

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAYISAL HOLOGRAFİ TEKNİĞİNE DAYALI SES KAYDEDİCİ VE
TAHRİBATSIZ MUAYENE İÇİN KULLANILMASI**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

GÜLHAN USTABAŞ KAYA

ŞUBAT 2019

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAYISAL HOLOGRAFİ TEKNİĞİNE DAYALI SES KAYDEDİCİ VE
TAHRİBATSIZ MUAYENE İÇİN KULLANILMASI

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ
GÜLHAN USTABAŞ KAYA

DANIŞMAN: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

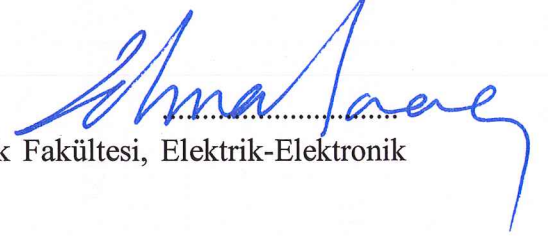
ZONGULDAK
Şubat 2019

KABUL:

Gülhan USTABAŞ KAYA tarafından hazırlanan “Sayısal Holografi Tekniğine Dayalı Ses Kaydedici ve Tahribatsız Muayene İçin Kullanılması” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.
25/02/2019

Danışman: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü



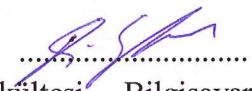
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Necati BAŞMAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü



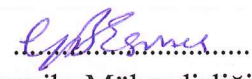
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Okan ERKAYMAZ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü



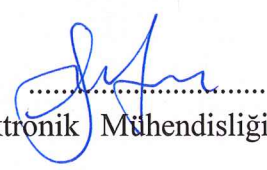
Üye: Doç. Dr. Gökhan Bora ESMER

Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü



Üye: Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./..../2019



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Gülhan USTABAŞ KAYA

ÖZET

Doktora Tezi

SAYISAL HOLOGRAFI TEKNİĞİNE DAYALI SES KAYDEDİCİ VE TAHRİBATSIZ MUAYENE İÇİN KULLANILMASI

Gülhan USTABAŞ KAYA

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

Şubat 2019, 117 Sayfa

Bu çalışmada, eksen dışı (off-axis) sayısal holografi tekniğine dayalı optik ses kaydedici üzerinde yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Çalışma üç ana kısımdan oluşmaktadır;

- 1- Optik ses kaydedici ile elde edilen ses hologramlarından sesin (normal ses ve ses ötesi dalgaların) yeniden elde edilmesi, geri elde edilen seslerin dinlenmesi ve ses dalgalarının frekans spektrumlarının çıkartılması.
- 2- Ses hologramlarından elde edilen ses dalgalarının geri elde edilmesi (reconstruction) işleminde farklı sinyal işleme algoritmalarının kullanılması, bu algoritmaların gürültü bastırma kabiliyetlerinin araştırılması ve her bir sinyal işleme algoritması ile elde edilen sonuçlardan sistemin işaret gürültü oranlarının (İGO) hesaplanması.
- 3- Off-axis sayısal holografi tekniğine dayalı optik ses kaydedici ile malzemelerde darbe ile veya zamanla meydana gelen çatlakların tespiti yapabilen bir dedektörün geliştirilmesi.

ÖZET (devam ediyor)

Birinci kısımda, sinyal işleme algoritması olarak Fourier Dönüşüm metodu (FDM) kullanılmıştır. Sistemde geri elde etme işleminde FDM kullanılmasıyla sayısal ses hologramlarından elde edilen ses dalgaları multimedya dosyası olarak kaydedilmiştir ve kaydedilen bu sesler yeniden dinlenmiştir. Frekans spektrumlarının incelenmesi ile bu ses dalgalarının kayıt için sisteme verilen ses dalgalarına eşit olduğu ortaya koyulmuştur.

İkinci kısımda, sinyal işleme algoritması olarak Fourier Dönüşüm metodu (FDM), Fresnel-Dönüşüm metodu (F-DM) ve bir boyutlu sürekli dalgacık dönüşüm metodu (1B-SDDM) kullanılmıştır. Bahsi geçen sinyal işleme algoritmalarının sistemde var olan gürültüyü bastırma kabiliyetinin ne derecede olduğu işaret gürültü oranlarının (İGO) hesaplanmasıyla analiz edilmiştir. İGO değerlerinin hesaplanması için, herbir sinyal işleme algoritması ile geri elde edilme sürecinde çıkartılan zamansal faz işaretleri ve sisteme verilen ses dalgası kullanılmıştır. İGO değerleri, FDM için % 66.90, F-DM için % 8.70 ve 1B-SDDM için % 4.78 olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda sistemde var olan gürültüyü bastırma kabiliyeti en iyi olan metodun FDM olduğu söylenmiştir.

Son kısımda ise önerilen optik ses kaydedici ile malzemelerde çeşitli sebeplerden kaynaklanarak meydana gelen çatlakları tespit edebilecek bir dedektörün geliştirilmesi için yapılan çalışmalar sunulmuştur. Burada çatlak tespiti için, çatlağın gözle kolaylıkla görülebildiği cam ve tahta malzemeler ve çatlağın çıplak gözle görülemediği metal malzeme kullanılmıştır. Bu tespit, ses hologramlarından geri elde edilen frekans spektrumunun kullanılması ve ses dalgasının malzemedен geçerken sergilediği davranışın maksimum zamansal faz dağılımlarının üç boyutlu olarak çıkartılmasıyla yapılmıştır. Elde edilen frekans spektrumlarında, çatlak malzeme için bulunan frekans değerinin sağlam malzeme için bulunan frekans değerine göre daha fazla kaydığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 3 boyutlu görüntülere bakılarak, ses dalgasının çatlak olmayan bölgeden yüksek şiddetle, çatlak bölgeden ise düşük şiddetle geçtiği tespit edilmiştir. Her iki durum arasındaki fark görüntülerinde ise çatlak olan bölgenin bir çıkıntı olarak karşımıza çıktığı görülmüştür.

ÖZET (devam ediyor)

Anahtar kelimeler: Off-axis sayısal holografi, Optik ses kaydedici, Ses dalgaları, Sinyal işleme algoritmaları, Gürültü, Çatlak tespiti.

Bilim Kodu: 608.06.00





ABSTRACT

Ph. D. Thesis

OPTICAL VOICE RECORDER BASED ON DIGITAL HOLOGRAPHY AND USAGE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING

Gülhan USTABAŞ KAYA

**Zonguldak Bulent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

Şubat 2019, 117 pages

In this study, studies on optical voice recorder based on off-axis digital holography technique are presented. The work is presented in three main sections;

- 1- The reconstruction of sound wave (normal sound and ultrasonic sound waves) from recorded sound hologram obtained by optical voice recorder, listening reconstructed sounds and obtaining the frequency spectrum of sound waves.
- 2- The implementation of different signal processing algorithms for reconstruction process of sound waves obtained from sound holograms, the investigation of noise suppression capabilities of choosen algorithms and the calculation of the signal-to-noise ratio (SNR) of system for each signal processing algorithm.
- 3- The design of a detector that can be detect cracks in materials occurred with stroke or over time by using optical voice recorder based on off-axis digital holography technique.

ABSTRACT (continued)

In the first section, Fourier transform method (FTM) is used for reconstruction. The sound waves obtained from sound holograms by using FTM are recorded into multimedia files and these recorded sound waves are listened. When the frequency spectrums are compared, it is proved that the reconstructed sound waves and the original sound waves – the sound waves applied to systems as input for recording- are exactly the same.

In the second section, Fourier transform method (FTM), Fresnel-Transformation method (F-TM) and one dimensional-continuous wavelet transform method (1D-CWT) are implemented as signal processing algorithms. To compare the success of the above-mentioned algorithms in terms of suppressing the noise in the system, the signal-to-noise ratios (SNR) are calculated in the system in cases each algorithm is implemented. In order to calculate the SNR values, the temporal phase profile obtained by using signal processing algorithm in reconstruction process and the input sound waves at the system are used. The SNR values are calculated as 66.90%, 8.70% and 4.78% for FTM, F-TM and 1D-CWTM respectively. One can easily see that FTM is the best method to suppress the noise in the system.

In the last section, the studies are presented to design a detector that can detect the cracks in the materials formed by various reasons by using the proposed optical sound recorder. For crack detection, glass and wood materials in which the crack can be easily seen and metal in which the crack cannot be seen with the naked eye are used. This detection is performed by using the frequency spectrum obtained from sound hologram and obtaining the 3 dimensional behavior of sound wave while passing through the material. It is observed in the obtained frequency spectrums that the frequency of the cracked material is shifted more than the frequency of the solid material. In addition, from the 3D images, it is seen that the sound wave passes through the non-cracked part with more intensity than the cracked part. When comparing the 3D images for two cases, the cracked area is seen as a bump.

Keywords: Off-axis digital holography, Optical voice recorder, Sound waves, Signal processing algorithms, Noise, Crack detection.

Science Code: 608.06.00

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve görüşlerini benden esirgemeyen, çalışma ile ilgili olarak eksik noktaları görmemde ve bunları gidermemde katkı sağlayan, çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Zehra SARAÇ'a teşekkürü borç bilirim.

Çalışmamda bana mali destek sağlayan Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (BAP Proje No: 2016-75737790-04) ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK 1002 Proje No: 116E303) teşekkür ederim.

Tezin tüm aşamalarında maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, her an yanımda olan, yaptığım her işi sonuna kadar destekleyen çok değerli eşim Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAYA'ya, varlığı ile stresimi yenmemde çok büyük katkısı olan biricik oğlum Sayın Hakan Kaan KAYA'ya ve ikinci ailem olan Sayın KAYA ailesine teşekkür ederim.

