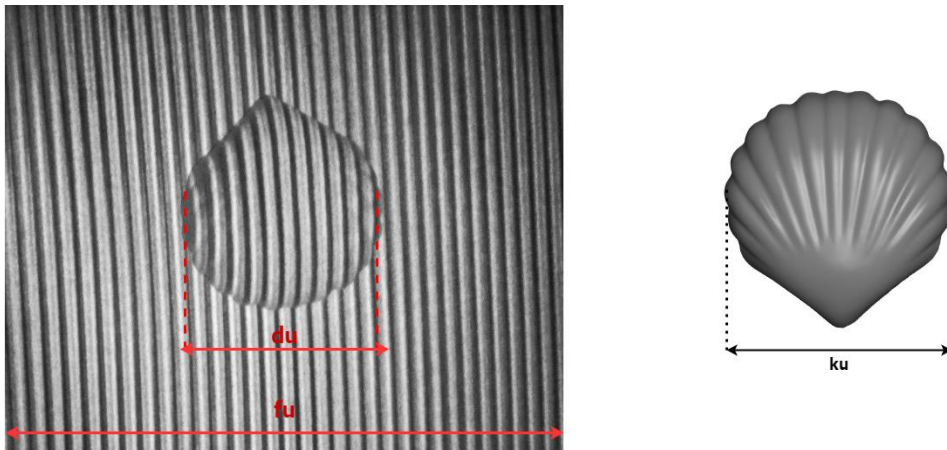
fu : Cismin ızgara deseni görüntüsünün eni (piksel)

gu : Cismin ızgara deseni görüntüsünün eninin gerçek değeri (milimetre)

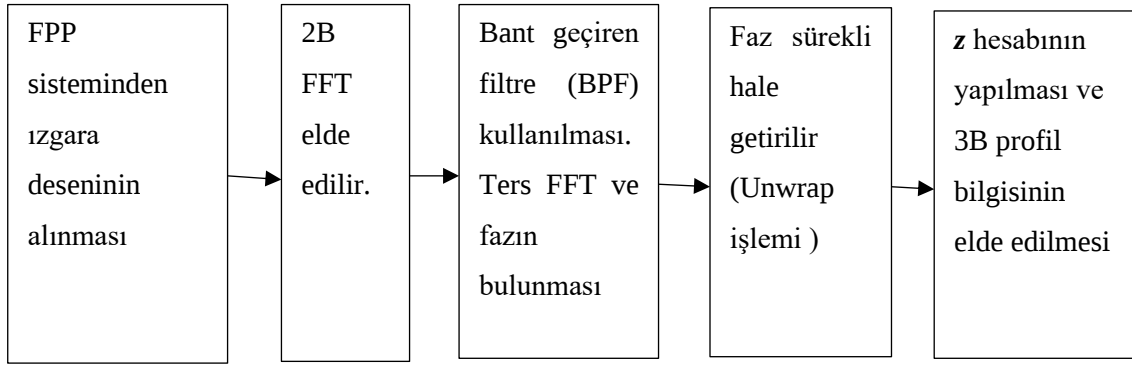
ku : Cismin gerçek eni (milimetre)

s : Cismin ızgara deseni görüntüsündeki toplam çizgi sayısı (siyah,beyaz)

Denklemlerde verilen parametrelerin görsel anlatımı Şekil 3.14'te verilmiştir ve alçı deniz kabuğu ızgara deseni kullanılmıştır.



Şekil 3.14 Saçak periyodu hesabında kullanılan parametre bilgilerinin görsel gösterimi



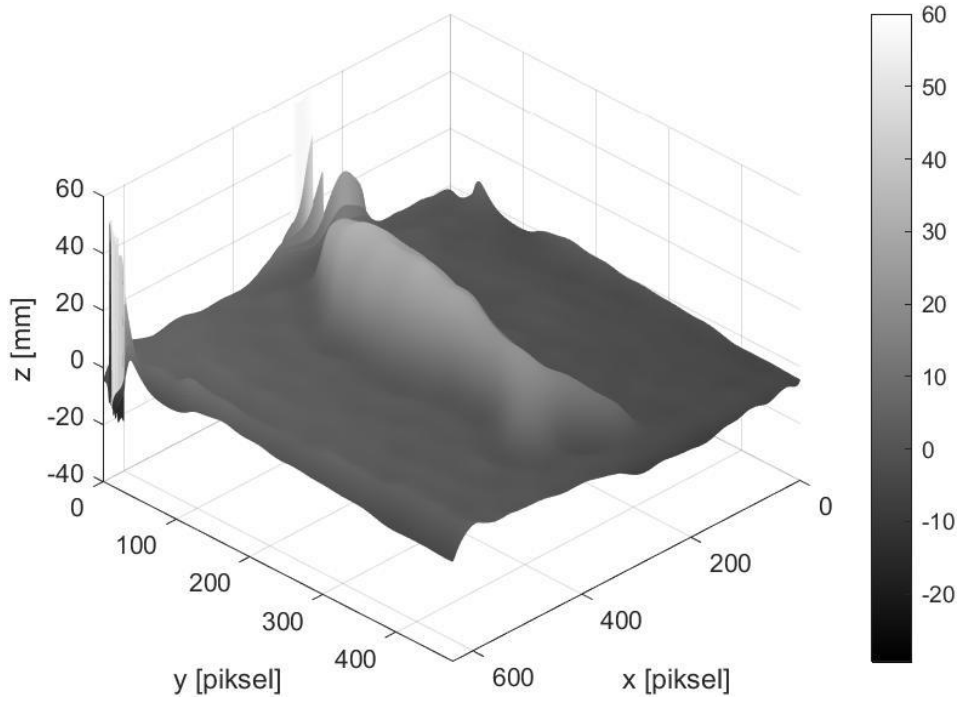
Şekil 3.15 Cisimlerin Geleneksel FFT ile fazının bulunması ve 3B profilinin (z-yükselti bilgisi) bulunmasını gösteren akış diyagramı.

Yükselti bilgisinin doğru olması için sistemin kalibrasyonu yukarıda hesap edilen ızgara periyodu (p_0) kullanılarak yapılacaktır. Burada Şekil (3.10), (3.11), (3.12) ve (3.13)’da ki görüntüler gerçek laboratuvar şartlarında L-FPP optik düzeneğinden 640x480 piksel çözünürlükte alınmıştır. Sistemin kalibrasyon katsayısı M bulunduktan sonra z yükselti değeri hesaplanırken kullanılacak bazı parametreleri şu şekildedir: kamera ile referans düzlemi arası uzaklık, L , 500 mm, lazer projektör ile kamera arası mesafe, d , 105 mm olarak ayarlanmıştır. Izgara periyodunun (p_0) tespiti için alınan parametre değerleri sırasıyla şu şekildedir; du : 231 piksel, fu : 640 piksel, ku : 56,21 mm, gu : 155,73 mm ve s : 66’dır. Buradan p_0 ‘ın değeri 4,71 mm olarak bulunur. Burada 1 piksele karşılık düşen milimetre değeri ($\frac{gu}{fu}$) ise 0,243 (mm/piksel) olarak hesaplanmıştır.

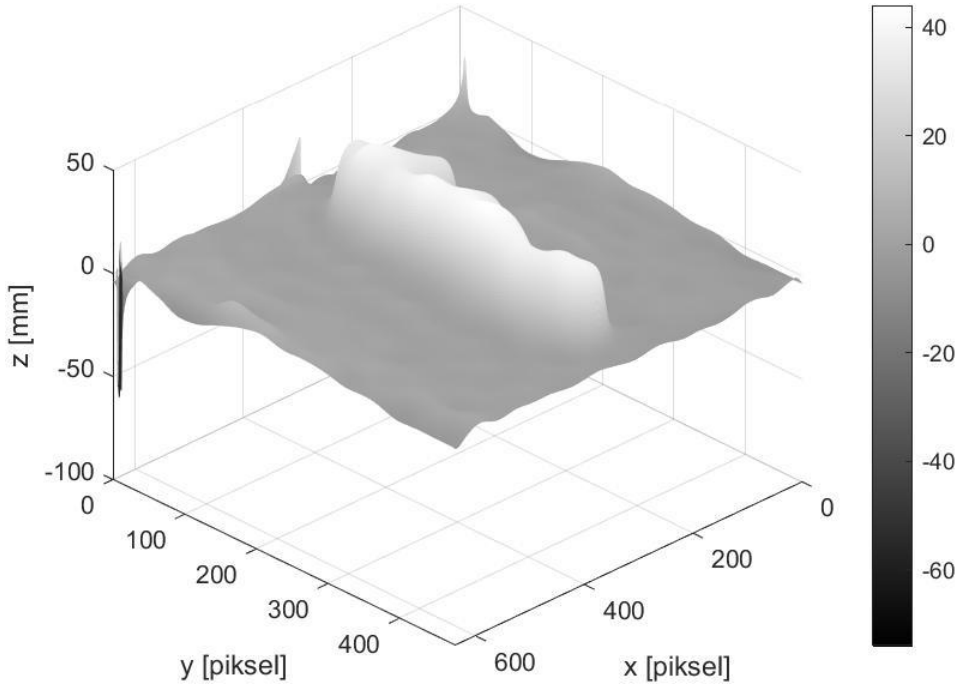
3.2.2 Kalibrasyon Katsayısı (M) Hesaplanması ve Sonuçlar

3.2.2.1 Geleneksel FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminin Hata

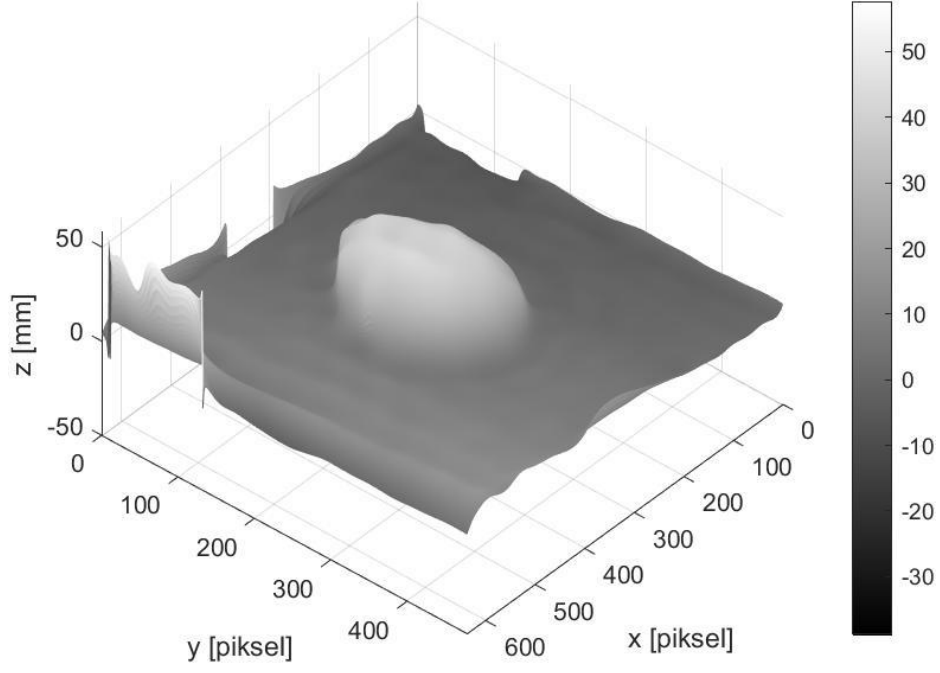
Geleneksel FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları (44,45) ve yukarıda verilen L-FPP sistem parametreleri kullanılarak alçı balık, denizati ve deniz kabuğu için Şekil (3.16), (3.17) ve (3.18)’de gösterilen üç-boyutlu yüzey profilleri mm olarak (yükselti z değerleri) elde edilmiştir. Bu yükselti değerleri z yukarıda verilen Denklem (2.20) kullanılarak bulunmuştur. Fakat doğru z değerleri M kalibrasyon katsayısını da hesaba katan Denklem (3.7) ile bulunmalıdır (43). Bu nedenle M kalibrasyon katsayısı hesap edilmelidir. Bu katsayı bulunurken alçı balık cismi kullanılmıştır.



Şekil 3.16 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sistemi kullanılarak bulunan yüzey profili.

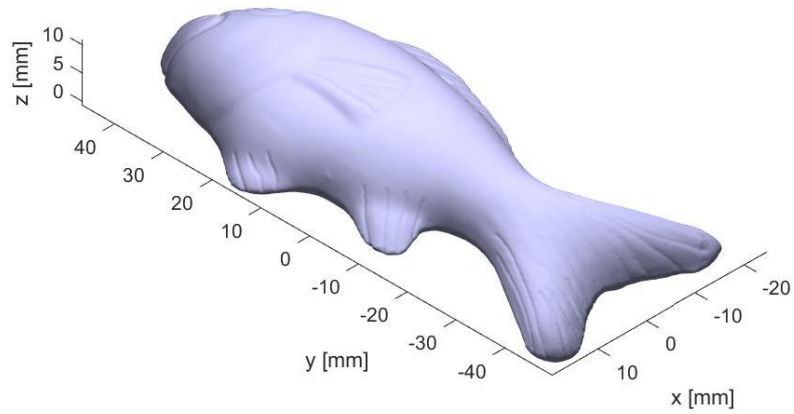


Şekil 3.17 Alçı Denizatı cisminin 3B L-FPP görüntüleme sistemi kullanılarak bulunan yüzey profili.

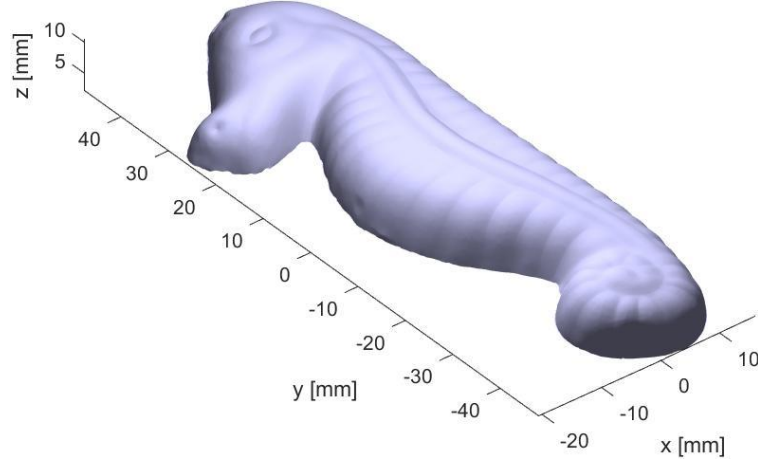


Şekil 3.18 Alçı Deniz Kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sistemi kullanılarak bulunan yüzey profili.

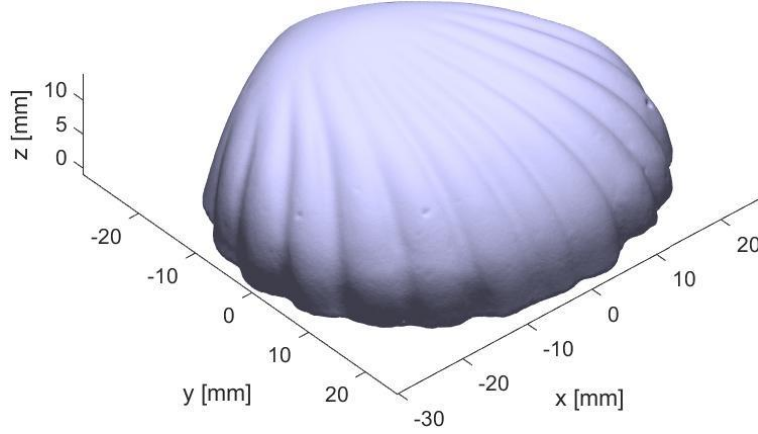
M kalibrasyon katsayısını bulmak için ticari olarak doğrulanmış bir 3B görüntüleme sistemi ile kalibrasyon cismi olarak seçilen alçı cisimlerin yüzey profili elde edilmiştir. Bu tezde Shining 3D firmasının OptimScan-5M modeli üç boyutlu tarama cihazıyla alçı cisimlerin görüntüleri elde edilmiştir. Bu 3B görüntüler Şekil (3.19), (3.20) ve (3.21)'de sunulmaktadır.