Son olarak beni bugünlere getiren, maddi ve manevi desteklerini üzerimden hiç eksik etmeyen, yaptığım her işi sonuna kadar destekleyen, yol gösteren ve işimi en doğru şekilde yapmam için iş ahlakını en doğru şekilde bana öğreten anneme, babama, ablama ve erkek kardeşime teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 GENEL BİLGİLER	7
2.1 IŞIĞIN DOĞASI	7
2.1.1 Düzlem Dalga	10
2.1.2 Küresel Dalga.....	10
2.2 GİRİŞİM (INTERFERENCE).....	11
2.3 İNTERFEROMETRİ.....	12
2.3.1 Fizeau İnterferometrisi.....	13
2.3.2 Michelson İnterferometrisi.....	14
2.3.3 Mach-Zehnder İnterferometrisi.....	15
2.4 KIRINIM (DIFFRACTION)	16
2.5 HOLOGRAFİ	18
2.5.1 Hologram Kayıt	19
2.5.2 Hologramı Yeniden Yapılandırılma	24
2.5.2.1 Fourier Dönüşüm Metodu (FDM).....	25
2.5.2.2 Fresnel-Dönüşüm Metodu (F-DM)	27
2.5.2.3 Bir Boyutlu-Sürekli Dalgacık Dönüşüm Metodu (1B-SDDM)	29

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 3 OPTİK SES KAYDEDİCİ SİSTEMİN YAPISI VE ZAMANSAL FAZ DAĞILIMIN ÇIKARTILMA AŞAMALARI	33
3.1 OPTİK SES KAYDEDİCİ	33
3.2 ZAMANSAL FAZ PROFİLİ VE FREKANS SPEKTRUMUNUN ÇIKARTILMASI	37
BÖLÜM 4 SES DALGALARININ KAYDI, YENİDEN YAPILANDIRILMASI VE FREKANS SPEKTRUMLARININ ÇIKARTILMASI	41
4.1 FONKSİYON JENERATÖRÜ İLE ÜRETİLMİŞ 500 Hz SİNÜS DALGASI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	41
4.2 FONKSİYON JENERATÖRÜ İLE ÜRETİLMİŞ 1 KHz SİNÜS DALGASI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	44
4.3 FONKSİYON JENERATÖRÜ İLE ÜRETİLMİŞ 500 Hz-1 KHz ARASINDA DEĞİŞEN FREKANS DEĞERİNDEKİ SİNÜS DALGASI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	46
4.4 MP3'E KAYDEDİLMİŞ “a_e_i” SESİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	49
4.5 MP3'E KAYDEDİLMİŞ “Okula Gidiyorum” CÜMLESİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	51
4.6 MP3'E KAYDEDİLMİŞ “Bülent Ecevit University” CÜMLESİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	53
4.7 MÜZİK PARÇASI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	55
4.8 ULTRASONİK SES DALGALARI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	57
BÖLÜM 5 YENİDEN YAPILANDIRMA (RECONSTRUCTION) METOTLARININ GÜRÜLTÜ BASTIRMA KABİLİYETLERİNİN ARAŞTIRILMASI.....	63
BÖLÜM 6 OPTİK SES KAYDEDİCİ İLE MALZEMELERDE ÇEŞİTLİ SEBEPLERLE MEYDANA GELEN ÇATLAKLARIN TESPİTİ	75
6.1 FREKANS SPEKTRUMU KULLANILARAK MALZEMELERDEKİ ÇATLAKLARIN TESPİTİ.....	76

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

6.2 SES DALGASININ ŞİDDETİ İLE MALZEMELERDEKİ ÇATLAKLARIN TESPİTİ 81

BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE TARTIŞMA 99

KAYNAKLAR..... 103

ÖZGEÇMİŞ 117





ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Fizeau interferometrisi şematik gösterimi	13
Şekil 2.2 Michelson interferometrisi şematik gösterimi	14
Şekil 2.3 Mach-Zehnder interferometrisi şematik gösterimi	15
Şekil 2.4 Kırınım geometrisi.....	17
Şekil 2.5 Dalga cephesi bölünmesi ile kurulan temel hologram düzeneği	20
Şekil 2.6 Genlik bölünmesi ile kurulan temel hologram düzeneği	20
Şekil 2.7 Off-axis sayısal hologram düzeneği	22
Şekil 2.8 Sayısal merceksiz Fourier hologram kayıt düzeneğinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.9 FDM ile faz bilgisi eldesi için kullanılan programa ait akış diyagramı	27
Şekil 2.10 1B-SDDM ile faz bilgisi eldesi için kullanılan programa ait akış diyagramı	31
Şekil 3.1 Off-axis sayısal holografiye dayalı optik ses kaydedicinin şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.2 Optik ses kaydedici sistemin donanımsal gösterimi.....	34
Şekil 3.3 CR600x2 CMOS kamera parametrelerinin gösterimi.	37
Şekil 3.4 Zamansal faz profili (ses dalgası) ve bu dalgaya ait frekans spektrumunun eldesi. 38	
Şekil 4.1 500 Hz sinüs dalgasına ait deneysel sistem ile kaydedilen 600. hologram deseni ..	42
Şekil 4.2 500 Hz sinüs dalgası için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (2, 116) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).....	43
Şekil 4.3 500 Hz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu	43
Şekil 4.4 1 KHz sinüs dalgasına ait deneysel sistem ile kaydedilen 600. hologram deseni. ..	44
Şekil 4.5 1 KHz sinüs dalgası için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (10, 106) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).....	45
Şekil 4.6 1 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.	45
Şekil 4.7 Frekans değeri 500 Hz-1 KHz arasında değişen sinüs dalgasına ait deneysel sistem ile kaydedilen 600. hologram deseni.	47

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.8 Frekans değeri 500 Hz-1 KHz arasında değişen sinüs dalgası için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (9, 129) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).	47
Şekil 4.9 Frekans değeri 500 Hz ile 1 KHz arasında değişen sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.	48
Şekil 4.10 “a, e, i” sesi için deneysel sistem ile kaydedilen 300. hologram deseni.	49
Şekil 4.11 “a_e_i” sesi için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 300. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (11,83) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).....	50
Şekil 4.12 “a, e,i” sesi için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.....	50
Şekil 4.13 “Okula gidiyorum” cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen 3000. hologram deseni.	51
Şekil 4.14 “Okula gidiyorum” cümlesi için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 3000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (12,110) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).....	52
Şekil 4.15 “Okula gidiyorum” cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.	52
Şekil 4.16 “Bülent Ecevit University” cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen örnek 3000. hologram deseni.	53
Şekil 4.17 “Bülent Ecevit University” cümlesi için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 3000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (6,71) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).	54
Şekil 4.18 “Bülent Ecevit University” cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.....	54
Şekil 4.19 “The best of Piano” parçası için deneysel sistem ile kaydedilen örnek 9810. hologram deseni.	55
Şekil 4.20 “The best of Piano” parçası için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 9810. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (4,126) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).....	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.21 “The best of Piano” müzik parçası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu	56
Şekil 4.22 21 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 10000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı.	58
Şekil 4.23 21 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.	58
Şekil 4.24 25 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 20000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı.	59
Şekil 4.25 25 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.	59
Şekil 4.26 35 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 30000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı.	60
Şekil 4.27 35 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.	61
Şekil 4.28 39 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 35000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı.	62
Şekil 4.29 39 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.	62
Şekil 5.1 Deneysel sistemde kaydedilmiş insan sesine (“a,e,i”) ait sonuçlar a) Deneysel sistem ile kaydı yapılan ses dalgası b) bu ses dalgasına ait spektrogram.	64
Şekil 5.2 Simulasyon çalışması için kullanılan insan sesine (“a,e,i”) ait sonuçlar a) Simulasyon çalışmasında kullanılan ses dalgası b) bu ses dalgasına ait spektrogram.	65
Şekil 5.3 Deneysel sistemde kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Deneysel sistemde kaydedilen örnek 3000. hologram deseni b) Deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan FDM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.	66
Şekil 5.4 Simulasyon çalışması için kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Simulasyon ile üretilen örnek 3000. hologram deseni b) Simülasyon ile üretilen 3000. hologramdan FDM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.	66
Şekil 5.5 “a_e_i” ses dalgasının kaydı yapılan hologramlarından FDM ile geri elde edilen zamansal faz profilleri (ses dalgası) ve bu ses dalgalarına ait çıkartılan spektrogramlar a) Deneysel sistemde kaydedilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram b) Simulasyon ile üretilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram.	67
Şekil 5.6 Deneysel çalışmada kullanılan ses dalgası ve sayısal holografik kaydı yapılan ses hologramlarından FDM ile geri elde edilen zamansal faz dağılımının (ses dalgası) karşılaştırılması.	68

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.7 Deneysel sistemde kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Deneysel sistemde kaydedilen örnek 3000. hologram deseni b) Deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan F-DM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.....	69
Şekil 5.8 Simulasyon çalışması için kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Simulasyon ile üretilen örnek 3000. hologram deseni b) Simülasyon ile üretilen 3000. hologramdan F-DM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.	69
Şekil 5.9 “a_e_i” ses dalgasının kaydı yapılan hologramlarından F-DM ile geri elde edilen zamansal faz profilleri (ses dalgası) ve bu ses dalgalarına ait çıkartılan spektrogramlar a) Deneysel sistemde kaydedilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram b) Simulasyon ile üretilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram.	70
Şekil 5.10 Deneysel çalışmada kullanılan ses dalgası ve sayısal holografik kaydı yapılan ses hologramlarından F-DM ile geri elde edilen zamansal faz dağılımının (ses dalgası) karşılaştırılması.	71
Şekil 5.11 Deneysel sistemde kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Deneysel sistemde kaydedilen örnek 3000. hologram deseni b) Deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan 1B-SDDM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.	72
Şekil 5.12 Simulasyon çalışması için kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Simulasyon ile üretilen örnek 3000. hologram deseni b) Simülasyon ile üretilen 3000. hologramdan 1B-SDDM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.....	72
Şekil 5.13 “a_e_i” ses dalgasının kaydı yapılan hologramlarından 1B-SDDM ile geri elde edilen zamansal faz profilleri (ses dalgası) ve bu ses dalgalarına ait çıkartılan spektrogramlar a) Deneysel sistemde kaydedilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram b) Simulasyon ile üretilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram.	73
Şekil 5.14 Deneysel çalışmada kullanılan ses dalgası ve sayısal holografik kaydı yapılan ses hologramlarından 1B-SDDM ile geri elde edilen zamansal faz dağılımının (ses dalgası) karşılaştırılması.	74
Şekil 6.1 Optik ses kaydediciye dayalı çatlak dedektörü şeması.	76
Şekil 6.2 Cam malzemeler a) Sağlam cam b) Çekiç darbesiyle çatlatılmış cam.	77
Şekil 6.3 500 Hz sinüs dalgası kullanılarak sağlam cam için deneysel sistemden elde edilen sonuçlar a) kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili b) kaydedilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu.	78
Şekil 6.4 500 Hz sinüs dalgası kullanılarak çatlak cam için deneysel sistemden elde edilen sonuçlar a) kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili b) kaydedilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu.	79