Şekil 3.19 Shining 3D firmasının Model OptimScan-5M tarama cihazı kullanılarak Alçı Balık cismi için elde edilen 3B görüntü

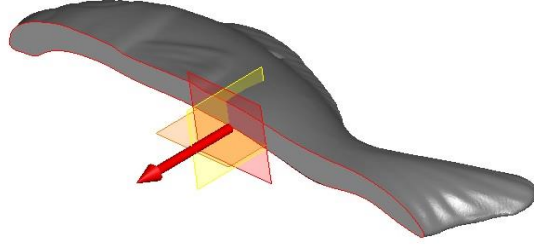


Şekil 3.20 Shining 3D firmasının Model OptimScan-5M tarama cihazı kullanılarak Alçı Denizatı cismi için elde edilen 3B görüntü

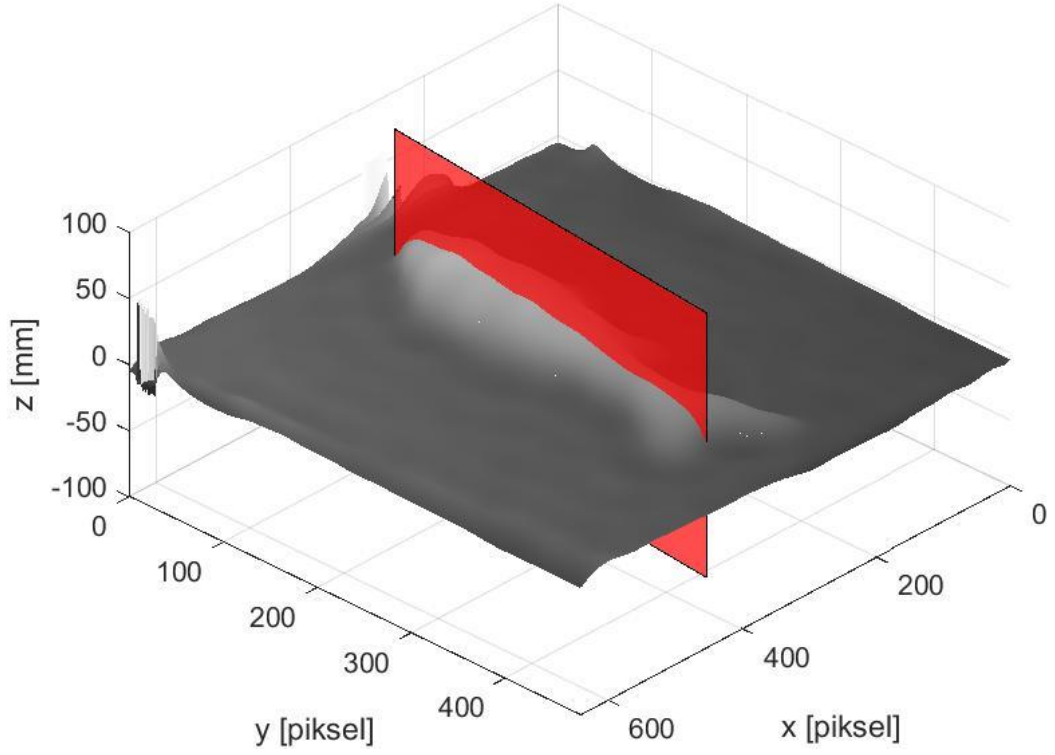


Şekil 3.21 Shining 3D firmasının Model OptimScan-5M tarama cihazı kullanılarak Alçı Deniz kabuğu cismi için elde edilen 3B görüntü

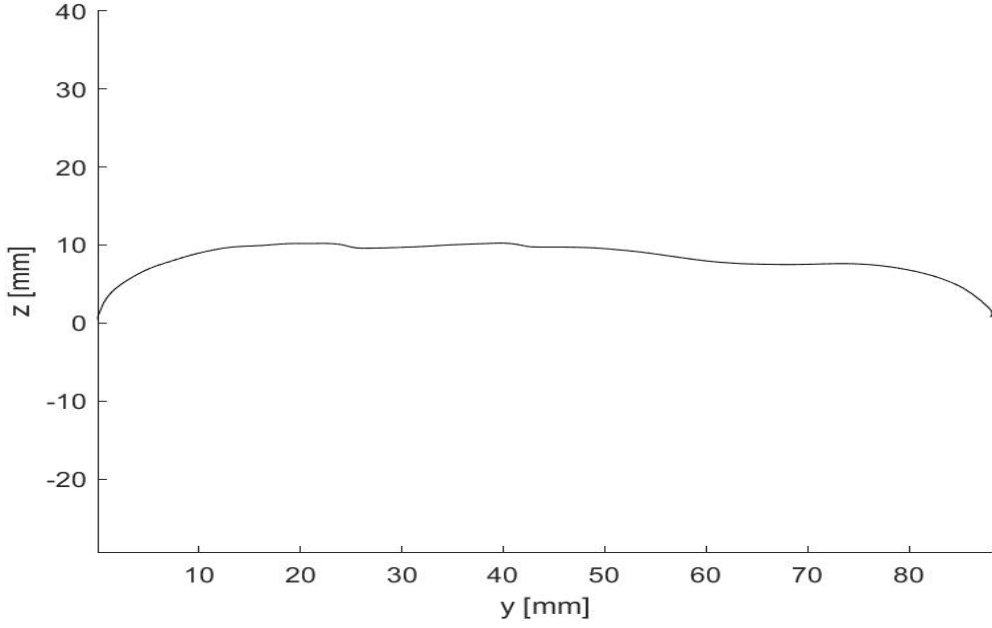
Bu cisimlerden alçı balık cismi referans olarak kullanılmıştır. Bu cismin dikey kesiti kullanılarak kalibrasyon katsayısı tespit edilmiştir. Shining 3D firmasının Model OptimScan-5M tarama cihazı (ticari cihaz) kullanılarak Alçı balık cismi için elde edilen 3B görüntüden boyuna olacak biçimde bir kesit (ticari kesit olarak adlandırıldı) alındı (Bakınız Şekil (3.22) ve (3.24)). Kalibrasyon katsayısını bulabilmek için bu tezde kullanılan L-FPP görüntüleme sisteminden alçı balık için alınan 3B görüntünün (Bakınız Şekil (3.16) ve (3.23)) boyuna kesiti de (test kesit) Şekil (3.25)'deki gibi alınmıştır. OptimScan-5M tarama cihazından alınan görüntünün kesitinin ortalama değeri K_M ve L-FPP görüntüleme sisteminden alınanın ortalama değeri D_M olarak adlandırılmıştır.



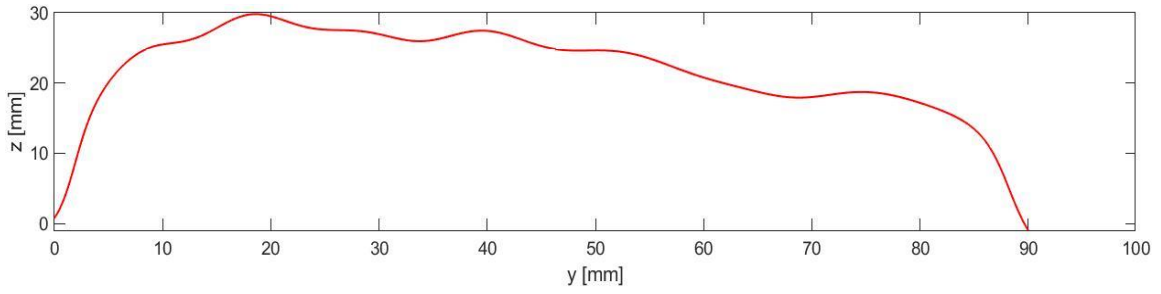
Şekil 3.22 Alçı Balık cisminin ticari cihaz ile 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (ticari kesit).



Şekil 3.23 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).

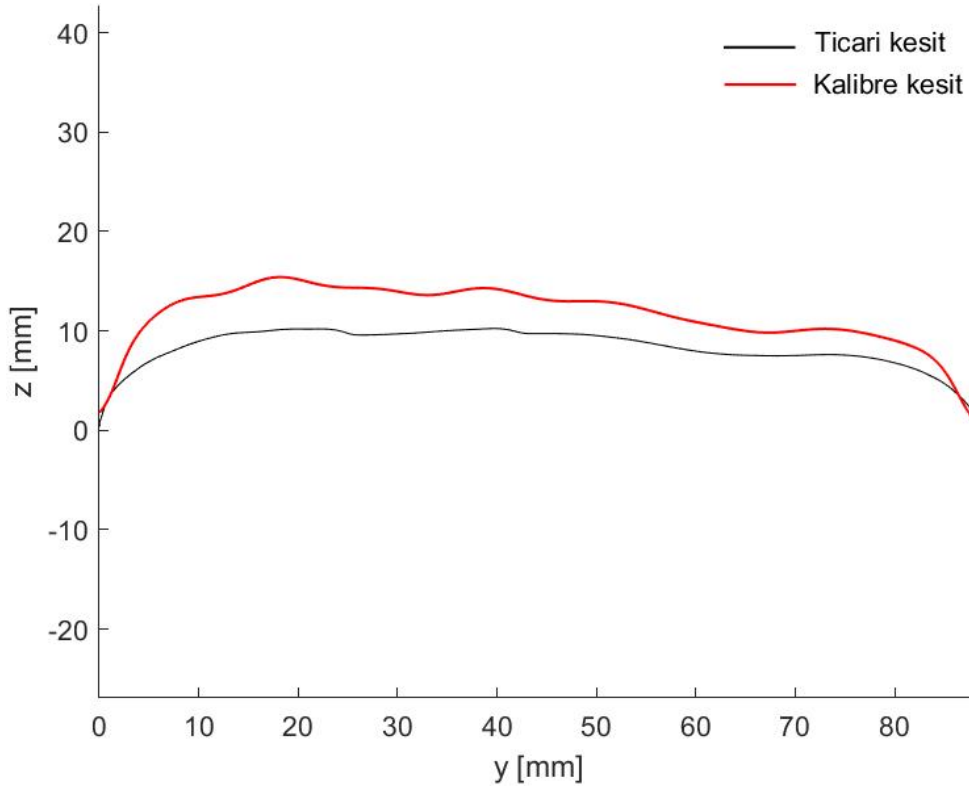


Şekil 3.24 Alçı Balık cisminin boyuna ticari kesiti (Başlangıç noktası (0,0), balığın baş kısmıdır.)



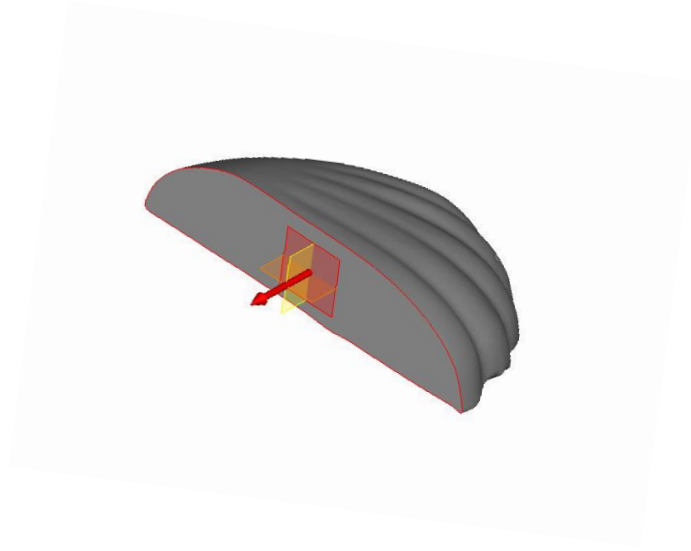
Şekil 3.25 Alçı Balık cisminin boyuna test kesiti. (Başlangıç noktası (0,0), balığın baş kısmıdır.)

Şekil 3.24'deki ticari kesit ve Şekil 3.25'deki test kesit kullanılarak; sırası ile ticari kesitin ortalama değeri $K_M : 7,922$ ve test kesitin ortalama değeri de $D_M : 16,856$ olarak hesaplanmıştır. Burada kalibrasyon katsayısı $M_G = \frac{K_M}{D_M} = 0,469$ ile bulunur. Böylece L-FPP görüntüleme sisteminde geleneksel FFT ile ızgara analizi yapılarak elde edilen faz haritasını kullanarak elde edilen kalibrasyon katsayısı M, tespit edilmiştir. Bu katsayı kullanılarak balık test kesiti kalibre kesite dönüştürülmüştür. Daha sonra bulunan kalibre kesit ile ticari kesit Şekil 3.26'da üst üste çizdirilerek karşılaştırma yapılmıştır. Fakat görüldüğü gibi kesitler tam üst üste oturmamıştır. Bu demektir ki Geleneksel FFT yöntemi için sistem de 4 veya 5 mm'lik rastgele bir hata vardır ve bunu L-FPP sisteminde kullanılan FFT işaret analiz tekniği elimine edememektedir. Söz konusu hatanın kullanılan lazerin rastgele yarattığı benek gürültüsünden kaynaklandığı düşünülmektedir.

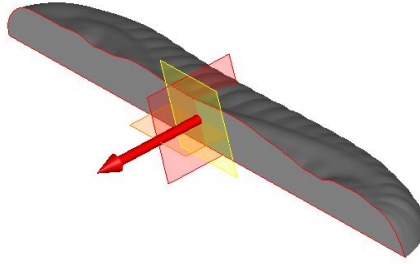


Şekil 3.26 Alçı Balık cisminin kalibre kesiti ve ticari kesitinin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi

Burada alçı balık için bulunan M kalibrasyon katsayısı kullanarak alçı Deniz Kabuğu ve Denizatı cisimlerinin boyuna kalibre kesitleri elde edilmektedir. Alçı Deniz Kabuğu ve Denizatı cisimlerinin ticari kesitleri sırası ile Şekil 3.27(a) ve (b)'de sunulmaktadır. Şekil 3.28(a)'da Alçı Deniz Kabuğu cisminin kalibre kesiti ve ticari kesiti üst üste sunulurken 3.28(b)'de Alçı Denizatı cismininkiler resmedilmektedir. Sonuçta L-FPP görüntüleme sisteminde geleneksel FFT ızgara analizi ile elde edilen yüzey profilinden (kalibre kesitler) sistemin doğruluğunun ne seviyede olduğu belirlenmektedir.