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.5 1 KHz sinüs dalgası kullanılarak sağlam cam için deneysel sistemden elde edilen sonuçlar a) kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili b) kaydedilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu.	80
Şekil 6.6 1 KHz sinüs dalgası kullanılarak çatlak cam için deneysel sistemden elde edilen sonuçlar a) kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili b) kaydedilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu.	81
Şekil 6.7 Çatlak dedeksiyonu için kullanılan akış diyagramı.	82
Şekil 6.8 1 KHz sinüs dalgası kullanılarak deneysel sistemde kaydedilen hologram desenleri a) ses dalgasının sağlam camdan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni b) ses dalgasının çatlak camdan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni.	84
Şekil 6.9 Cam malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin olduğu durumlar) a) sağlam cam malzemesi için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak cam malzemesi için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.	85
Şekil 6.10 Cam malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin giderildiği durumlar) a) sağlam cam malzemesi için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak cam malzemesi için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.	87
Şekil 6.11 Tahta malzemeler a) Sağlam tahta b) Çatlatılmış tahta.	88
Şekil 6.12 1 KHz sinüs dalgası kullanılarak deneysel sistemde kaydedilen hologram desenleri a) ses dalgasının sağlam tahtadan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni b) ses dalgasının çatlak tahtadan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni.	88
Şekil 6.13 Tahta malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin olduğu durumlar) a) sağlam tahta malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak tahta malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.	89

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.14 Tahta malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin giderildiği durumlar) a) sağlam tahta malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak tahta malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.	90
Şekil 6.15 Metal malzemeler a) Sağlam metal b) Çatlatılmış metal.	91
Şekil 6.16 Multiflux ift 1400 g AC/DC Ultraviyole çatlak kontrol cihazı ile çekilmiş fotoğraf.	92
Şekil 6.17 Optik mikroskop ile taranan çatlak metal malzeme a) x100 büyütme oranı ile yapılan tarama sonucu elde edilen görüntü b) x400 büyütme oranı ile yapılan tarama sonucu elde edilen görüntü c) x500 büyütme oranı ile yapılan tarama sonucu elde edilen görüntü.	93
Şekil 6.18 Çatlak metal yüzey üzerindeki çatlağın SEM ile taranarak çıkartılmış görüntüsü.	94
Şekil 6.19 2 KHz sinüs dalgası kullanılarak deneysel sistemde kaydedilen hologram desenleri a) ses dalgasının sağlam metalden geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni b) ses dalgasının çatlak metalden geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni.	94
Şekil 6.20 Metal malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin olduğu durumlar) a) sağlam metal malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak metal malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.	95
Şekil 6.21 Metal malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin giderildiği durumlar) a) sağlam metal malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak metal malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.	96

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

E_0	: Cisim dalgasının genliği
λ	: Dalga boyu
E	: Elektrik alanı
\vec{E}	: Elektrik alan vektörü
\vec{H}	: Manyetik alan vektörü
c	: Boşluktaki ışık hızı
∇^2	: Laplas operatörü
k	: Dalga sayısı $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$
φ, ψ, ϕ	: Faz sabitleri
(ξ, η)	: Görüntü düzleminin koordinatları
(x, y)	: Hologram düzleminin koordinatları
I	: Işıma şiddeti, yoğunluk
\Re	: Karmaşık sayının gerçel kısmı
\Im	: Karmaşık sayının sanal kısmı
A_{REF}	: Referans dalgasının genliği
A_{OB}	: Obje dalgasının genliği
A_{REF}	: Referans dalgasının genliği
Ω	: Ayrık zaman frekansı
ω	: Açısal frekansı ($\omega = 2\pi f$), sürekli zaman frekansı
f	: Frekans
f_{\max}	: Maksimum frekans
\mathfrak{F}	: Fourier dönüşüm ifadesi
N	: Saniyede alınan örnek sayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

k	: Ayrık frekans indeksi
n	: Havanın kırınım indeksi
P_0	: Atmosferik basınç
P	: Ses dalgası basıncı
s	: Ölçeklendirme parametresi
b	: Dönüşüm parametresi
μm	: mikrometre

KISALTMALAR

1B-SDDM	: 1 Boyutlu Sürekli Dalgacık Dönüşüm Metodu
3B	: 3 Boyutlu
CCD	: Charge- Coupled Device
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
FDM	: Fourier Dönüşüm Metodu
F-DM	: Fresnel-Dönüşüm Metodu
FKSHT	: Faz Kaydırma Sayısal Holografi Tekniği
fps	: Saniye Alınan Görüntü Sayısı (Frame Per Second)
He-Ne	: Helyum-Neon
Hz	: Hertz
IFFT	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform)
İGO	: İşaret gürültü oranı
KHz	: Kilo Hertz
MP3	: MPEG-1 Audio Layer 3
ms	: milisaniye
mW	: miliWatt
NDT	: Tahribatsız ölçüm testi (Non-Destructive Testing)
nm	: nanometre
rad	: radyan
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SNR	: Signal-to-Noise Ratio

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bu tezin amacı, sayısal holografiye dayanan optik ses kaydedici ile ilgili literatürde şimdiye kadar yapılmamış bazı çalışmalarını gerçekleştirmektir. Üzerinde çalışmalar yapılan optik ses kaydedicinin temeli olan holografi, dalgaların girişimine dayandırılmaktadır. Holografik sistemlerden elde edilen işaretler hologram olarak adlandırılmaktadır. Hologramlar sadece cismin görüntüsünü yani genliğini değil fazını da içermektedir [1-3]. Denis Gabor tarafından 1946 yılında ilk defa holografi uygulaması yapılmıştır. Ancak bu uygulamada sanal ve gerçek görüntü üst üste binmiş halde bulunmuştur [4-5]. Bu görüntüleri birbirinden ayırmak için Leith ve Upatnieks eksen dışı (off-axis) holografik sistemi geliştirmiştir [6]. Daha sonra Goodman ve arkadaşı, hologram ile kayıt edilen bilginin sayısal olarak yeniden elde edilmesi için çalışmalar yapmıştır [7,8]. Schnars ve Jüptner'in yüksek çözünürlüğe sahip görüntü sensörü kullanarak üç boyutlu (3B) cisimlerin görüntüsünü sayısal olarak kaydetmesi ve bilgisayar ortamında sayısal olarak görüntüyü geri elde etmesi ile sayısal holografi gelişmeye başlamıştır [9,10]. Holografik sistemlerde kaydı yapılan cismin görüntüsünün faz bilgisi çıkartılabilmektedir [10,11].

Sayısal holografinin gelişmesi ile 90'lı yıllardan günümüze kadar bu tekniğe olan ilgi artmış ve bu teknik birçok alana uygulanmıştır. Örneğin bilgi şifreleme ve veri saklama [10-13], görüntüleme teknolojisi, mikroskopi ve metroloji [14-17], kırılma indeks ölçümü [18], titreşim ölçümü [19,20], lazer üretimi, optik algılama, ses alanı görüntüleme, parçacıkların hız dağılımlarını görselleştirme [21-28] vb. gibi. Ayrıca bu teknik, sayısal faz kaydırma holografi tekniğinin gelişimine de ön ayak olmuştur [29,30].

Bu tezin ilk kısmında optik ses kaydedici ile elde edilen hologramlardan kayıt edilen sesin görselleştirilmesi ve dinlenilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Aslında ses dalgalarının görselleştirilmesi Schlieren fotografisi, klasik interferometri, holografik interferometri, optik mikrofon vb. gibi birçok teknikle mümkün olmuştur [31-49]. Örneğin insan kulağının duyabileceği (20 Hz-20 KHz) aralıktaki ses dalgalarına ait alanlar ilk defa 1977'de speckle

(pattern) interferometrisi ile görüntülenmiştir [50]. Daha sonra Lokberg 1994 yılında TV holografisi ile havada titreşen nesnelerin yaydığı ses dalga alanlarını görselleştirmeyi başarmıştır. Fakat bu çalışmalarda kullanılan ses dalgaları küçük genlikli titreşimler olduğu için çok zaman harcanmasına neden olmuştur. Ayrıca bu durum uygulamanın gerçekleştirilmesini de zorlaştırmıştır [44]. Ses dalgalarının görüntülenmesini sağlayan diğer bir yöntemde (faz kaydırma tekniği) ses dalgası sadece uzamsal domende incelenmiş ancak zaman domenindeki değişim çıkartılamamıştır [38]. Oysa bu teknik ile de zamansal faz dağılımı çıkartılabilmektedir. Fakat bu teknikte her defasında referans ışık dalgasının fazını değiştirmek gerekmiştir. Bu işlem yükünü arttırmaktadır ve zaman kaybına sebebiyet vermektedir [46]. Diğer taraftan optik mikrofonların kullanımı ile titreşimler foto-dedektördeki ışık yoğunluğundaki değişiklikler ile doğrudan ölçülmüştür [40]. Bu nedenle optik mikrofon, lazer mikrofon ve benzeri uygulamalarda ses dalgasının da görselleştirilmesi için kullanılmıştır [51-54]. Mikrofon düzenekleri kullanılarak yapılan tüm bu çalışmalarda yansımalara engel olunamadığından gürültü problemi çözülememiştir.

Ses dalgalarının hareketini görüntülemek için yapılan diğer bir çalışma da Schlieren fotografisidir [45]. Bu yöntemde ölçülen seste yüksek oranda gürültü bulunduğu için kayıt edilen ses alanları yeniden elde edilememiştir [45,49]. Korpel ve arkadaşları Schlieren fotografisi ile ses alanlarını görselleştirmesine rağmen, ses dalgalarının yarattığı faz modülasyonunu bu yöntemle ölçmek mümkün olmamıştır. Yani ses dalgalarına karşı düşen zamansal faz dağılımları belirlenememiştir [33]. Bu faz dağılımını ölçmek için Heterodyne tekniği kullanılmıştır. Ancak bu yöntem ile de ses dalgalarının üç boyutlu görüntüsü elde edilememiştir.

Ses dalgalarına karşı düşen zamansal faz dağılımlarını elde etmek ancak yüksek hızlı kameraların keşfi ile mümkün olmuştur. Bu kameralar saniyede birçok görüntü alma özelliğine sahiptir. Böylece ses dalgalarının yarattığı basınç değişimine karşı düşen kırılma indeksi değişimini veren zamansal faz dağılımı elde edilebilmiştir. Bu kameralar ayrıca görüntüleme holografisinin gelişimine de yol açmıştır [55,56]. Hareketli nesnelerin hologramlarının elde edilmesi ve üç boyutlu görüntülerinin elde edilmesi söz konusu olmuştur. Sayısal holografiye dayalı optik ses kaydedici sistemi ilk olarak Matoba ve arkadaşları gerçekleştirmiştir [31,57]. Ses hologramlarının kaydı için yüksek hızlı bir CMOS kamera kullanmışlardır. Optik ses kaydedicinin temelinde hologramları oluşturan bir Mach-Zehnder interferometrisi kullanılmıştır. Bu interferometri sayesinde kayıt edilen sayısal ses hologramları yeniden inşa

etme metotları ile bilgisayarda işlenerek kayıt işleminde kullanılan sesi tekrar dinlemek mümkün olmuştur. Ayrıca elde edilen ses dalgalarının frekans spektrumları da çıkartılarak, başlangıçta kullanılan ses dalgasına denk olup olmadığı test edilmiştir. Aslında optik kaydediciye verilen ses dalgası ortamın kırılma indeksini değiştirmektedir. Bu ortamla etkileşen ışık dalgası akusto-optik etki ile değişmektedir. Bu etki ile fazı modüle edilen ışık dalgası referans dalga ile örtüşerek ses hologramlarını kamera sisteminde oluşturmaktadır. Bu hologramlar bilgisayar ortamında kayıt edilmektedir. Bu hologramlar yeniden yapılandırma metotları ile işlenerek kaydı yapılan ses tekrar elde edilmektedir. Matoba ve arkadaşlarının çalışmasından yola çıkan Ishikawa ve arkadaşları sesi paralel faz kaydırma interferometrisi (parallel phase shifting interferometry) kullanarak uzamsal domende görüntüleyebilmişlerdir [38]. Son olarak Rajput ve arkadaşları, Matoba ve arkadaşlarının sistemini kullanarak güvenlik amaçlı ses şifreleme sistemi geliştirmişlerdir [58,59].

Literatürde geliştirilmiş olan ve bu tezde üzerinde çalışmalar yapılan optik ses kaydedici ile ses kaydı konusunda çok uygulama yapılmadığı görülmektedir. Özellikle bir cümle ya da bir müzik parçası kaydı literatürde şimdiye kadar hiç yapılmamıştır. Tez için gerçekleştirilen uygulamaların birinci kısmında bu şekilde çalışmalar da sunulmaktadır. Birinci kısımda tüm yeniden yapılandırma işleminde Fourier Dönüşüm metodu kullanılmıştır.

Tezin ikinci kısmında ise kullanılan optik ses kaydedici ile kayıt edilen hologramların yeniden yapılandırma algoritmaları ile işlenmesi ve ses dalgalarında meydana gelen gürültülerin analizi üzerinde durulmuştur. Yeniden yapılandırma işleminde kullanılan metotların sistemdeki gürültüyü nasıl bastırdığı araştırılmıştır [60-66]. Gürültü analizi yapılırken geri elde etme sürecinde Fourier dönüşüm metot (FDM) [67], Fresnel dönüşüm metot (F-DM) [68] ve bir boyutlu sürekli dalgacık dönüşüm (1B-SDDM) [69-74] metotları ile elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ve holografik düzeneğe kaydı yapılan ses dalgaları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak sistemin işaret gürültü oranı (İGO) hesaplanmıştır [75,76].

Çalışmanın üçüncü ve son kısmında kullanılan optik ses kaydedici ile farklı malzemelerde çeşitli sebeplerle meydana gelen çatlakların tespiti yapılmıştır.

Endüstride malzemelerde sıkça meydana gelen kusurların tespiti önemli bir araştırma konusudur. Bu kusurlar gözenek oluşumu, katman ayrılması, çatlak oluşumu vb.olarak verilebilir. İlgili kusurların tespiti için çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır [77-83]. Örneğin,

Mamalis ve arkadaşları hasar görmüş gözenekli yapılı malzemelerdeki mikro kusurların etkisi incelenmiştir [78]. Jiang ve arkadaşları, piezoseramik transdüserler ve dalgacık paketi analizini kullanarak FRP betonarme demiri ile beton yapı arasındaki bağların birbirinden ne kadar ayrıldığını tespit etmiştir [79]. Bahsi geçen kusurlardan çatlak ana sorunlardan birisidir [84-86]. Çatlak tespiti tahribatlı veya tahribatsız olarak iki şekilde yapılabilmektedir [87-89]. Tahribatlı testlerde muayeneler uzman denetimine bağlı olarak yapıldığından, nicel analizlerde doğruluk garantisi verilememektedir. Diğer taraftan sensör tabanlı muayene sistemlerinde yüksek hassasiyeli sonuçlar alınmasına rağmen cihaz maliyeti çok yüksektir. Bu nedenle uzman deneyime dayalı ve pahalı sistemler yerine güvenilir ve hızlı çatlak analizi yapabilen tahribatsız ölçüm sistemleri (non-destructive testing- NDT) geliştirilmiştir. Bu tespit yöntemine, kızılötesi, termal test, ultrasonik test, lazer testi, radyografik test, görüntü işleme vb. gibi örnekler verilebilir [90-104]. Broberg tarafından yapılan termografi yöntemi ile kaynaklarda (lehim) bulunan yüzey çatlak tespiti bahsi geçen çalışmalar arasındadır [92]. Bununla birlikte Keshtgar ve Modarres'in yaptığı akustik emisyonu dayalı çatlak tespiti de bir NDT yöntem olarak karşımıza çıkmıştır [93] Ayrıca Aoyagi ve arkadaşları, ahşap plakaların yüzeyine yakın yerlerde bulunan çatlakları dinamik ısı dağılımı ile tahribatsız olarak tespit etmişlerdir [95]. Diğer taraftan, interferometri, holografi vb. bazı optik sistemler ile de tahribatsız ölçüm yapılabilmektedir [9,15]. Bu teknikler arasında yer alan sayısal holografi tekniği malzemelerdeki deformasyonu ölçmek ve onların özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır [105-115]. Ayrıca bu sistemler çatlak tespit etmek için de kullanılmaktadır [116-119]. Örneğin, yüzey düzgünlüğü ve çatlak tespiti için Maaboud ve arkadaşları sayısal holografiyi kullanmışlardır [116]. Tankam ve Picart ise elektronik bileşenlerdeki çatlak araştırması için sayısal renkli holografi uygulaması gerçekleştirmişlerdir [117]. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda hiç optik ses kaydedici (sayısal holografiye dayalı) ile çatlak tespiti yapılmamıştır. İlk defa bu tezde böyle bir çalışma sunulmaktadır.

Bu çalışmada çatlak tespiti optik ses kaydedici ile iki farklı yolla yapılmıştır. Birinci yöntemde elde edilen (yeniden yapılandırma metotları kullanılarak) ses dalgasının frekansı dikkate alınmıştır. Frekans spektrumuna bakılarak maksimum frekansın kayma miktarına göre çatlak olup olmadığı söylenebilmektedir [120]. İkinci yöntemde ise ses hologramlarının yeniden yapılandırma metotları ile işlenmesi sonucu elde edilen ses dalgasının (zamansal faz dağılımı) genliğinin maksimum olduğu ses şiddeti kullanılmıştır. Ses dalgasının malzemelerden geçerken çatlak bölgesindeki değişimi, çatlağın üç boyutlu (3B) görüntüsünü vermektedir.