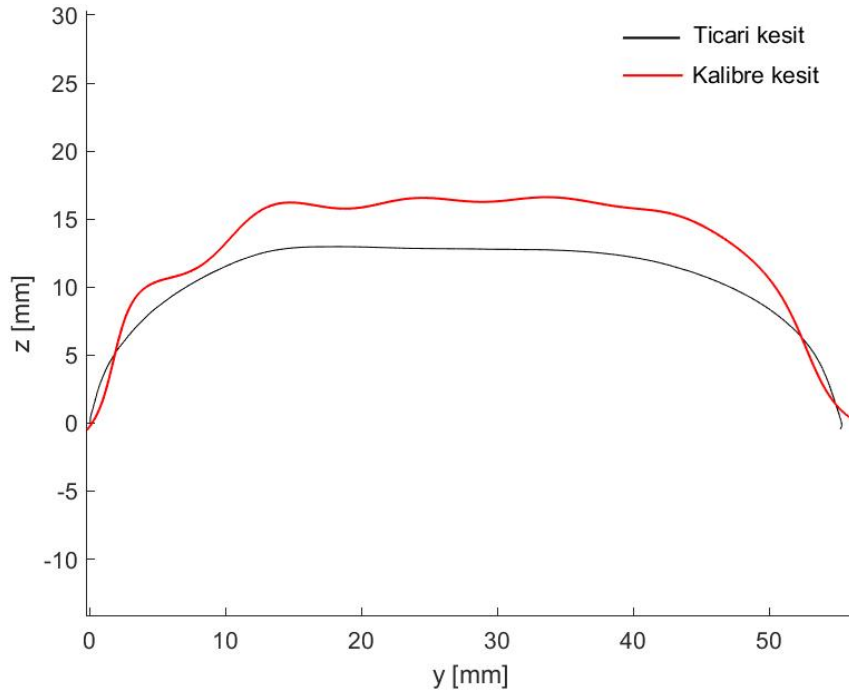


(a)

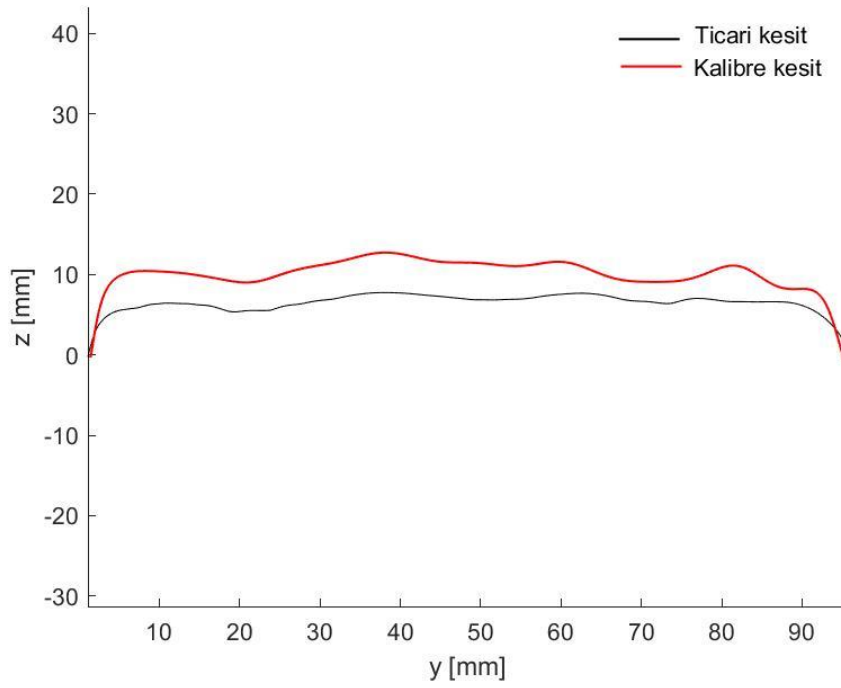


(b)

Şekil 3.27 (a) Alçı Deniz Kabuğu cisminin boyuna ticari kesit görünümü, **(b)** Alçı Denizatı cisminin boyuna ticari kesit görünümü



(a)



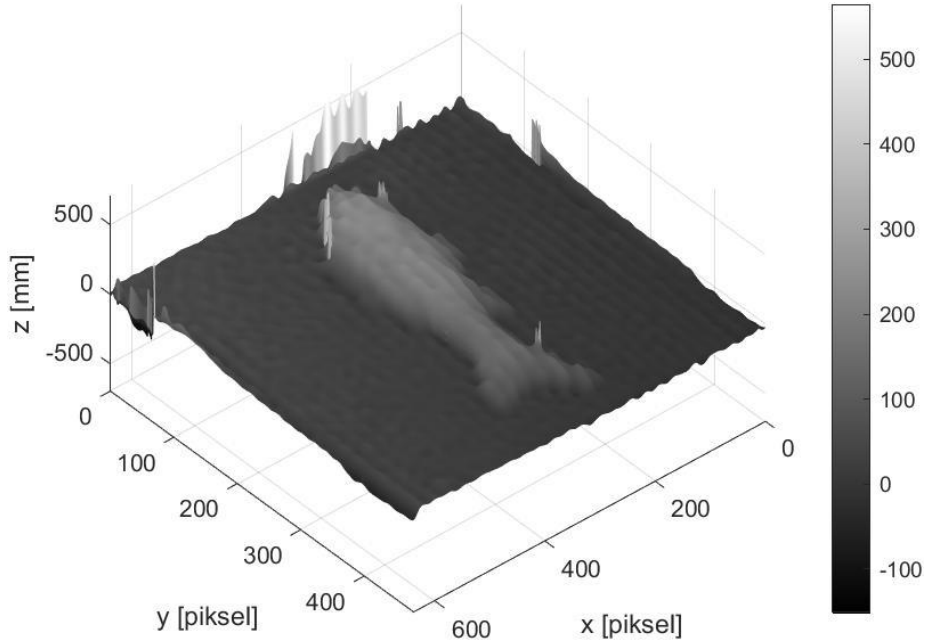
(b)

Şekil 3.28 (a) Alçı Deniz kabuğu cisminin kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), deniz kabuğunun üçgen uç kısmıdır.) **(b)** Alçı Denizatı cisminin kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), denizatının kuyruk kısmıdır.)

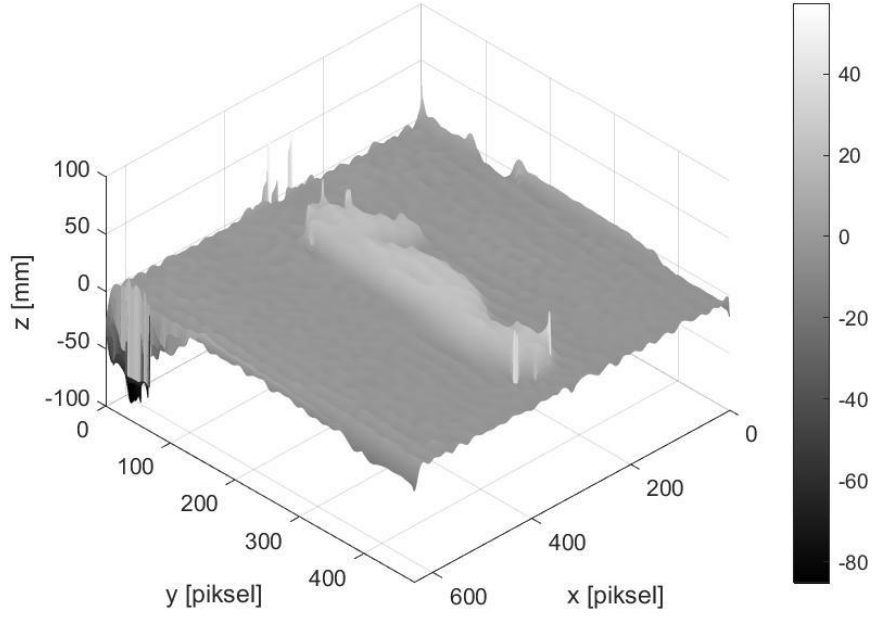
3.2.2.2 SG- FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata

SG- FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları ve L-FPP sistem parametreleri kullanılarak alçı balık, denizati ve deniz kabuğu için Şekil (3.29), (3.30) ve (3.31)'de gösterilen üç-boyutlu yüzey profilleri mm olarak (yüksekti z değerleri) elde edilmiştir. Bu yükselti değerleri z yukarıda verilen Denklem (2.20) kullanılarak bulunmuştur. Fakat doğru z değerleri M kalibrasyon katsayısını da hesaba katan Denklem (3.7) ile bulunmalıdır. Bu nedenle M kalibrasyon katsayısı bulunmalıdır. Bu katsayı bulunurken alçı balık cismi kullanılmıştır.

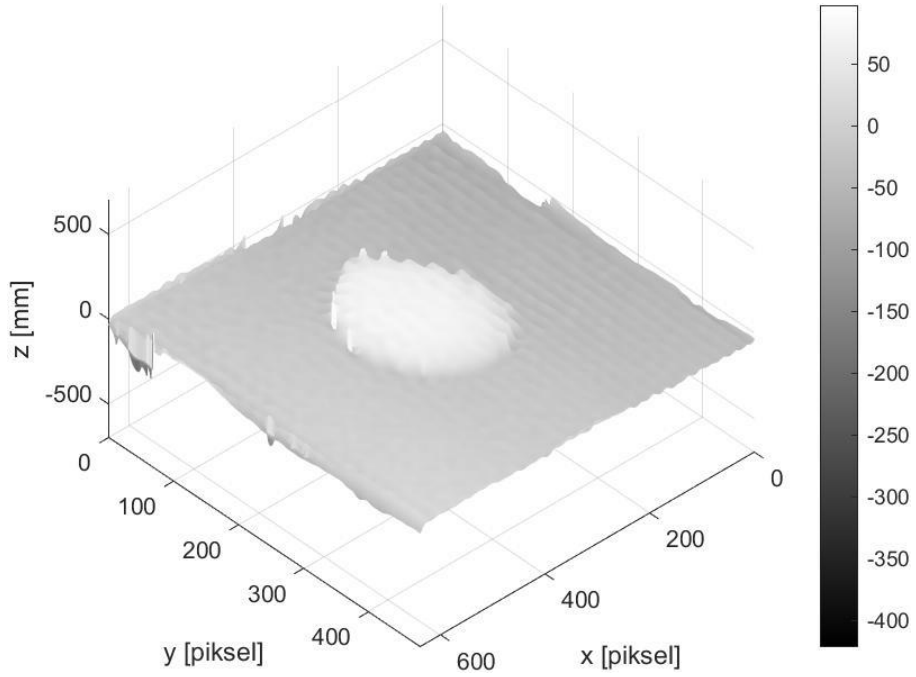
M kalibrasyon katsayısını bulmak için, yukarıda Shining 3D firmasının OptimScan-5M modeli üç boyutlu tarama cihazıyla alçı cisimlerin görüntüleri elde edilmiştir. Bu 3B görüntüler Şekil (3.19), (3.20) ve (3.21)'de sunulmaktadır.



Şekil 3.29 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde SG-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.



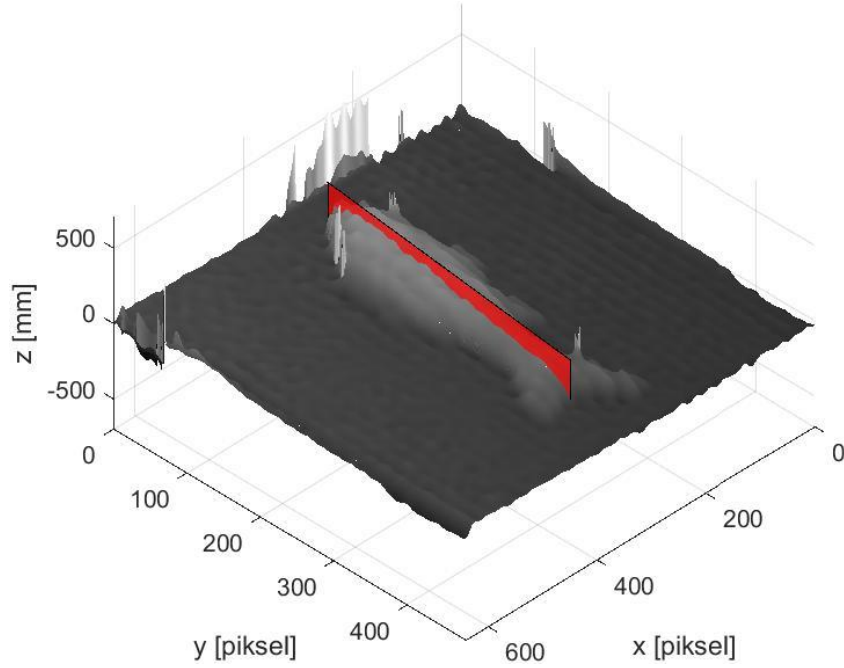
Şekil 3.30 Alçı Denizatı cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde SG-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.



Şekil 3.31 Alçı Deniz Kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde SG-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.

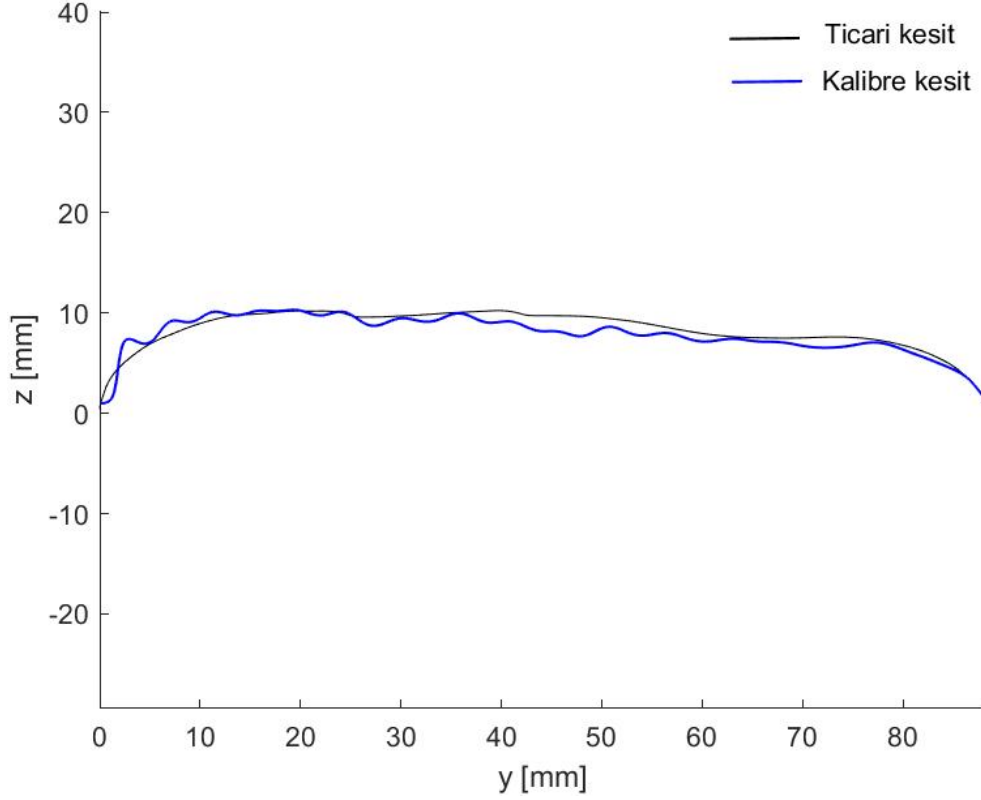
Bu cisimlerden alçı balık cismi referans olarak kullanılmıştır. Bu cismin dikey kesiti kullanılarak kalibrasyon katsayısı tespit edilmiştir. Shining 3D firmasının Model OptimScan-5M tarama cihazı (ticari cihaz) kullanılarak Alçı balık cismi için elde edilen

3B görüntüden boyuna olacak biçimde bir kesit (ticari kesit olarak adlandırıldı) alındı (Bakınız Şekil (3.22) ve (3.24)). Kalibrasyon katsayısını bulabilmek için bu tezde kullanılan L-FPP görüntüleme sisteminden alçı balık için alınan 3B görüntünün (Bakınız Şekil (3.29)) boyuna kesiti de (test kesit) Şekil (3.32)'deki gibi alınmıştır. OptimScan-5M tarama cihazından alınan görüntünün kesitinin ortalama değeri K_M ve L-FPP görüntüleme sisteminden alınanın ortalama değeri D_M olarak adlandırılmıştır.