Tezin genel olarak sunumu Őu Őekildedir. İlk b6l6m giriş kısımdır. Bu b6l6mde tezin amacı ve ayrıntılı literat6r taraması verilmiştir. B6l6m 2’de tezin ana konusu olan holografinin temelleri sunulmuştur. Ayrıca sesin hologram kaydı, yeniden yapılandırılması, interferometri gibi konular da bu kısımda verilmektedir. 6ç6nc6 b6l6mde kullanılan sistem ve ayrıntıları sunulmuştur. D6rd6nc6 b6l6mde tez 6alıŐmasının birinci kısmında yapılan 6alıŐmaları i6ermektedir. BeŐinci b6l6mde kaydı yapılan ses hologramlarının yeniden yapılandırılması işleminde kullanılan metotlar 6zerinde durulmuştur. Ayrıca bu b6l6mde yeniden yapılandırma ile elde edilen ses dalgalarının 6zerindeki g6r6lt6y6 metotların nasıl bastırabildiği araştırılmıştır. İlk olarak sistemden elde edilen sonu6lar kullanılarak elde edilen işaret g6r6lt6 oranı (İGO) da bu b6l6mde verilmiştir. Altıncı b6l6mde tezin 6ç6nc6 kısmı ile ilgili 6alıŐmalar sunulmuştur. Bu tezde 6zerinde 6alıŐmalar yapılan optik ses kaydedici ilk defa malzemelerde 6eŐitli sebeplerle meydana gelen 6atlakların tespiti i6in kullanılmıştır. Tezin son b6l6m6 yani yedinci b6l6m6nde ise sonu6lar ve tartışma sunulmuştur.



BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

Bu bölümde sistemin temellerini oluşturan optik kısım ile ilgili bilgiler verilecektir. Burada sunulan ses kaydedici, sayısal holografi tekniğine dayanmaktadır. Holografının temeli ise ışığın dalga doğasına ve dalgaların girişimine bağlıdır. Bu nedenle bu kaydedicide basit bir interferometrik sistemden oluşmaktadır. Burada ses kaydedicinin yapısında bulunan optik sistem ile ilgili bilgi verilecektir. Ayrıca sistemde kullanılan ışık ve doğası ile ilgili bilgiler de sunulacaktır.

2.1 IŞIĞIN DOĞASI

16. ve 17. Yüzyıllarda modern bilimin doğmasıyla, ışığın fiziksel doğasını açıklamak için iki teori geliştirilmiştir. Newton'un savunucusu olduğu ilk teori, "parçacık teorisidir". Bu teoride ışık kaynağından yayılan ışık ışınlarının düz çizgiler boyunca hareket ettiği ve parçacıkların akışkan bir davranışa sahip olduğu savunulmuştur. İkinci teorem ise Christian Huygens'in savunduğu "dalga teorisidir". Huygens, ışık ışınlarını bir ışık kaynağından çıktıktan sonra her yöne dağılarak yayılan bir dalga olarak kabul etmiştir [121]. Bu iki teoremin birbirini tamamlayıcı özellikte olması bilim dünyasında dikkat çekmiştir. Işığın maddenin atomik yapısı ile etkileştiği durumlarda foton gibi davrandığı, girişim ve kırınımın olduğu olaylarda ise ışığın dalga doğasından yararlandığı göze çarpmıştır. Bu bağlamda Huygens'in dalga teorisi ile yansıma ve kırınım yasaları ortaya çıkmıştır [122]. Holografının temelinde de girişim ve kırınım olduğu için bu tez çalışmasında ışığın dalga modelini veren dalga teoreminin kullanılması uygun görülmüştür.

J. C. Maxwell, ışığın yayılımını dalga eşitliklerinin kullanıldığı Maxwell denklemleri ile matematiksel olarak ifade etmiştir [123]. Bu dalga denklemi, elektrik ve manyetik alan vektörleri ile oluşmaktadır [10]. (Bkz. Eşitlik 2.1)

$$\nabla^2(\vec{E}, \vec{H}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{E}, \vec{H}) \quad (2.1)$$

Burada \vec{E} elektrik alan vektörünü ifade ederken, \vec{H} manyetik alan vektörü olarak tanımlanmaktadır. Elektrik ve manyetik alanların ilerleme yönüne ve birbirlerine dik olacak şekilde titreşmesi enine dalgalar olarak adlandırılmıştır. Manyetik alan vektörleri genellikle ihmal edildiğinden burada sadece elektrik alan ifadesi verilmiştir. c olarak tanımlanan vakumdaki (boşluktaki) ışık hızı ise $c = 299792458 \text{ m/s}$ olarak verilmektedir. Ayrıca t , zamansal koordinatı göstermektedir. [128].

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

Burada, Laplas operatörü, ∇^2 ile ifade edilmiştir. Eşitlik 2.2’de verilen ifadede Kartezyen koordinatlar sırasıyla (x,y,z) ile tanımlanmıştır.

Dalgalar polarizasyon etkisi ile dikey yönde, yatay yönde veya herhangi bir yönde yayılabilmektedir. Bir elektrik alan vektörünün tek bir doğrultuda ilerlemesi ise kutuplanma olarak açıklanmaktadır. z yönünde yayılan doğrusal kutuplanmış tek renkli (monokromatik) dalganın skaler eşitliği Eşitlik 2.3’te verilmiştir. [10,124].

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (2.3)$$

Harmonik bir dalga ise Eşitlik 2.4 ile ifade edilmiştir [123, 125].

$$E(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \quad (2.4)$$

Bu ifadede dalganın z konumundaki genlik değeri E_0 ile gösterilirken, ω açısal frekans olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca dalga sayısının k ile, dalga boyunun λ ile tanımlandığı bu ifadede, k ve λ arasındaki ilişki $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$ olarak verilmektedir.

$x=0$ noktasında ve $t=0$ anında maksimum genlik değeri yoksa, faz θ olarak verilmektedir. (Bkz. Eşitlik 2.5)

$$E(z, t) = \cos(\omega t - kz + \theta) \quad (2.5)$$

Burada $(-kz + \theta)$ ifadesi dalganın z konumunda sahip olduğu faz bilgisini vermektedir. Euler formülüne göre [126];

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (2.6)$$

olarak verilmektedir. $i = \sqrt{-1}$ sanal (imajiner) birimdir. Ayrıca Eşitlik 2.6 kullanılarak;

$$\cos \theta = \frac{1}{2} (e^{i\theta} + e^{-i\theta}) \quad (2.7)$$

yazılabilmektedir.

Eşitlik 2.7'de verilen ifade Eşitlik 2.5'te yerine yazıldığında, harmonik dalga Eşitlik 2.8'de gösterildiği gibi yeniden formülize edilebilmektedir.

$$E(z, t) = \frac{1}{2} E_0 e^{i(\omega t - kz + \theta)} + \frac{1}{2} E_0 e^{-i(\omega t - kz + \theta)} \quad (2.8)$$

$\frac{1}{2} E_0 e^{-i(\omega t - kz + \theta)}$ ifadesi $\frac{1}{2} E_0 e^{i(\omega t - kz + \theta)}$ ifadesinin eşleniğidir ve ihmal edilmesinde hiçbir sakınca yoktur. Böylece harmonik dalga en sade haliyle Eşitlik 2.9'daki gibi verilebilmektedir.

$$E(z, t) = \frac{1}{2} E_0 e^{i(\omega t - kz + \theta)} \quad (2.9)$$

Bir dalganın sahip olduğu aynı faz derecesindeki parçacıkların yayıldığı ortamda oluşturdukları yüzey, dalga cephesi olarak verilmektedir ve iki şekilde tanımlanmaktadır. İlk dalga cephesi düzlem dalga olarak, ikinci dalga cephesi ise küresel dalga olarak ifade edilmektedir [11].

2.1.1 Düzlem Dalga

Bir t zamanında, dalganın yayılım yönüne dik doğrultuda yayılan tüm yüzeylerde sabit faz varsa, bu dalga düzlem dalga olarak adlandırılmaktadır. $t=0$ ve $k.r$ =sabit olduğu durumlarda dalganın uzaysal dağılımını tanımlamak mümkündür. Üç boyutlu uzayda düzlem dalga vektörü $k = k_x, k_y, k_z$ olarak verilmektedir. Ayrıca uzaysal vektör $r = (x, y, z)$ olarak tanımlanmaktadır. Düzlem dalganın $t=0$ anı için tanımlanan ifadesi eşitlik 2.10 ile verilmektedir [11].

$$E(r) = E_0 e^{i(kr+\theta)} \quad (2.10)$$

2.1.2 Küresel Dalga

Dalga cephesi olarak tanımlanan diğer bir dalga da küresel dalgadır. Bu dalgada yüzeyin her noktasında fazın sabit olduğu düşünülmektedir [127]. Adından da anlaşıldığı gibi dalga cephesindeki her bir nokta küresel olarak yayılmaktadır. Küresel dalga polar koordinatlarda matematiksel olarak (r, θ, ψ) ile ifade edilmektedir [123]. Bu koordinatlar Eşitlik 2.11-2.13 ile daha açık şekilde ifade edilebilmektedir.

$$x = r \sin \theta \cos \psi \quad (2.11)$$

$$y = r \sin \theta \sin \psi \quad (2.12)$$

$$z = r \cos \theta \quad (2.13)$$

Küresel dalganın skaler dalga ifadesi ise Eşitlik 2.14 ile verilmektedir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rE) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.14 kullanılarak küresel dalga, Eşitlik 2.15 ile yeniden yazılabilmektedir.

$$E(r, t) = \frac{E_0}{r} e^{i(\omega t - kr + \phi)} \quad (2.15)$$

Düzlem dalga ve küresel dalga denklemleri birlikte incelendiğinde iki dalga cephesi arasında $\frac{1}{r}$ değeri kadar bir fark olduğu göze çarpmaktadır. Küresel dalgada genlik değeri $\frac{E_0}{r}$, $\frac{1}{r}$ ile orantılı olarak azalmaktadır.