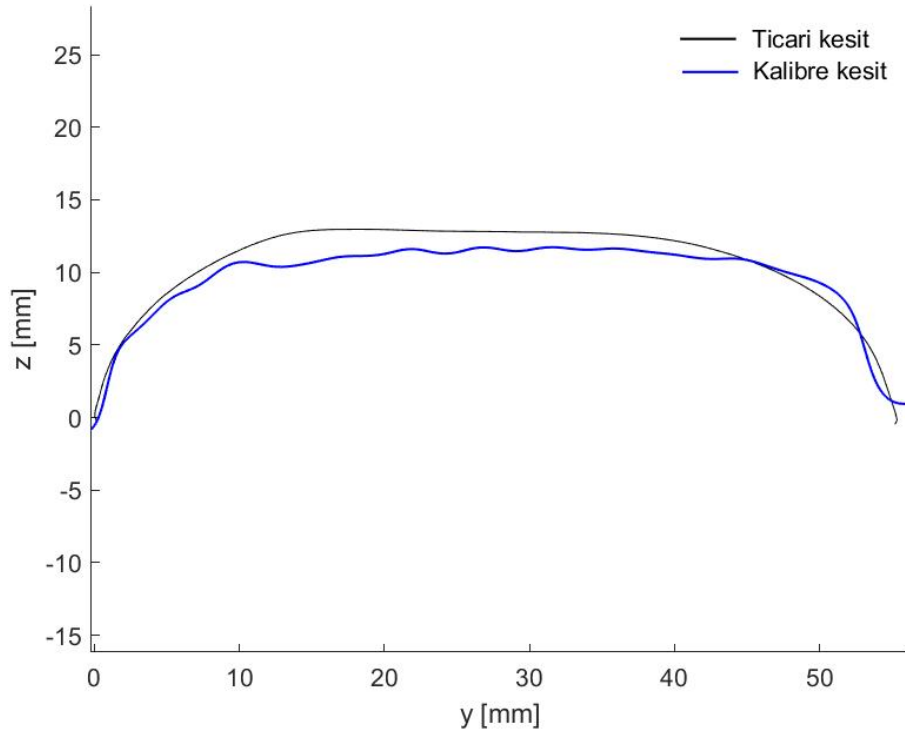
Şekil 3.32 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden SG-FFT ile elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).

Şekil 3.22'deki ticari kesit ve Şekil 3.32'deki test kesit kullanılarak; sırası ile ticari kesitin ortalama değeri $K_M = 7,922$ ve test kesitin ortalama değeri de $D_M = 179,955$ olarak hesaplanmıştır. Burada kalibrasyon katsayısı $M_{SG} = \frac{K_M}{D_M} = 0,044$ ile bulunur. Böylece L-FPP görüntüleme sisteminde SG-FFT ile ızgara analizi yapılarak elde edilen faz haritasını kullanarak elde edilen kalibrasyon katsayısı M , tespit edilmiştir. Bu katsayı kullanılarak balık test kesiti kalibre kesite dönüştürülmüştür. Daha sonra bulunan kalibre kesit ile ticari kesit Şekil 3.33'da üst üste çizdirilerek karşılaştırma yapılmıştır.

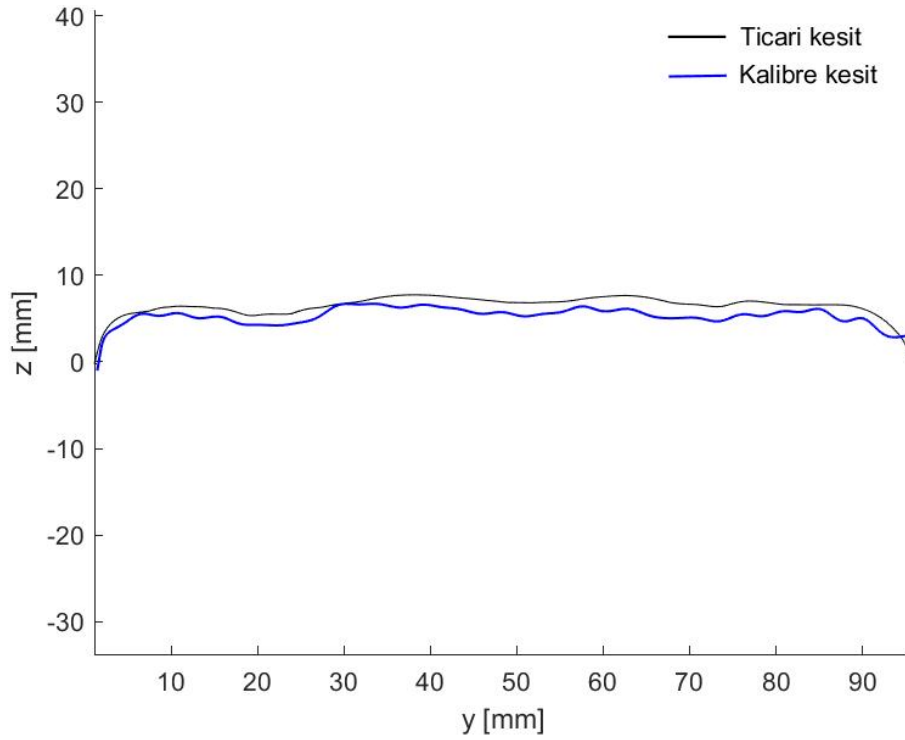


Şekil 3.33 Alçı Balık cisminin SG-FFT için kalibre kesiti ve ticari kesitinin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi

Burada alçı balık için bulunana M kalibrasyon katsayısı kullanarak alçı Deniz Kabuğu ve Denizatı cisimlerinin boyuna kalibre kesitleri de elde edilmektedir. Alçı Deniz Kabuğu ve Denizatı cisimlerinin ticari kesitleri sırası ile Şekil 3.27 (a) ve (b)'de sunulmaktadır. Şekil 3.34(a)'da Alçı Deniz Kabuğu cisminin kalibre kesiti ve ticari kesiti üst üste sunulurken 3.34(b)'de Alçı Denizatı cismininkiler resmedilmektedir. Sonuçta L-FPP görüntüleme sisteminde SG- FFT ızgara analizi ile elde edilen yüzey profilinden (kalibre kesitler) sistemin doğruluğunun ne seviyede olduğu ve hataların ne kadar olabileceği söylenebilmektedir.



(a)



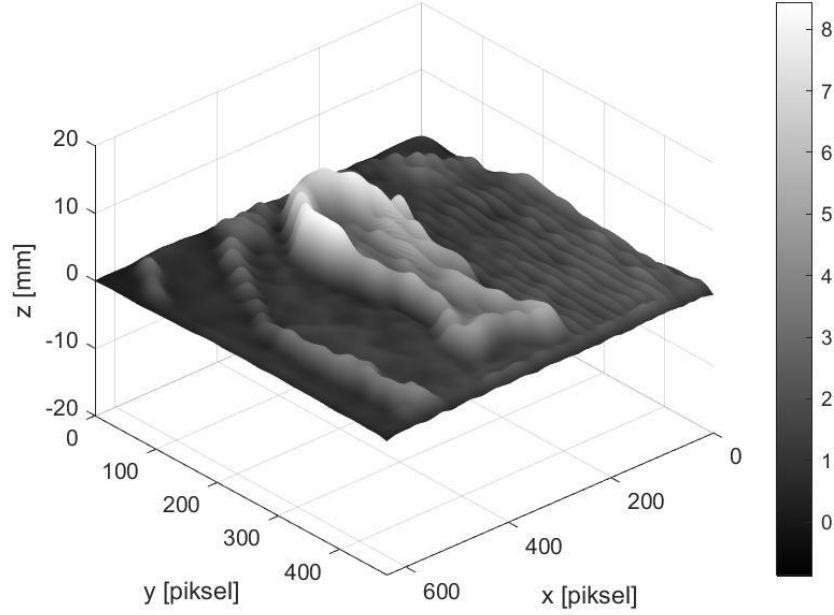
(b)

Şekil 3.34 (a) Alçı Deniz kabuğu cisminin SG-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), deniz kabuğunun üçgen uç kısmıdır.)

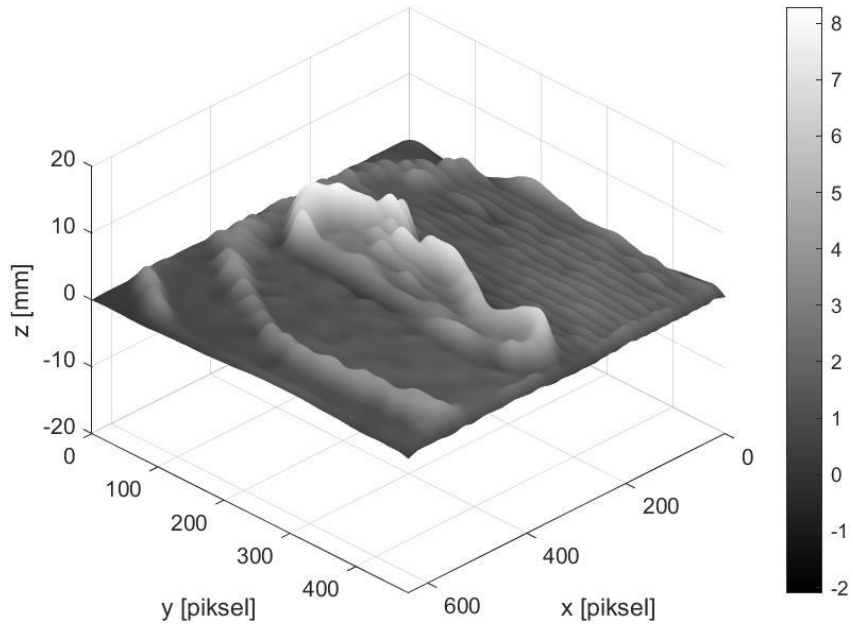
(b) Alçı Denizatı cisminin SG-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), denizatının kuyruk kısmıdır.)

3.2.2.3 W-FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata

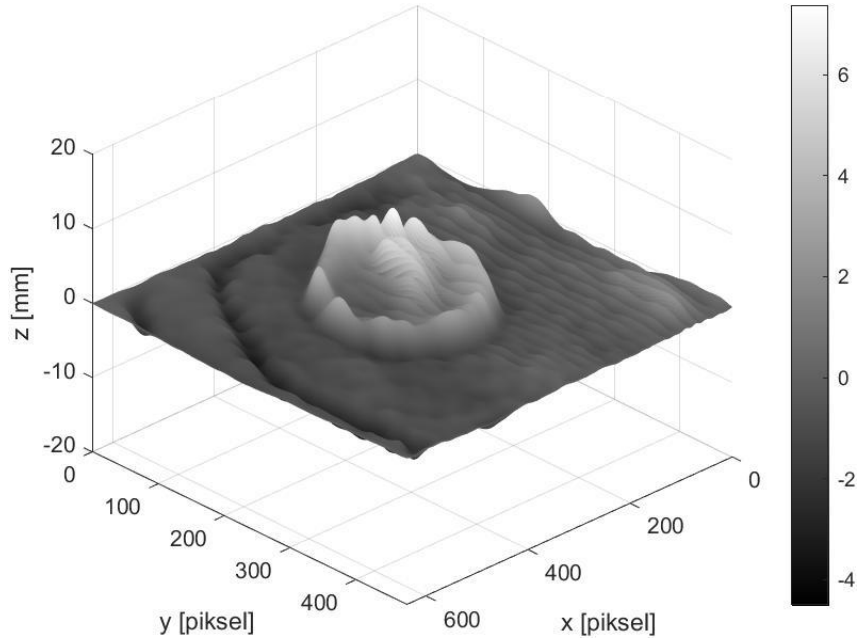
W-FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları ve L-FPP sistem parametreleri kullanılarak alçı balık, denizati ve deniz kabuğu için Şekil (3.35), (3.36) ve (3.37)'de gösterilen üç-boyutlu yüzey profilleri mm olarak (yükselti z değerleri) elde edilmiştir.



Şekil 3.35 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde W-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.

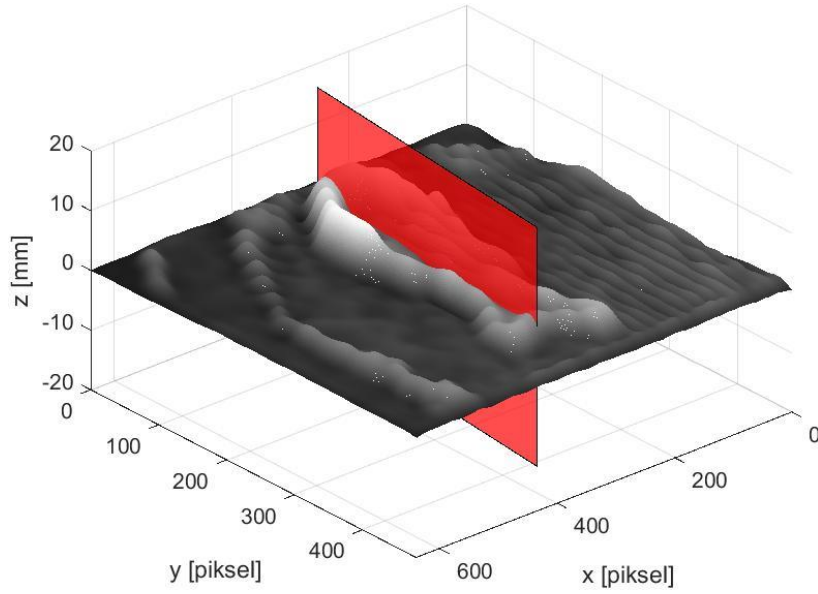


Şekil 3.36 Alçı Denizati cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde W-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.



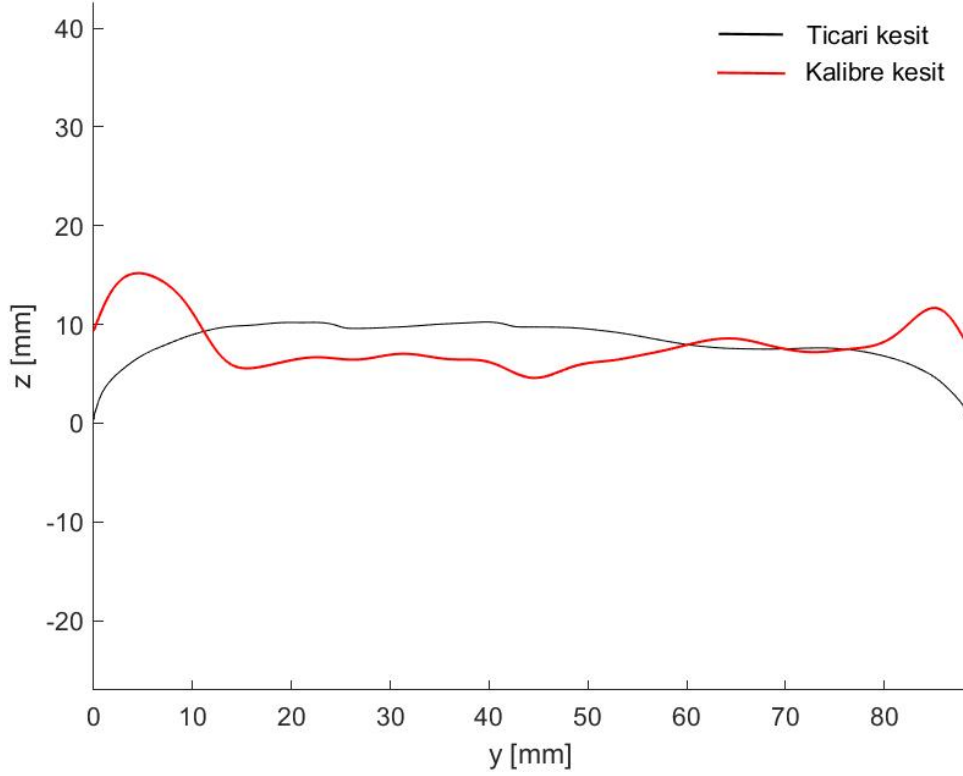
Şekil 3.37 Alçı Deniz Kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde W-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.

Kalibrasyon katsayısını bulabilmek için Şekil 3.22’deki ticari kesit ve Şekil 3.38’deki test kesit kullanılarak; sırası ile ticari kesitin ortalama değeri $K_M = 7,922$ ve test kesitin ortalama değeri de $D_M = 3,102$ olarak hesaplanmıştır. Burada kalibrasyon katsayısı $M_{WFF} = \frac{K_M}{D_M} = 2,554$ olarak bulunur.



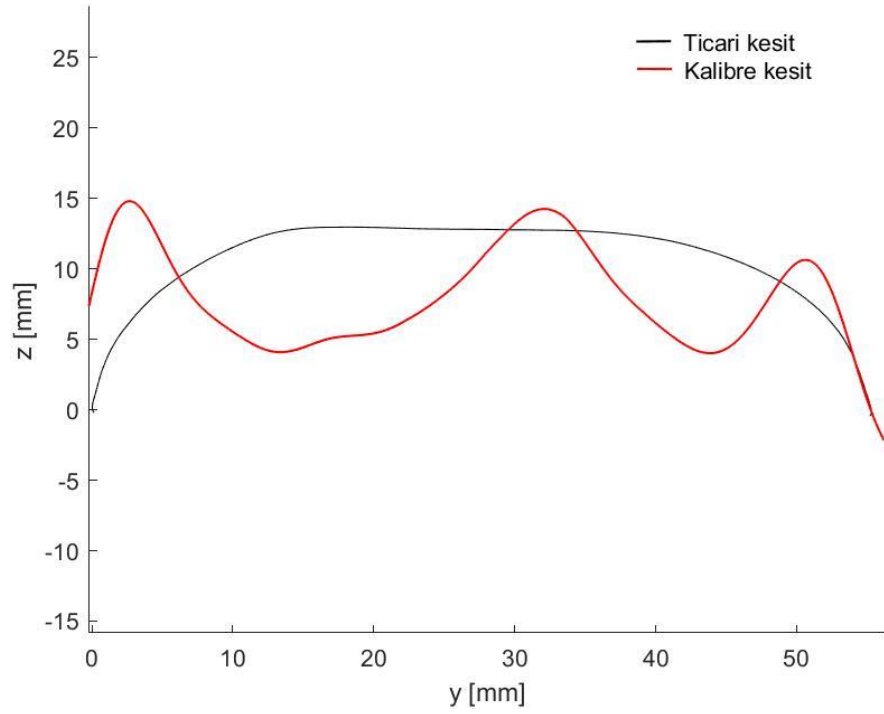
Şekil 3.38 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden W-FFT ile elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).

Kalibrasyon katsayısı kullanılarak balık test kesiti kalibre kesite dönüştürülmüştür. Daha sonra bulunan kalibre kesit ile ticari kesit Şekil 3.39’da üst üste çizdirilerek karşılaştırma yapılmıştır.

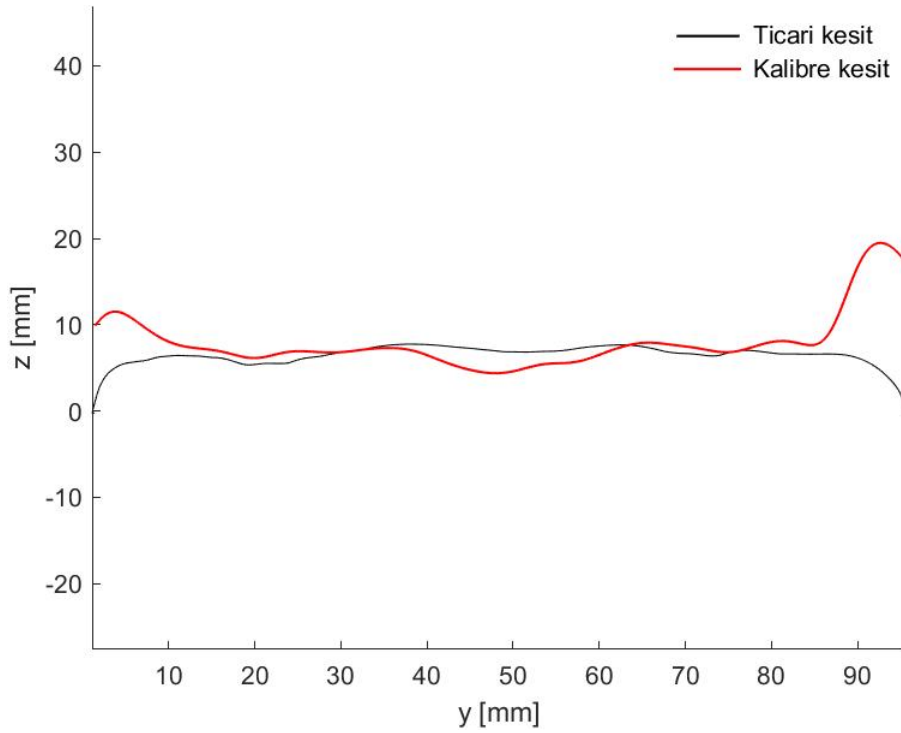


Şekil 3.39 Alçı Balık cisminin W-FFT için kalibre kesiti ve ticari kesitinin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi

Alçı balık için bulunana M kalibrasyon katsayısı kullanarak alçı Deniz Kabuğu ve Denizatı cisimlerinin boyuna kalibre kesitleri de elde edilmektedir. Alçı Deniz Kabuğu ve Denizatı cisimlerinin ticari kesitleri sırası ile Şekil 3.27 (a) ve (b)’de sunulmaktadır. Şekil 3.40(a)’da Alçı Deniz Kabuğu cisminin kalibre kesiti ve ticari kesiti üst üste sunulurken 3.40(b)’de Alçı Denizatı cismininkiler resmedilmektedir



(a)



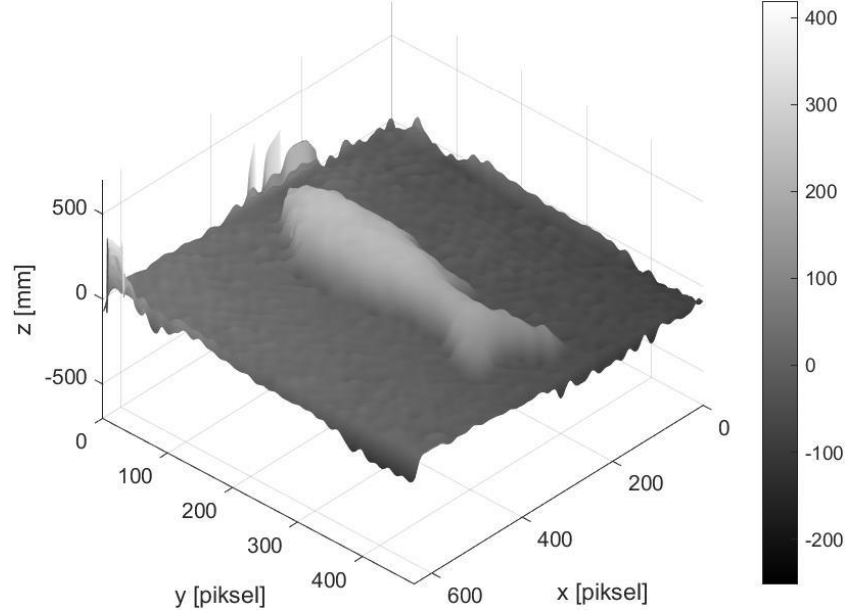
(b)

Şekil 3.40(a) Alçı Deniz kabuğu cisminin W-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), deniz kabuğunun üçgen uç kısmıdır.)

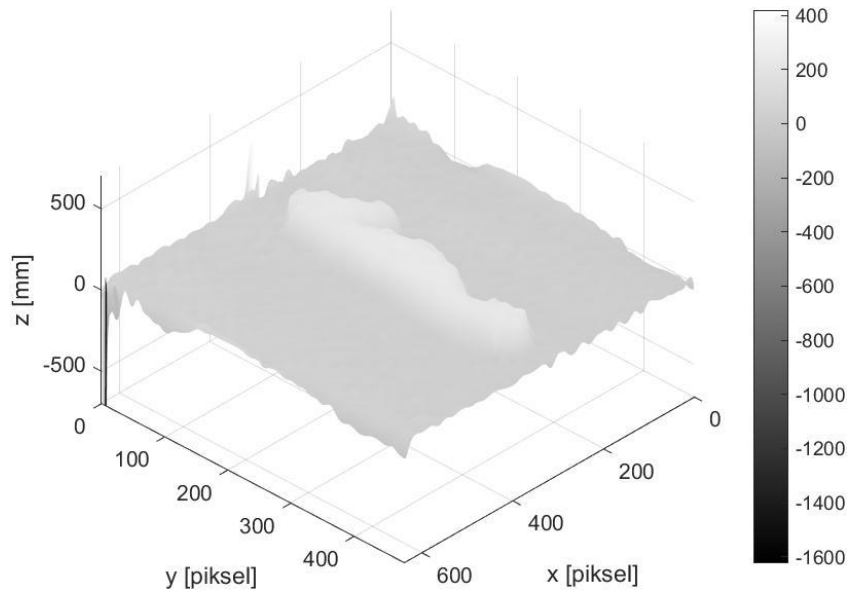
(b) Alçı Denizatı cisminin W-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), denizatının kuyruk kısmıdır.)

3.2.2.4 EMD-FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata

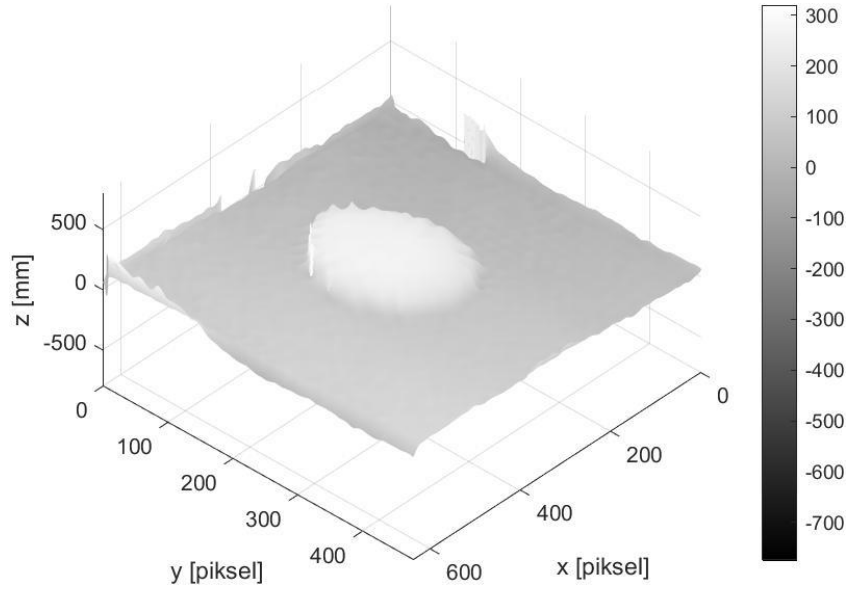
EMD- FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları ve L-FPP sistem parametreleri kullanılarak alçı balık, denizati ve deniz kabuğu için Şekil (3.41), (3.42) ve (3.43)'de gösterilen üç-boyutlu yüzey profilleri mm olarak (yüksekti z değerleri) elde edilmiştir.



Şekil 3.41 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde EMD-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.

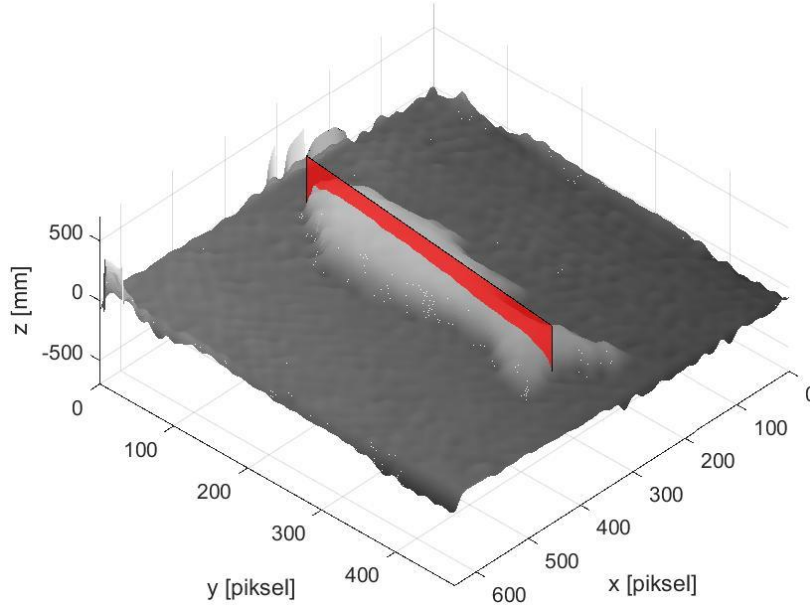


Şekil 3.42 Alçı Denizati cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde EMD-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.



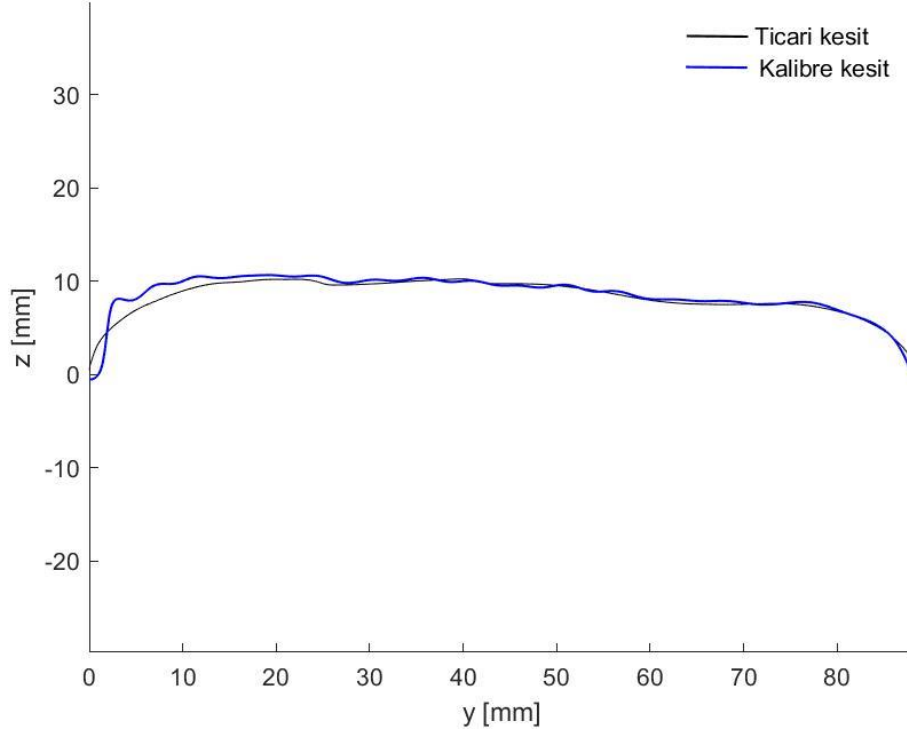
Şekil 3.43 Alçı Deniz kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde EMD-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili.

Kalibrasyon katsayısını bulabilmek için Şekil 3.22’deki ticari kesit ve Şekil 3.44’deki test kesit kullanılarak; sırası ile ticari kesitin ortalama değeri $K_M = 7,922$ ve test kesitin ortalama değeri de $D_M = 168,857$ olarak hesaplanmıştır. Burada kalibrasyon katsayısı $M_{EMD} = \frac{K_M}{D_M} = 0.047$ olarak bulunur.