2.2 GİRİŞİM (INTERFERENCE)

Elektrik ve manyetik alan vektörleri ışık dalgasını oluşturmaktadır. Bu vektörlerin sahip olduğu toplanabilme özelliği ile iki ışık dalgası girişim yapmaktadır [122]. İki ışık dalgasının süperpozisyonu olarak adlandırılan bu olay, Eşitlik 2.16 ile ifade edilebilmektedir.

$$I = |A_{OB}|^2 + |A_{REF}|^2 + 2|A_{OB}||A_{REF}|\cos(\Delta\theta) \quad (2.16)$$

Eşitlik 2.10'da verilen E_0 genlik değeri bundan sonraki eşitliklerde A_{OB} olarak tanımlanacaktır. Bu doğrultuda Eşitlik 2.16'daki girişim ifadesinde verilen A_{OB} ve A_{REF} dalgalarının, monokromatik bir dalga olduğu ve aynı zamanda eşit frekans ve dalga boyuna sahip olduğu düşünülmüştür. Aynı polarizyon yönüne sahip bu dalgalar skaler olarak Eşitlik 2.17 ve Eşitlik 2.18'de sırasıyla verilmiştir.

$$A_{OB}(x, y, z) = A_{OB1} \exp(i\theta_1) \quad (2.17)$$

$$A_{REF}(x, y, z) = A_{REF1} \exp(i\theta_2) \quad (2.18)$$

Eşitlik 2.17 ve 2.18 kullanılarak Eşitlik 2.16'da verilen ifade daha geniş olarak yazılabilmektedir (Bkz. Eşitlik 2.19).

$$\begin{aligned} I &= |A_{OB} + A_{REF}|^2 = (A_{OB} + A_{REF})(A_{OB} + A_{REF})^* \\ &= A_{OB1}^2 + A_{REF1}^2 + 2A_{OB1}A_{REF1} \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\Delta\theta \end{aligned} \quad (2.19)$$

Burada $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 'dir. Ayrıca $2\sqrt{I_1 I_2} \cos\theta$ ifadesi iki dalga arasındaki faz farkına bağlı olarak değişmektedir [10, 127,129].

Girişim deseni oluşturmak için ışık kaynaklarının aynı fazda olması gerekmez. Önemli olan ışık kaynakları arasında bir başlangıç faz farkının olmasıdır. Faz uyumlu kaynaklarda, kaynaklar arasındaki faz farkı sabittir. Farklı kaynaklardan elde edilen dalgalar sabit faz ilişkisine sahip olduğunda ahenkli (coherent) dalgalar olarak adlandırılmaktadır. Sabit faz ilişkisi olmayan farklı kaynaklı dalgalar tarafından aydınlatılan bir yüzeyde ise girişim deseni elde etmek mümkün olmamaktadır [125].

İki veya daha fazla eş fazlı ışık kaynağının üst üste gelerek oluşturdukları girişim desenini ölçmek için kullanılan ölçü aleti interferometri (girişimölçer) olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan optik ses kaydedici de interferometrik bir sistem olduğundan, bu sistemin temelini anlamak için bundan sonraki bölümde interferometri ve interferometri çeşitleri hakkında kısa bilgi verilecektir.

2.3 İNTERFEROMETRİ

İnterferometri temel olarak ortamda var olan ışığın yayılma olayını açıklamaya ve sahip olduğu dalga boyunu ölçmeye olanak sağlamaktadır. Albert A. Michelson tarafından 1880 yılında icat edilen interferometri, günümüzde astronomi, spektroskopi, refraktif indekslerin ölçümü gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [128].

Optik interferometri, bir kaynak tarafından yaratılan fakat iki veya daha fazla farklı kollarda ilerleyen ışığın dalga cephelerini ayırıp, bu ayrılan dalga cephelerini tekrar birleştirerek girişim deseni oluşturmak için kullanılmaktadır. Dalga cepheleri, aralarındaki yol farkına bağlı olarak yapıcı veya yıkıcı olacak şekilde birbirleri üzerine eklenmektedirler. Oluşan girişim deseninde bir aydınlık bir karanlık olmak üzere bantlar görünmektedir. İnterferometrinin bir kolundaki yol uzunluğu bir dalga boyunun bir kısmı ile değiştirilse bile, saçaklar hareket ediyormuş gibi görünmektedir [129].

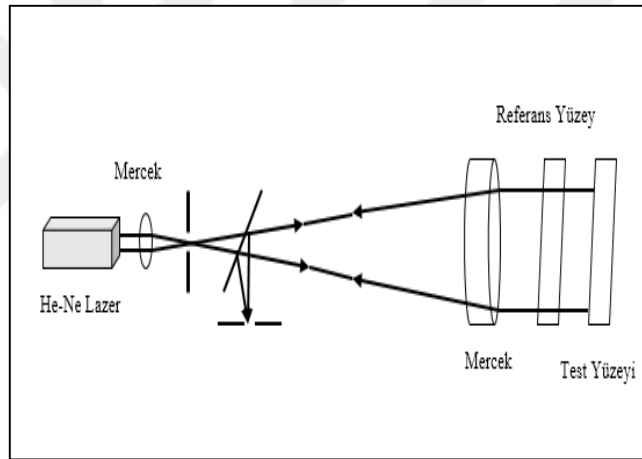
İnterferometri, iki ışınlı veya çok ışınlı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar da ışınları elde etmek için kullanılan yöntemlere göre gruplandırılmaktadırlar [1]. En yaygın kullanılan ışın ayırıcı biçimi, şeffaf bir kaplama yüzeyi üzerinde kısmen yansıtıcı bir metal veya dielektrik filmidir. Kullanılabilecek diğer cihazlar, prizmalar ve kırınım ızgaralarıdır. İki ışınlı interferometrenin bilinen en iyi türleri Fizeau, Michelson, Mach- Zehnder interferometreleridir [130,131]. En iyi bilinen çoklu ışın interferometresi ise Fabry-Perot interferometresidir. Bu tez

çalışmasında iki ışınlı interferometri kullanıldığından, bu bölümde Fizeau, Michelson ve Mach-Zehnder interferometrileri açıklanmıştır.

2.3.1 Fizeau İnterferometrisi

Fizeau interferometrisinde eşit aralığa sahip girişim (ızgara) deseni, hava ortamı ile ayrılan paralelleştirilmiş ışınla aydınlatılan iki düz yüzey arasında oluşturulmaktadır. Bu interferometride yüzeylerden bir tanesi referans düz yüzey olarak alınırken, diğeri test yüzeyi olarak seçilmektedir. Kırınım deseni bu test yüzeyde oluşan değişimin eş yükselti haritası olarak adlandırılmaktadır [1,130].

Fizeau interferometrisine ait şematik diyagram Şekil 2.1’de gösterilmiştir [1,130].



Şekil 2.1 Fizeau interferometrisi şematik gösterimi [1,130].

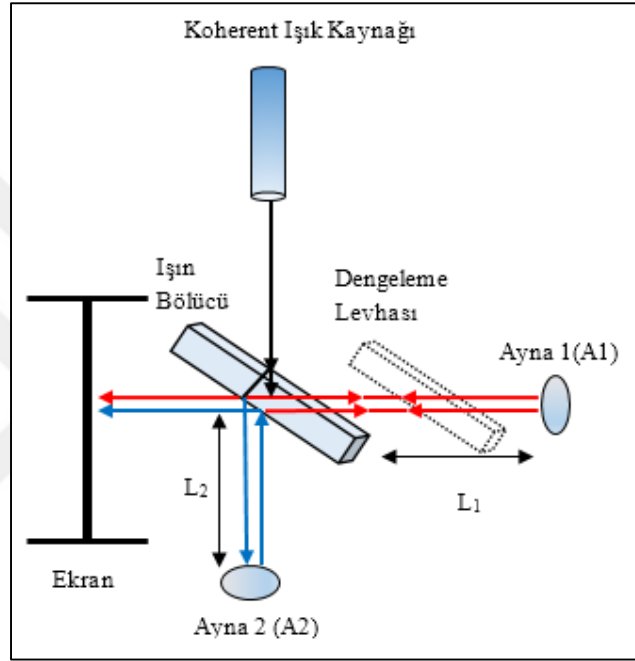
Yansıyan ışının, p , kırınım indeksi fonksiyonu, n , ile arasındaki ilişki eşitlik 2.20’de verilmiştir.

$$p = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 ; \Delta m = 2n_{hava}t(x) \approx 2t(x); n_{hava} \approx 1.0 \quad (2.20)$$

Burada n_1 ve n_2 sırasıyla test ve referans yüzeyin kırınım indeksini vermektedir. Ayrıca optik yol farkı Δm olarak ifade edilmiştir. $t(x)$ ise iki yüzey arasındaki mesafedir. Referans ışın, iki yüzey arasındaki mesafeyi iki kez katettiğinden, Δm ifadesinde 2 çarpanı bulunmaktadır.

2.3.2 Michelson İnterferometrisi

Michelson interferometrisi bir girişimölçer cihazı olup, istenilen mesafeleri dalgaboyu cinsinden ölçmek için kullanılmaktadır. Ayrıca bu cihaz ile ışığın girişim özelliğinden yararlanılarak küçük mesafelerin, yüzey düzgünlüklerinin ve malzemelerinin kırılma indekslerinin ölçülebilmesi mümkündür [131]. Şekil 2.2’de en yaygın bilinen Michelson interferometrisinin şematik gösterimi verilmiştir [1,130,131].



Şekil 2.2 Michelson interferometrisi şematik gösterimi [1,130,131].

Burada eş fazlı bir ışık kaynağından çıkan ışın kısmen yansıtıcı bir yüzeye sahip ışın bölücü yardımıyla iki dik kola ayrılmaktadır. Işığın yaklaşık % 50'si yüzeyden yansıtılmaktadır ve % 50'si de iletilmektedir. Birinci kolda yansıtılan ışın ilerlemektedir ve A1 aynasına çarpıp ışın bölücüye geri gelmektedir. İkinci kolda ise iletilen ışın ilerlemektedir. A2 aynasına çarpan bu ışın tekrar ışın bölücüye geri gelmektedir. İki koldan dönen ışınların sahip oldukları faza bağlı olarak ekranda aydınlık ve parlak girişim saçakları oluşmaktadır. Işık dalgalarının aldıkları optiksel yol aynı olduğu durumda yapıcı bir girişim oluşmaktadır. Birinci kolda bulunan aynanın önüne ışın bölücü ile aynı kalınlığa sahip bir dengeleme levhası yerleştirildiğinde, ışının alacağı yol mesafesi değişeceğinden bir optik yol farkı meydana gelmektedir. Bu fark ile cismin sahip olduğu kalınlık kolaylıkla çıkartılmaktadır. Eşitlik 2.19’da verilen girişim ifadesindeki faz değerinin değişimi, iki ışın arasındaki toplam faz kayması ile verilmektedir. (Bkz. Eşitlik 2.21).