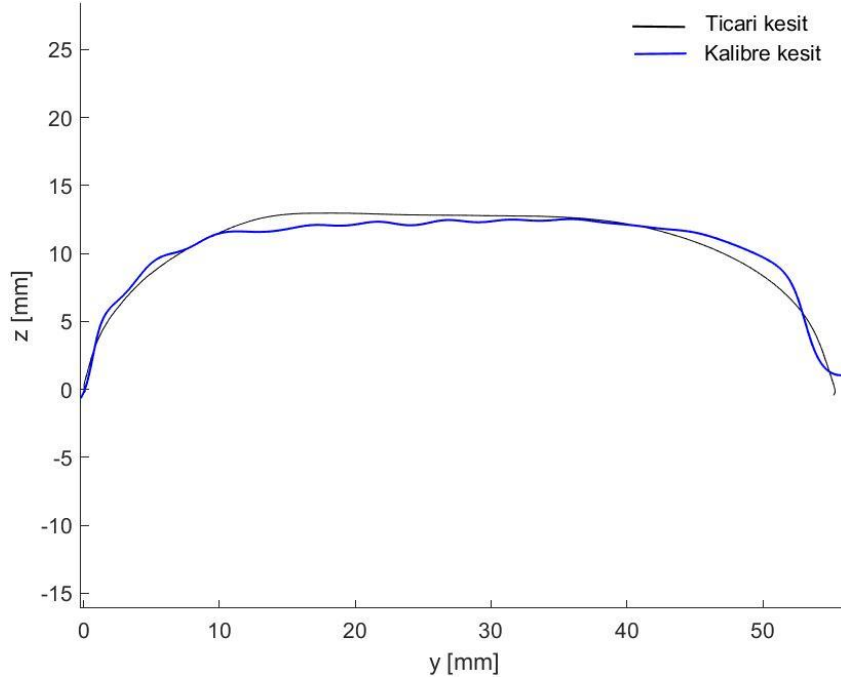
Şekil 3.44 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden EMD-FFT ile elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).

Kalibrasyon katsayısı kullanılarak balık test kesiti kalibre kesite dönüştürülmüştür. Daha sonra bulunan kalibre kesit ile ticari kesit Şekil 3.45’da üst üste çizdirilerek karşılaştırma yapılmıştır

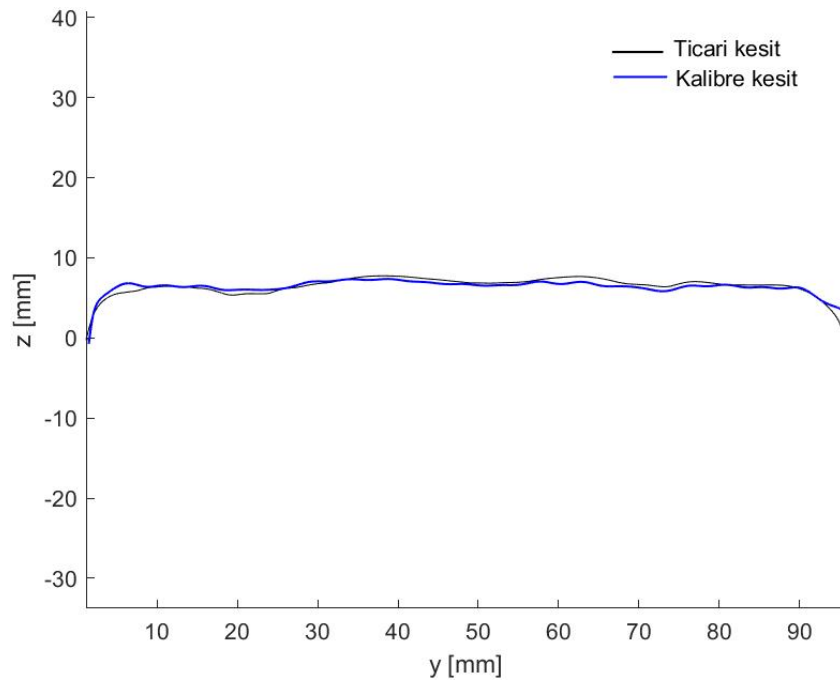


Şekil 3.45 Alçı Balık cisminin EMD-FFT için kalibre kesiti ve ticari kesitinin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi

Alçı balık için bulunana M kalibrasyon katsayısı kullanarak alçı Deniz Kabuğu ve Denziatı cisimlerinin boyuna kalibre kesitleri de elde edilmektedir. Alçı Deniz Kabuğu ve Denziatı cisimlerinin ticari kesitleri sırası ile Şekil 3.27 (a) ve (b)’de sunulmaktadır. Şekil 3.46(a)’da Alçı Deniz Kabuğu cisminin kalibre kesiti ve ticari kesiti üst üste sunulurken 3.46(b)’de Alçı Denizatı cismininkiler resmedilmektedir



(a)



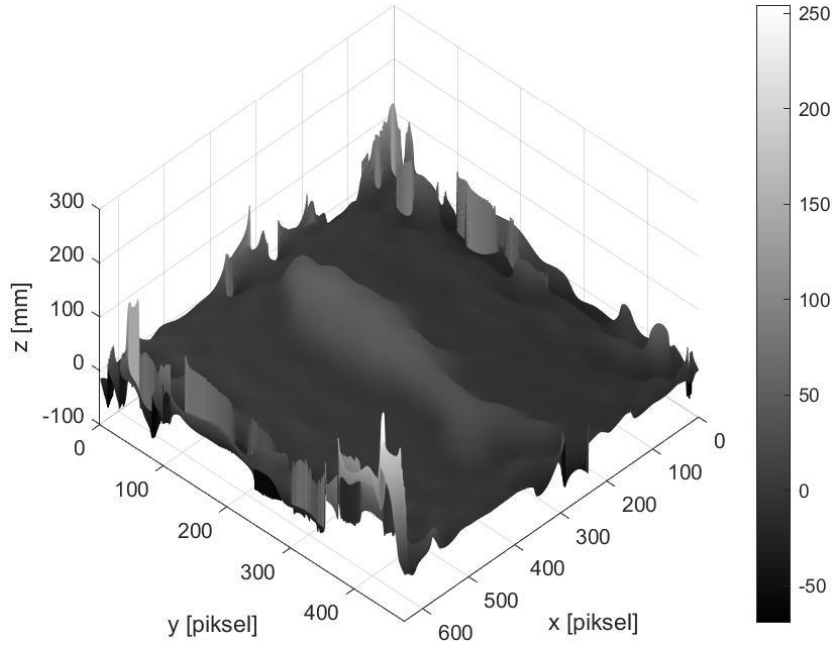
(b)

Şekil 3.46(a) Alçı Deniz kabuğu cisminin EMD-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), deniz kabuğunun üçgen uç kısmıdır.)

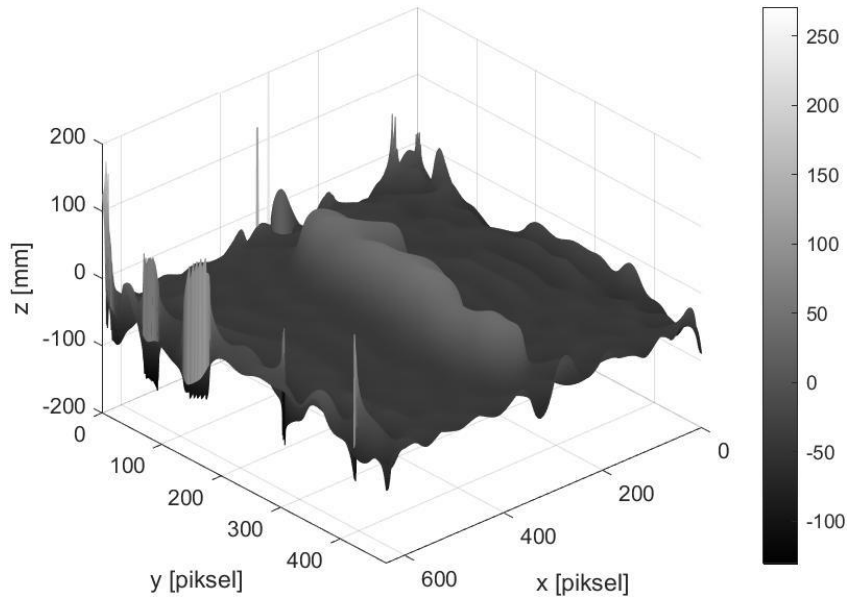
(b) Alçı Denizatı cisminin EMD-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), denizatının kuyruk kısmıdır.)

3.2.2.5 GPM-FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları kullanılarak Kalibrasyon ve L-FPP görüntüleme sisteminde Hata

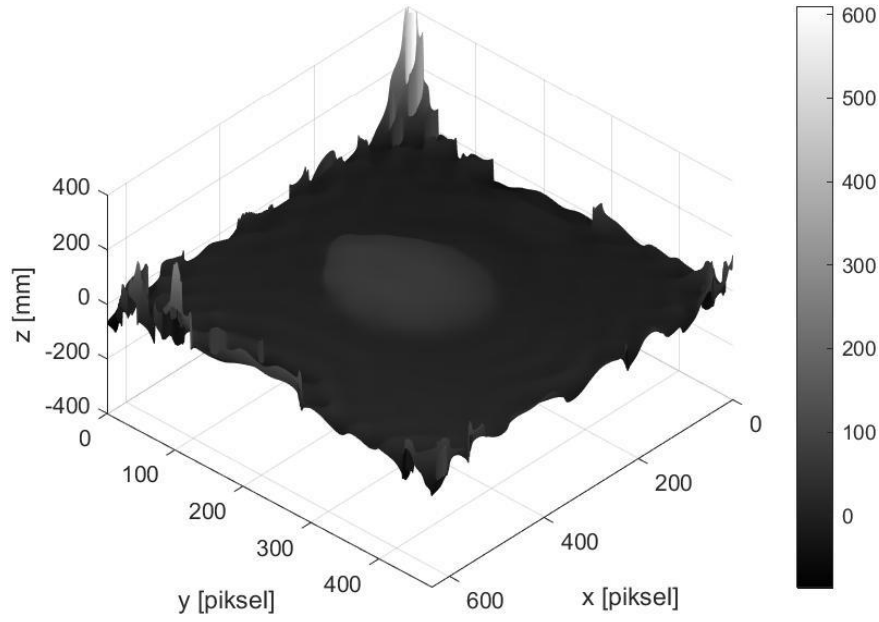
GPM-FFT yöntemi ile elde edilen faz haritaları ve L-FPP sistem parametreleri kullanarak alçı balık, denizatı ve deniz kabuğu için Şekil (3.47), (3.48) ve (3.49)'de gösterilen üç-boyutlu yüzey profilleri mm olarak (yüksekti z değerleri) elde edilmiştir.



Şekil 3.47 Alçı Balık cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde GPM-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili

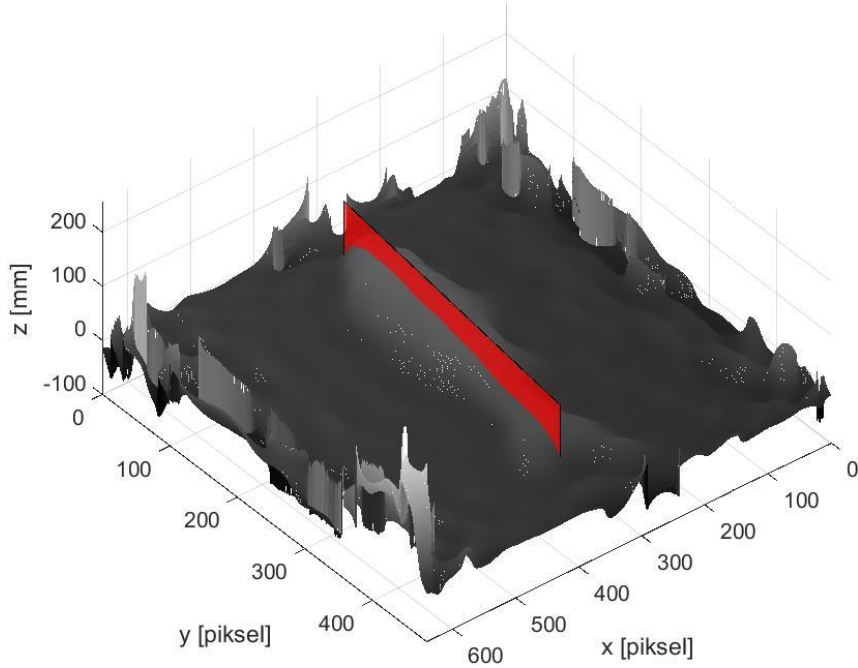


Şekil 3.48 Alçı Denizatı cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde GPM-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili



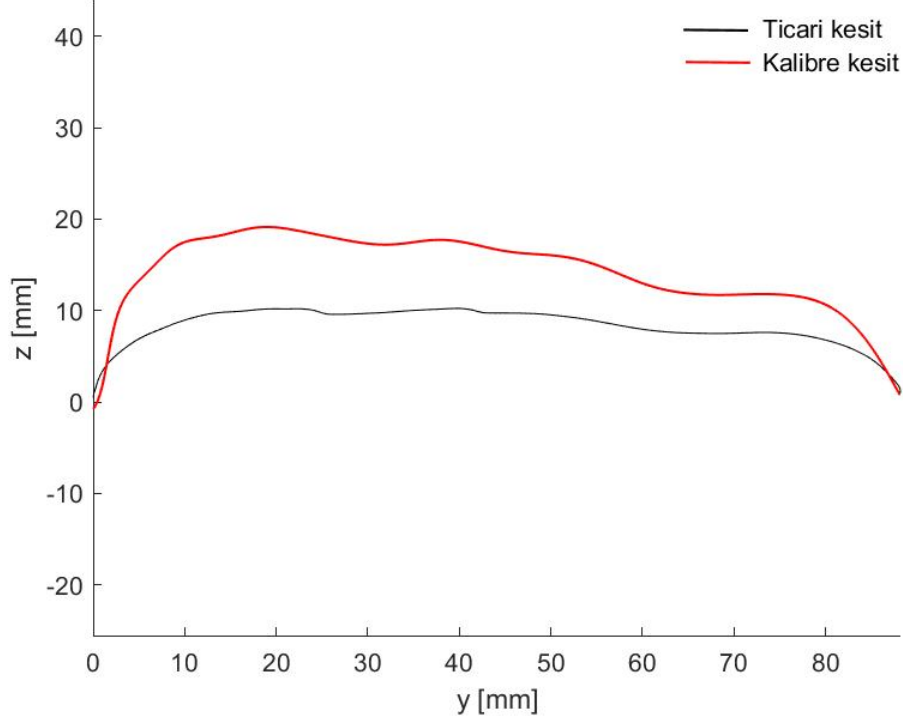
Şekil 3.49 Alçı Deniz kabuğu cisminin 3B L-FPP görüntüleme sisteminde GPM-FFT kullanılarak bulunan yüzey profili

Kalibrasyon katsayısını bulabilmek için Şekil 3.22’deki ticari kesit ve Şekil 3.50’deki test kesit kullanılarak; sırası ile ticari kesitin ortalama değeri $K_M = 7,922$ ve test kesitin ortalama değeri de $D_M = 21,648$ olarak hesaplanmıştır. Burada kalibrasyon katsayısı $M_{GPM} = \frac{K_M}{D_M} = 0,366$ olarak bulunur.



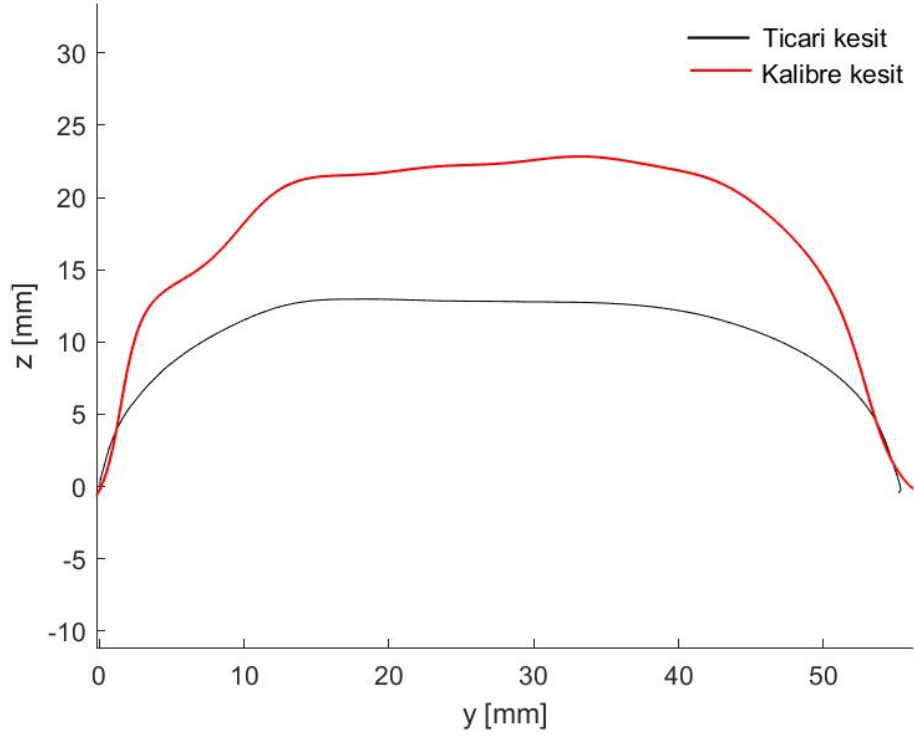
Şekil 3.50 Alçı Balık cisminin L-FPP 3B görüntüleme sisteminden GPM-FFT ile elde edilen 3B görüntüsünün boyuna kesit görünümü (test kesit).