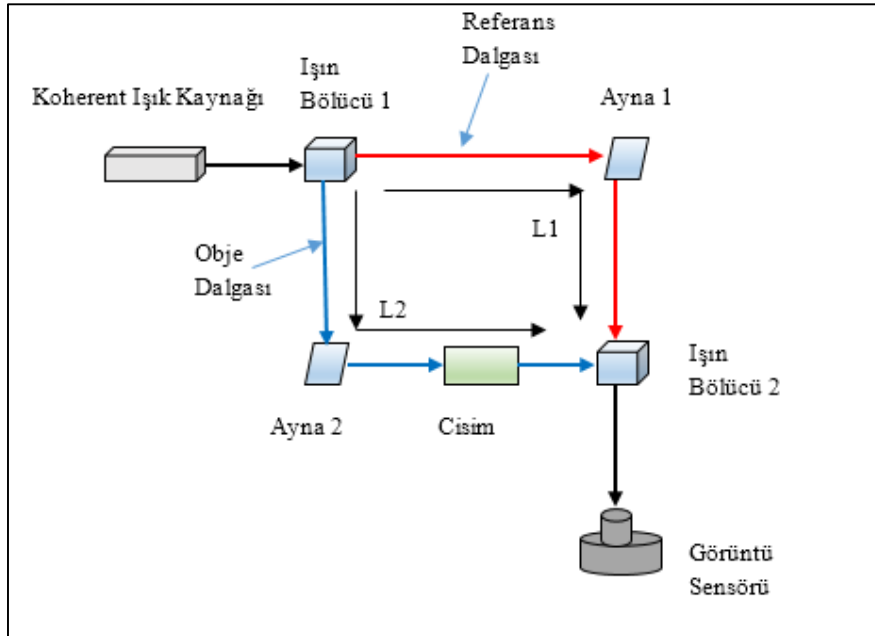
$$\theta = \theta' + 2k(L_1 - L_2) \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21’de verilen ifadede k dalga sayısı olarak verilirken, λ ışığın sahip olduğu dalga boyudur. k ve λ arasındaki ilişki ise $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ olarak verilmektedir. $\theta = m2\pi$ ($m = 0,1,2,\dots$) olduğu durumlarda yapıcı girişim oluşmaktadır. L_2 mesafesi sabit tutulurken, L_1 mesafesi dengeleme levhasının açılma konumuna göre değişmektedir. Ayrıca bu iki kol arasındaki fark Δm olarak ifade edilmektedir ve eşitlik 2.22’de verilmektedir.

$$\Delta m \frac{\lambda}{2} = |L_1 - L_2| \quad (2.22)$$

2.3.3 Mach-Zehnder İnterferometrisi

Mach-Zehnder interferometrisinde ışın kaynağından çıkan ışını iki kola bölmek ve yeniden birleştirmek için iki ışın bölücü ve 2 ayna kullanılmaktadır. Bu interferometrinin şematik gösterimi Şekil 2.3’te sunulmuştur [1,130].



Şekil 2.3 Mach-Zehnder interferometrisi şematik gösterimi [1,130].

Mach-Zehnder interferometrisi, tek bir kaynaktan gelen ışığın iki kola ayrılmasıyla, bu kollarda oluşan optik yol farkını (faz kayması değişimlerini) belirlemek için kullanılan bir cihazdır.

Kollardan bir tanesinde meydana gelen yol farkı faz kaymasına neden olmaktadır. Referans ve obje kollarının sahip oldukları yol uzunlukları sırasıyla Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.24 ile verilmiştir.

$$L_1 = n_1 d_1 \quad (2.23)$$

$$L_2 = n_2 d_2 \quad (2.24)$$

Burada n_1 ve n_2 sırasıyla havanın ve malzemenin kırılma indeksini vermektedir. d_2 ise malzemenin sahip olduğu kalınlıktır. Optik yol farkı d ya da n parametrelerindeki değişime göre oluşmaktadır. Şekil 2.3'te verilen düzenekte optik yol farkını yaratan şey malzemenin kalınlığıdır. Bu durum faz farkına neden olmaktadır. Şayet burada herhangi bir cisim kullanılsaydı iki kolda katedilen yollar ve kırılma indeks değişimleri eşit olacaktır. İkinci kolda kullanılan cisim bir kalınlığa sahip olduğundan yol farkı meydana getirmiştir. Eşitlik 2.19'da verilen girişim ifadesindeki θ faz değeri, Mach-Zehnder interferometrisi için Eşitlik 2.25 kullanılarak değiştirilmektedir.

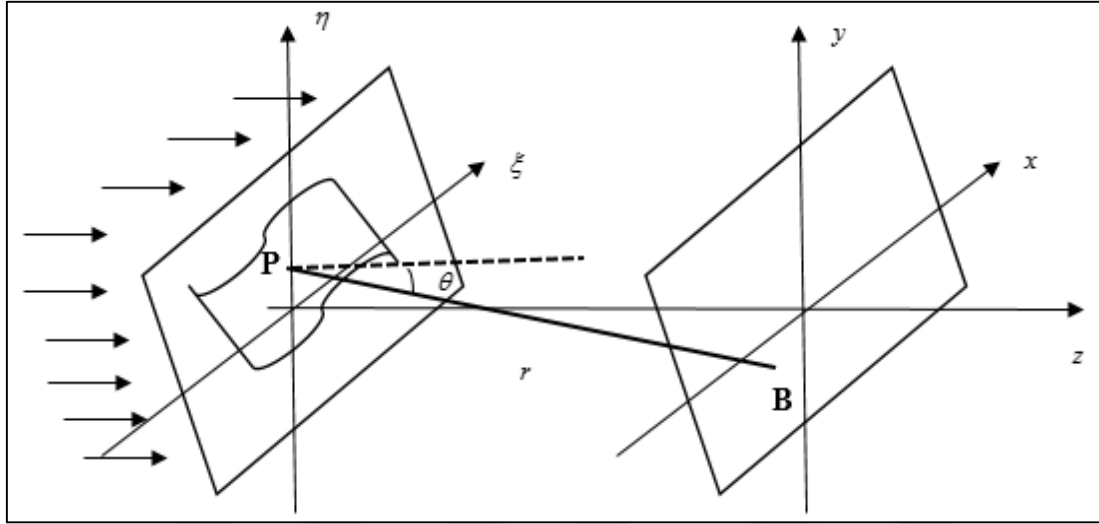
$$\theta = (L_1 - L_2) = (n_1 d_1 - n_2 d_2) \quad (2.25)$$

Mach-Zehnder interferometrisi, gaz akışları, ısı transferi, plazmalardaki sıcaklık dağılımı vb. çalışmalarda kırınım indeksi değişimlerini ölçmek için kullanılmaktadır.

2.4 KIRINIM (DIFFRACTION)

Bir ışık dalgası hologram olarak kaydedildikten sonra optik olarak tekrar elde edilebilmesi, bu hologram tarafından kırınıma uğrayan referans dalganın kullanılmasıyla olmaktadır. Bir hologramın yeni elde edilme sürecini anlatmadan önce ilk olarak kırınım olayının tanımlanması gerekmektedir. Işık demeti, ışık geçirmeyen katı bir yapının içindeki yarıklardan ya da bu engelin kenarından geçerken bükülerek farklı doğrultularda sapma göstermektedir. Işık demetinin geçtiği bu bölgeler dalgaboyu mertebesinde olduğunda, ışık demetinin sapması ile birlikte, görüntü düzleminde aydınlık ve karanlık şeritler meydana gelmektedir. Bu olay kısaca kırınım olarak tanımlanmaktadır [122].

Huygens dalga prensibi ile kırınım olayını sayısal olarak açıklamak mümkündür. Bu prensibin temelinde yatan olay şudur: Dalga cephesinde bulunan her nokta, ikincil küresel dalga için noktasal kaynak olarak düşülmektedir. Herhangi bir yerdeki dalga cephesi bu ikincil dalganın uyumlu süperpozisyonu olarak hareket etmektedir [10]. Huygens Presibi ile kırınımı sayısal olarak açıklamak için burada Fresnel yaklaşımı kullanılmıştır. Kırınımın yer aldığı açıklık dikdörtgenel koordinatlarda çalışılarak verilmiştir $(\xi, \eta, z = 0)$.



Şekil 2.4 Kırınım geometrisi [11].