Kalibrasyon katsayısı kullanılarak balık test kesiti kalibre kesite dönüştürülmüştür. Daha sonra bulunan kalibre kesit ile ticari kesit Şekil 3.51’de üst üste çizdirilerek karşılaştırma yapılmıştır.

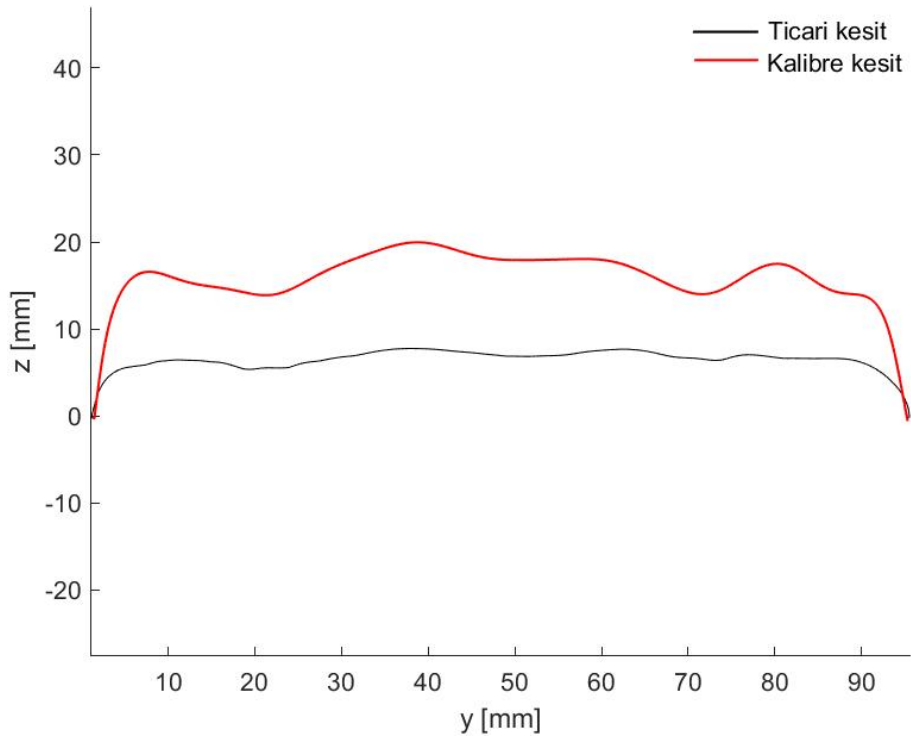


Şekil 3.51 Alçı Balık cisminin GPM-FFT için kalibre kesiti ve ticari kesitinin karşılaştırılma amacı ile üst üste çizimi

Alçı balık için bulunana M kalibrasyon katsayısı kullanarak alçı Deniz Kabuğu ve Denziatı cisimlerinin boyuna kalibre kesitleri de elde edilmektedir. Alçı Deniz Kabuğu ve Denziatı cisimlerinin ticari kesitleri sırası ile Şekil 3.27 (a) ve (b)’de sunulmaktadır. Şekil 3.52(a)’da Alçı Deniz Kabuğu cisminin kalibre kesiti ve ticari kesiti üst üste sunulurken 3.52(b)’de Alçı Denziatı cismininkiler resmedilmektedir



(a)

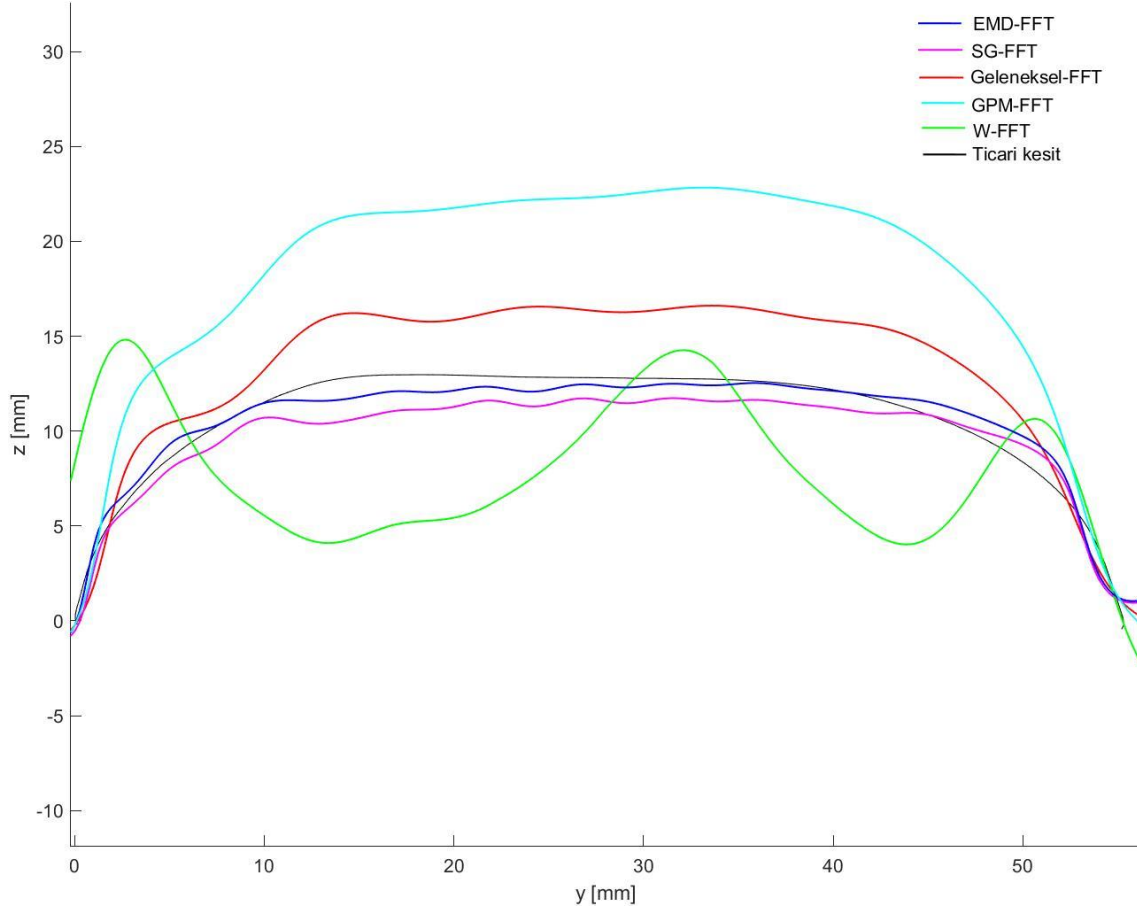


(b)

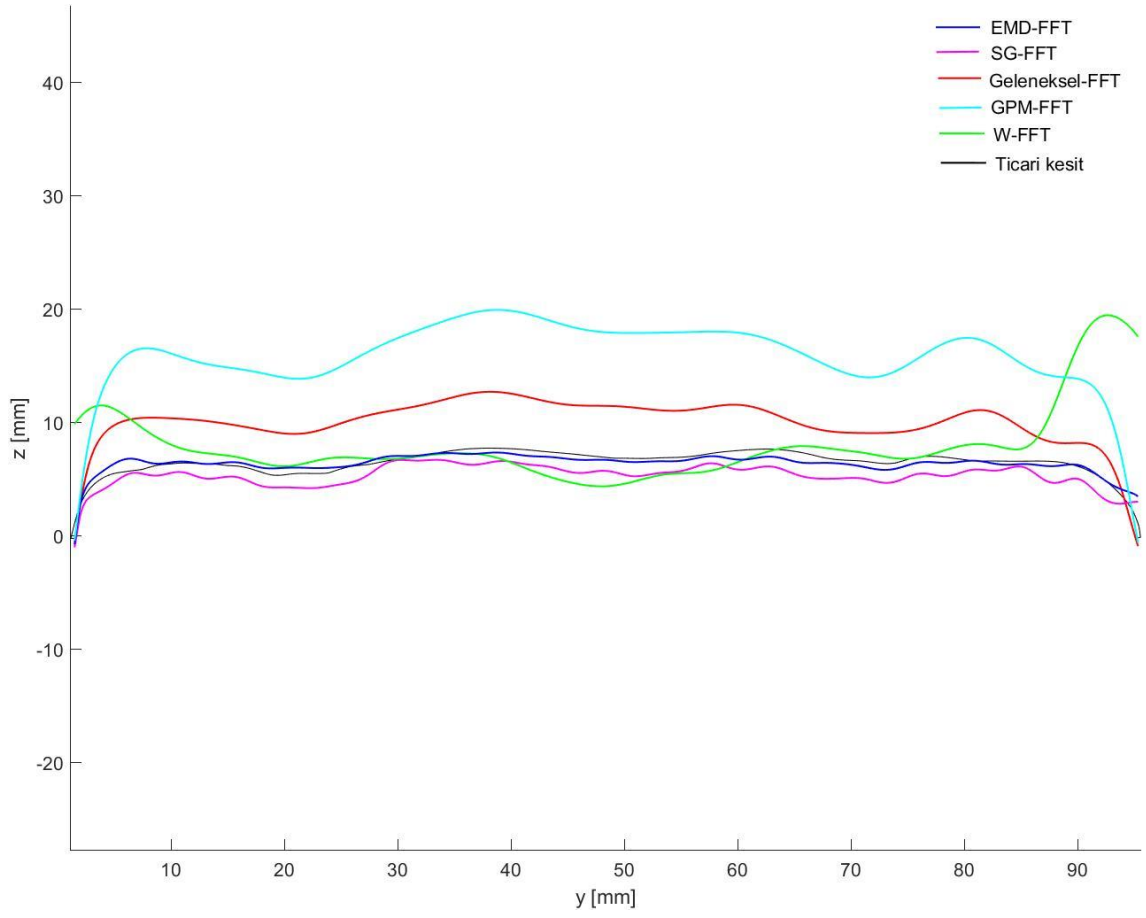
Şekil 3.52(a) Alçı Deniz kabuğu cisminin GPM-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), deniz kabuğunun üçgen uç kısmıdır.)

(b) Alçı Denizatı cisminin GPM-FFT için kalibre kesiti ile ticari kesitinin karşılaştırma için üst üste çizimi. (Başlangıç noktası (0,0), denizatının kuyruk kısmıdır.)

Son olarak Alçı Deniz kabuğu ve Alçı Denizatı cisimleri için Geleneksel FFT, SG-FFT, W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT yöntemlerinden alınan kalibre kesitleri ve ticari kesitin üst üste çizimleri Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'te verilmiştir.



Şekil 3.53 Alçı Deniz kabuğu cismi için Geleneksel FFT, SG-FFT, W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT yöntemlerinden alınan kalibre kesitleri ve ticari kesitin üst üste çizimleri.



Şekil 3.54 Alçı Denizatı cismi için Geleneksel FFT, SG-FFT, W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT yöntemlerinden alınan kalibre kesitleri ve ticari kesitin üst üste çizimleri.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada L-FPP 3 boyutlu görüntüleme sisteminde geleneksel FFT ızgara analiz tekniği ve buna dayalı analiz yöntemleri ile elde edilen yüzey yükselti değerleri ile sistemin doğruluğunun teorik ve deneysel olarak incelenmesi yapılmıştır. L-FPP görüntüleme sisteminde ızgara analizi için kullanılan geleneksel FFT tekniğinin kenar etkisi ve süreksizlikler gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle çeşitli yöntemlerle FFT tekniği birleştirilerek kullanılmıştır. Amacımız geleneksel FFT'ye dayalı bu işaret analiz yöntemlerinin sistemin doğruluğunu nasıl etkilediğini tespit etmek yani sistemdeki gürültüyü azaltabilen en etkili yöntemi belirlemektir.

Bu tespitin yapılabilmesi için benzetim ile L-FPP sisteminden elde edilen ızgara desenleri kullanılmıştır. Bu desenlerden FFT ve onun ile birleştirilen yöntemlerin verdiği faz haritaları kullanılarak elde edilen hata değerlerinden hangi yöntemin gerçeğe daha yakın sonuç verdiği tespit edilmiştir. Böylece sistemin doğruluğunu artıran yöntemi belirlemek mümkün olmuştur. Bu benzetim çalışmasında işaretin işlenmesi aşamasında geleneksel FFT, SG-FFT, W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT analiz yöntemleri kullanılmıştır. Benzetim yapılırken kullanılan faz değerleri ile işaret analiz yöntemlerinin verdiği faz değerleri kullanılarak hata değerleri hesaplanmıştır. Benzetimde kullanılan üç cisim için elde edilen fazlar ve hataları yorumlarından aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır:

1- Yarım küre şeklindeki cismin ızgara deseninden elde edilen faz haritaları ve hata değerleri sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de sunulmuştur. Bu sonuçlardan böyle bir cisim için en doğru fazın EMD-FFT yöntemiyle elde edildiği görülmektedir. (bkz. Şekil 3.4(d), 3.5(d)). Diğer yöntemler en doğru olandan en az doğru olana doğru sıralansaydı şu şekilde olurdu: W-FFT (bkz. Şekil 3.4(c), 3.5(c)), SG-FFT (bkz. Şekil 3.4(b), 3.5(b)), geleneksel FFT (bkz. Şekil 3.4(a), 3.5(a)) ve son olarak GPM-FFT (bkz. Şekil 3.4(e), 3.5(e)). Belirtildiği gibi L-FPP sisteminden belirtilen yöntemlerle elde edilen faz bilgisi speckle gürültüsü, arka plan, titreşim vb. faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Burada EMD-FFT sonuçlarının (bkz. Şekil 3.4(d) ve 3.5(d)) iyi olduğu söylenebilir çünkü bu yöntem arka plan gürültüsünü ortadan kaldırır. Ancak sistemin doğruluğunun sadece teknik mekanizma, sistem bileşenleri ve kurulumu, görüş alanı ve sistem

kalibrasyonundan değil, ölçümü yapılan nesnelerin geometrik ve yüzey özelliklerinden de etkilendiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bütün bunları göz önünde bulundurulduğunda EMD-FFT'nin en iyi yöntem olduğu görülmektedir.

2- Koni cismin saçak deseninden elde edilen fazlar ve hata değerleri sırasıyla Şekil 3.6 ve 3.7'te verilmiştir. Yarı küresel nesnede olduğu gibi EMD-FFT, elde edilen koni değerleri için en doğru sonuçları veren (bkz. Şekil 3.6(d), 3.7(d)), sistemi gerçek faza yaklaştıran ve en az hatayı sunan yöntem olmuştur. İkinci en doğru yöntem SG-FFT (Şekil 3.6(b), 3.7(b)'ye bakınız) ve ardından geleneksel FFT (Şekil 3.6(a), 3.7(a)), GPM-FFT (Şekil 3.6(e), 3.7(e)) ve W-FFT (bkz. Şekil 3.6(c) ve 3.7(c)). Bu bulgulara göre speckle gürültüsü, titreşim gürültüsü ve kuantum gürültüsü işaret analiz yöntemleri tarafında zaten kaldırılamayan etkilerdir. Bunlardan speckle gürültüsü lazer kullanıldığı için oluşmaktadır ve yöntemler bu gürültüyü elimine edememektedir.

3- Karmaşık tepeli şekil için L-FPP sisteminden elde edilen saçak deseni kullanılarak hesaplanan 2D ve 3D faz haritaları (bkz. Şekil 3.8) ve hata değerleri (bkz. Şekil 3.9) dikkate alındığında W-FFT en iyi sonuçları vermiştir (bkz. Şekil 3.8(c), 3.9(c)). En küçük hata bu yöntemle gözlemlendi (bkz. Şekil 3.9(c)). Etkinlik açısından W-FFT'yi EMD-FFT (bkz. Şekil 3.8(d), 3.9(d)) ve SG-FFT (bkz. Şekil 3.8(b) ve 3.9(b)) takip etti. Geleneksel FFT (bkz. Şekil 3.8(a), 3.9(a)) her parametrede GPM-FFT'den daha iyiydi (bkz. Şekil 3.8(e), 3.9(e)).

Sonuç olarak test edilen yöntemlerin etkinlik sırası yüzeyin, malzemenin ve geometrik şeklin özelliklerine göre değişmektedir. Buna rağmen, EMD-FFT yöntemi tüm koşullarda en az hatayı sunmuş ve gürültüden en az etkilenen yöntem olup, diğer yöntemlerin önünde tutarlı bir şekilde yüksek sıralamaya sahiptir. İkinci en etkili yöntem SG-FFT'dir ancak en büyük dezavantajı olası fazı etkileyen ve bazen sistemin doğruluğunu azaltan yumuşatma işlemidir. Bu sistemden elde edilen görüntülerden faz haritası oluşturulduğu için yumuşatma işlemi yüzeyin özelliklerini doğrudan etkiler. GPM-FFT koşulsuz olarak tüm nesnelerin faz haritalamasında en büyük hatayı vermiş ve sistemin doğruluğunu azaltmıştır. GPM-FFT'nin L-FPP sisteminde faz haritalama için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. W-FFT ise literatürde önerildiği ve anlatıldığı kadar sistemin doğruluğunu artıran bir yöntem olmayıp kararlılık sunmamaktadır. Ayrıca ölçülen nesnenin geometrik şekline bağlı olarak sistemin doğruluğunu azaltır. L-FPP sistemi ile

koni şeklindeki bir cismin üç boyutlu görüntüsü alınacaksa en büyük hatayı verdiği ve sistemin doğruluğunu azalttığı için W-FFT ızgara analiz yöntemi kullanılmamalıdır.

L-FPP sisteminin deneysel olarak gerçeklemede doğruluğunu etkileyen faktörleri sırayla ele alırsak, sistemden kaynaklı speckle gürültüsü, titreşim gürültüsü ve kuantum gürültüsüyle beraber taranan nesnenin rengi, geometrik şekli (konkav olması vb.) ve yapıldığı malzeme sayılabilir. Bu sorunların geleneksel FFT, SG-FFT, W-FFT, EMD-FFT ve GPM-FFT yöntemleri kullanıldığında ortadan kalkıp kalkmadığı bu çalışmada bir kaç cisim kullanılarak araştırılmıştır.

a) Geleneksel FFT yöntemi literatürde de belirtilen kenar etkileri ve faz süreksizliği nedeni ile sistemden elde edilen z yükseltisi (profil) beklenildiği gibi sistemin doğruluğunu düşürmektedir (bkz. Şekil 3.26 ve Şekil 3.28 (a) ve (b)).

b) SG-FFT ile sistemin doğruluğu daha da yükselmektedir. En iyi doğruluğa sistemi ulaştıran ikinci yöntemdir. Ancak bu yöntemin en büyük dezavantajı fazı etkileyen yumuşatma işlemidir. Bu nedenle faz haritasının doğruluğu düşük çıkmıştır (bkz. Şekil 3.33 ve Şekil 3.34 (a) ve (b)).

c)W-FFT yöntemi L-FPP sisteminin doğruluğunu en çok etkileyen yöntemdir. Çünkü ölçülen cismin geometrik şeklinden en fazla o etkilendiğinden elde edilen faz ve profil bilgisi sistemin doğruluğunu çok düşürmektedir. Kaldı ki zaten sistemde lazer kullanıldığından dolayı rastgele bir hata yaratan speckle(benek) gürültüsü vardır. Dijital kamera kullanıldığından bir de kuantum gürültüsü eklendiğini düşündüğümüzde fark edilir bir şekilde en kötü yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (bkz. Şekil 3.39 ve Şekil 3.40 (a) ve (b)).

d) EMD-FFT yöntemi ise her durumda en az hatayı vererek gürültüden, nesnelerin geometrik ve yüzey özelliklerinden en az etkilenen yöntem göze çarpmaktadır. Aynı zamanda bu yöntem arka planı ortadan kaldırarak titreşim gürültüsünü minimize etmektedir. Bu nedenle de en başarılı yöntem olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 3.45 ve Şekil 3.46 (a) ve (b)).

e) GPM-FFT, W-FFT yöntemi kadar çok faz da bozulmalara sebebiyet vermemiştir. Bununla birlikte sistemin doğruluğunu W-FFT'den sonra en çok etkileyen ikinci yöntemdir (bkz. Şekil 3.51 ve Şekil 3.52 (a) ve (b)).

Alçı Deniz kabuğu ve Deniz atı cisimleri yapılan ölçümlerden belirtilen 5 farklı yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılması için Şekil 3.53 ve Şekil 3.54 verilmektedir. Sistemin doğruluğunu bu şekillere göre değerlendirebilirsek;

1) Alçı Deniz kabuğu için cismin ticari kesitine en yakın doğru sonucu veren EMD-FFT yöntemi olmuştur ve kabaca hata 2 mm olmuştur. Sistemin doğruluğunu en az etkileyen ikinci metod SG-FFT'dir ve yaklaşık 4 mm bir doğrulukla ölçüm yapılmasına müsaade etmektedir. Bu yöntemi Geleneksel FFT yöntemi 6 mm'lik hata ile takip etmektedir. GPM FFT ise takriben 10 mm'lik hata oranıyla W-FFT yöntemine göre nispeten daha iyi sonuç vermiştir. Cismin geometrisinden dolayı L-FPP sisteminde kullanıldığında an fazla hatayı veren W-FFT olmuştur.

2) Alçı Denizatı 3B görüntü sonuçlarında ise yine yaklaşık 2 mm'lik hatayla EMD-FFT yöntemi en iyi sonucu vermiştir. Görüntülemeye takriben 3 mm'lik hata veren SG-FFT yine L-FPP sisteminin doğruluğunu etkilemektedir ve ikinci sırada yer almaktadır. Zaten görüntüde yumuşatma yaptığı için detayları net sunmadığı açıktır. Bu yöntemi kabaca 5 mm hata veren Geleneksel FFT yöntemi takip etmektedir ve beklenildiği gibi sistemin doğruluğunu sadece kenar etkileri ve fazda süreksizliğe bağlı değil geometriye bağlı olarak ta azalttığı düşünülmektedir. GPM FFT ise takriben 9 mm'lik hata ile profili vermektedir. Bu beşinci sırada yer almasına sebep olmaktadır ve L-FPP sisteminin doğruluğunu en çok etkileyen yöntemdir. Son olarak W-FFT yöntemi ise Denizatı kesitinin orta kısımlarında SG-FFT'ye yaklaşmış olsa da baş ve kuyruk kısımlarında GPM-FFT gibi yaklaşık 9 mm'ye yakın hata vermektedir. Bu geometride SG-FFT'den daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Hemen hemen sistemin doğruluğunu etkileyen yöntemler arasında deniz kabuğu geometrisinde sistemin doğruluğunu etkileyen dördüncü yöntem olarak göze çarpmaktadır.

Sonuç olarak L-FPP sisteminin doğruluğunu özellikle ölçülen cismin geometrisine bağlı en çok etkileyen W-FFT metodu kullanılmamalıdır. Diğer yöntemler de kullanılan sistemin ve ölçülen cismin özelliklerine göre seçilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Perry KE, McKelvie J. A comparison of phase-shifting and Fourier methods in the analysis of discontinuous fringe patterns. *Opt Lasers Eng.* 1993; 19, 269–284.
2. Huang L, Kemao Q, Pan B, Asundi AK. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry. *Opt Lasers Eng.* 2010; 48,141–8.
3. Huang PS, Zhang C, Chiang FP. High-speed 3D shape measurement based on digital fringe projection. *Opt Eng.* 2003; 42, 163–9.
4. Zhang ZH. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques. *Opt Lasers Eng.* 2012; 50, 1097–106.
5. Zhou P, Zhu J, Su X, You Z, Jing H, Xiao C, Zhong M. Experimental study of temporal-spatial binary pattern projection for 3D shape acquisition. *Appl Opt.* 2017; 56, 2995–3003.
6. Martínez A, Rayas JA, Cordero RR, Balieiro D, Labbe F. Leaf cuticle topography retrieved by using fringe projection. *Optics and Lasers in Engineering.* 2012; 50, 231-235.
7. Li X, Zhang Z, Yang C. Reconstruction method for fringe projection profilometry based on light beams. *Appl Opt.* 2016; 1;55(34), 9895-9906.
8. Pérez C, Chávez M, Rivera FC, Sarocchi D, Mares C, Barrientos B. Fringe Projection Method for 3D High-Resolution Reconstruction of Oil Painting Surfaces. *Heritage.* 2023; 6, 3461–3474.
9. Yin Z, Liu C, Zhang C, He X, Yang F. Point-Wise Phase Estimation Method in Fringe Projection Profilometry under Non-Sinusoidal Distortion. *Sensors.* 2022; 22, 4478.

10. Lv S, Tang D, Zhang X, Yang D, Deng W, Qian K. Fringe projection profilometry method with high efficiency, precision, and convenience: theoretical analysis and development. *Optics Express*. 2022; 30(19), 33515-33537.
11. Nguyen H, Liang J, Wang Y, Wang A. Accuracy assessment of fringe projection profilometry and digital image correlation techniques for three-dimensional shape measurements. *J Phys Photonics*. 2021; 3 014004.
12. Lopez CV, Salazar CS, Kells K, Pedraza JC, Ramos JM. Improving 3D reconstruction accuracy in wavelet transform profilometry by reducing shadow effects. *IET Image Process*. 2020; 14, 310–317.
13. Xu Y, Zhao H, Jiang H, Li X. High-accuracy 3D shape measurement of translucent objects by fringe projection profilometry. *Opt Express*. 2019; 27, 18421-18434.
14. Wang Z, Nguyen DA, Barnes JC. Some practical considerations in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010; 48, 218–225.
15. Li B, Fu Y, Wang Z, Zhang J. High-Speed High-Accuracy 3D Shape Measurement Based on Binary Color Fringe Defocused Projection. *Journal of the European Optical Society*. 2015; 10.
16. Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, Llado X. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition*. 2010; 43, 2666-2680.
17. Wygant RW, Almeida SP, Soares ODD. Surface inspection via projection interferometry. *Appl Opt*. 1988; 27, 4626-4630.
18. Zhong J, Weng J. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry. *Appl Opt*. 2004; 43, 4993-4998.
19. Zhou J. Wavelet-aided spatial carrier fringe pattern analysis for 3-D shape measurement. *Opt Eng*. 2005; 44(11), 113602.

20. Saraç Z, Birkök HG, Taşkın H, Öztürk E. Evaluation of thermal lens fringes using Hilbert and Fourier transform methods. *IET Science, Measurement and Technology*. 2011; 5 (3), 81 – 87.
21. Zuo C, Feng S, Huang L, Tao T, Yin W, Chen Q. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018; 109, 23-59.
22. Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011; 3, 128–160.
23. Ali HA, Amer MA, Omara AA. New Simple Large Depth of Field Fringe Projection Profilometry System Using Laser Projector. *Journal of Measurement Science and Applications (JMSA)*. 2022; 2(2): 28-39.
24. Segade AS. Fringe projection technique: New methods for shape measurement [PhD Thesis]. Centro de Investigaciones en Óptica AC. Mexico; 2015.
25. Mingzhou L. Development of Fringe Analysis Techniques in white light interferometry for micro-component measurement [PhD Thesis]. National University of Singapore, Singapore; 2008.
26. Su X, Chen W. Fourier transform profilometry: a review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2001; 35, 263–84.
27. Zhang S, Yau S-T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector. *Applied Optics*. 2007; 46, 36–43.
28. Nguyen H, Liang J, Wang Y, Wang Z. Accuracy assessment of fringe projection profilometry and digital image correlation techniques for three-dimensional shape measurements. *J Phys Photonics*. 2021; 3 ,014004.

29. Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes. *Appl Opt.* 1983; 22, 3977–3982.
30. Awal MA, Mostafa SS, Ahmad M. Performance analysis of Savitzky-Golay smoothing filter using ECG signal. *International Journal of Computer and Information Technology.* 2011; 1(02), 24.
31. Zheng S, Cao Y. Fringe-projection profilometry based on two-dimensional empirical mode decomposition. *Appl Opt.* 2013; 52(31), 7648–53.
32. Ertürk S. Sayısal İşaret İşleme. 3rd ed. İstanbul: Birsen Yayınevi; 2016.
33. Li B, Tang C, Zhu X, Su Y, Xu W. Shearlet transform for phase extraction in fringe projection profilometry with edges discontinuity. *Optics and Lasers in Engineering.* 2016; 78, 91–98.
34. Kaya H, Saraç Z, Özer M, Taşkın H. Optical signal processing of interference fringes by Hartley transform method. 17th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics; Slovakia. 2010; vol.7746.
35. Dursun A, Özder S, Ecevit FN. Continuous wavelet transform analysis of projected fringe patterns. *Measurement Science and Technology.* 2004; 9(15), 0957-0233.
36. Savitzky A, Golay MJE. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal Chem.* 1964; 36, 1627–1639.
37. Gorry PA. General lest-squares smoothing and differentiation by the convolution (Savitzky-Golay) method. *Analytical Chemistry.* 1990; 62, 570-573.
38. Kemao Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations. *Optics and Lasers in Engineering.* 2007; 45, 304-317.

39. Kemao Q. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis. *Applied Optics*. 2004; 43(13), 2695-702.
40. Huang NE, Shen Z, Long SR, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proc R Soc Lond A*. 1998; 454, 903-995.
41. Li W, Huyan J, Tighe SL, Ren Q, Sun Z. Three-Dimensional Pavement Crack Detection Algorithm Based on Two-Dimensional Empirical Mode Decomposition. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2017; 143, 04017005.
42. Zhou X, Adrian G, Yang Z, Yang T, Zhao H. Morphological operation-based bi-dimensional empirical mode decomposition for automatic background removal of fringe patterns. *Opt Express*. 2012; 20(22), 24247–62.
43. Feng S, Zuo C, Zhang L, Tao T, Hu Y, Yin W, Qian J, Chen Q. Calibration of fringe projection profilometry: A comparative review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2021; 143, 106622.
44. Ma L, Guo S, Pei X, Tang L, Qian R. An efficient calibration model for fringe projection profilometry using inclined Lambertian plane based on photometric stereo. *Measurement*. 2023; 212, 112684.
45. Villa J, Araiza M, Alaniz D, Ivanov R, Ortiz M. Transformation of phase to (x,y,z)-coordinates for the calibration of a fringe projection profilometer. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012; 50, 265-261.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : BURAK ÖZBAY

Yabancı Dili : İngilizce

Akademik Bilgiler

Öğrenim Durumu

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Y. Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	İstanbul Medeniyet Üniversitesi	2022-24
Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Bülent Ecevit Üniversitesi	2010-15

Başarılar ve Ödüller

- Bölüm Birinciliği, Elektrik-Elektronik Müh., Bülent Ecevit Üniversitesi (2015)
- Fakülte İkinciliği, Mühendislik Fakültesi, Bülent Ecevit Üniversitesi (2015)
- Lise Üçüncülüğü, Mustafa Elmas Arıcı Anadolu Lisesi (Saray/Tekirdağ) (2010)

Yayınlar