Şekil 2.4'te aralığın bulunduğu düzleminin koordinatları (ξ, η) olarak verilirken, görüntü düzleminde bu koordinatlar (x, y) ile gösterilmiştir. Aralık düzlemine dik olarak gelen bir düzlem dalga, bu düzlemi aydınlatmaktadır. İki düzlem birbirine paralel olmakla birlikte aralarında uzaklık z mesafesi kadardır. Bu mesafenin küçük olması (sonlu boyutta) yakın alan kırınımı veya Fresnel kırınımı olarak adlandırılmaktadır. Burada sıfır değerlerinin sabit alanın dışında tutulduğu varsayılarak integral sonsuz aralıkta alınmıştır. Bu doğrultuda gözlem düzleminde oluşan kırınım alanı Fresnel-Kirchhoff integrali ile verilmiştir (Bkz. Eşitlik 2.26)

$$\begin{aligned}
 E(x, y, z) &= \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \frac{e^{ikr}}{r} \cos(\theta) d\xi d\eta \\
 &= \frac{z}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \frac{e^{ikr}}{r^2} d\xi d\eta
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

Burada θ , r vektörü ile normal arasında tanımlanan açı değeridir. Ayrıca $\cos \theta = z/r$ olarak tanımlanmaktadır. $U(\xi, \eta)$ ise (ξ, η) aralık düzleminde bulunan kompleks alan genliği olarak verilmiştir. Bununla birlikte r , P noktasından B noktasına kadar uzanan mesafedir ve matematiksel olarak Eşitlik 2.27’de verilmiştir.

$$r = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2} \quad (2.27)$$

Eşitlik 2.27’de verilen Pisagor bağıntısına binom açılımı uygulanarak ($\sqrt{1+b} = 1 + \frac{1}{2}b - \frac{1}{8}b^2 + \dots$) ve tüm sabit değerler ihmal edilerek lineer terimler kullanıldığında Eşitlik 2.28’e ulaşılmıştır.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{z^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2} \\ &= z \sqrt{1 + \left(\frac{\xi - x}{z}\right)^2 + \left(\frac{\eta - y}{z}\right)^2} \\ &\approx \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\xi - x}{z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta - y}{z}\right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Eşitlik 2.26’da verilen denklemde, Eşitlik 2.28’de tanımlanan r ifadesi yerine koyulduğunda Fresnel-Kirchhoff integralinin en temel haline ulaşılmaktadır [132].

$$\begin{aligned} E(x, y, z) &= \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \frac{1}{z} e^{ikz \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\xi - x}{z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta - y}{z}\right)^2 \right]} d\xi d\eta \\ &= \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{\frac{ik}{2z} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]} d\xi d\eta \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.5 HOLOGRAFI

Bu bölümde girişim ve kırınım ifadeleri temel alınarak, holografi ve holografik sistemler için gerekli olan kavramlar açıklanmıştır. Işık dalgalarının girişimine dayanan holografi ile bu sistemlerden elde edilen işaretler hologram olarak adlandırılmaktadır [1,2]. Hologram kaydı yapılırken cisim dalgasının kendisi kaydedildiği için bu cisme ait toplam bilgi ile birlikte genlik ve faz değerleri de kaydedilmektedir. Dolayısıyla kaydı yapılan hologramdan istenildiğinde

orijinal dalga geri elde edilebilmektedir (Reconstruction) [1-3,11]. Yansıma-iletim hologramları, genlik-faz hologramları ve ince-kalın hologramlar yaygın olarak kullanılan hologram türleridir [3,133,134].

Yansıma hologramları keskinlik ve yüksek kontrasta sahip olduğundan fotokimyasal teknikler kullanılarak farklı renkler ile elde edilebilmektedir Burada görüntü, hologram tarafından yansıtılan ışın dalgasıyla oluşturulmaktadır [3, 135]. İletim hologramında ise hologram kaydı lazer ışık kaynağı kullanılarak yapılmaktadır. Bu hologramlar bir filme kaydedilmektedirler ve dikey düzlemde aşağıya ve yukarıya yapılan seri hareketlerle gökkuşağı görüntüsüne yakın renkler yaymaktadırlar. Bu nedenle gök kuşağı hologramları olarak da adlandırılmaktadır [7, 136].

Hologram türleri arasında bulunan genlik ve faz hologramları ise holografinin temelinde yatan ve şiddet farklılığına neden olan faz bilgisinin çıkartılması için oluşturulmaktadır. Çünkü kaydı yapılan cisim dalgası hem faz hem de genlik bilgisini içermektedir. Genlik hologramları oluşturulurken faz bilgisi sadece iletim esnasında kaydedilmektedir. Faz hologramında ise bu bilgi tüm dizi boyunca kaydedilmektedir [7].

3 boyutlu görüntülerin sahip olduğu derinlik bilgisi hologram kaydı için önem arz etmektedir. Ayrıca bu bilgi, hologramın farklı saçak yapılarına sahip olmasında da önemlidir. Çünkü optik kalınlığın dalga boyundan daha küçük olduğu durumlarda kırınan yapı ince olmaktadır. Diğer taraftan kalınlık ile hologramda kaydedilmiş kırınım süresi de birbirini etkilediğinden kaydı yapılan hologramları ince ve kalın olarak ayırmak da mümkündür [7, 135].

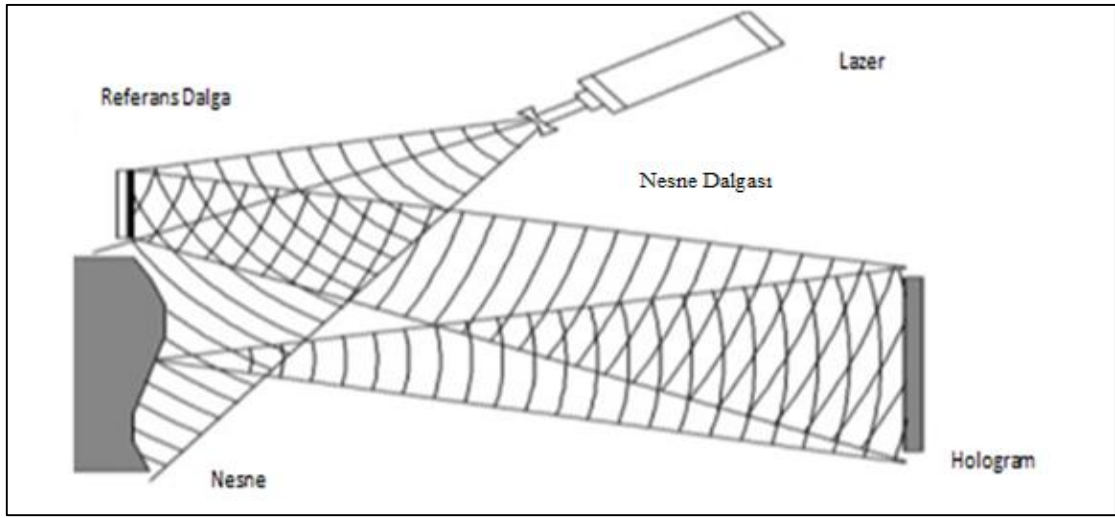
Bu bölümde holografi olayının net bir şekilde anlaşılması için hologram kaydı ve geri elde edilmesi aşamalarında kullanılan matematiksel ifadeler ve şematik gösterimler sunulmuştur.

2.5.1 Hologram Kayıt

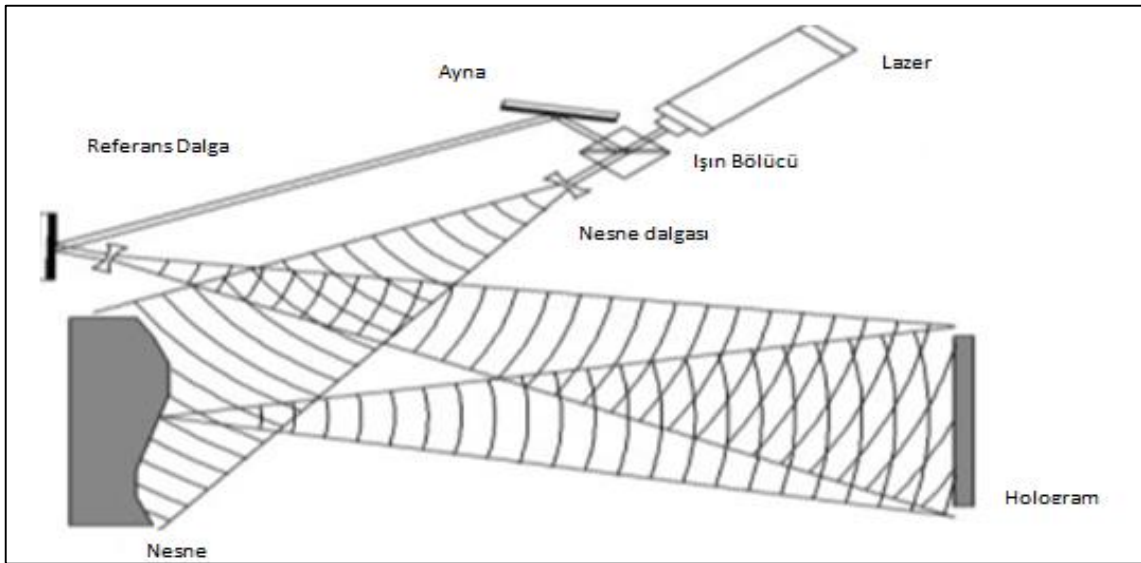
Her optik dalga alanı, genlik ve faz dağılımlarından oluşmaktadır. Fakat hologram kaydı yapmak için kullanılan kayıt sensörleri veya fotoğraf filmi gibi kullanılan kayıt malzemeleri sadece genlik bilgisini kaydetmektedir ve kayıt esnasında faz bilgisi kaybolmaktadır. Bu nedenle bu bölümde faz bilgisinin de kaydedildiği hologram kayıt yöntemleri anlatılmıştır.

Girişim yapan dalga alanlarının bir tanesinin aydınlatılarak, kaydedilen girişim deseninden diğerini tekrar geri elde edebileceğimizi gösteren ilk bilim adamı Denis Gabor'dur. Denis Gabor tarafından oluşturulan, temel hologram kayıt düzeneğinin şekli 2.5'te sunulmuştur [4,5,11]. Bu düzenek ile geri elde edilen dalga alanında sadece şiddet bilgisi değil, aynı zamanda genlik ve faz bilgisi de bulunmaktadır.

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da obje yüzeyinden yansıtılan dalga alanının hologram kaydı için gerekli olan iki temel holografik sistem şematik olarak gösterilmiştir [11].



Şekil 2.5 Dalga cephesi bölünmesi ile kurulan temel hologram düzeneği [11].



Şekil 2.6 Genlik bölünmesi ile kurulan temel hologram düzeneği [11].

Bu şekillerde aydınlatılan nesneden gelen alan obje (nesne) dalgası olarak adlandırılırken, girişim deseni yaratmak için kullanılan diğer alan referans dalgası olarak tanımlanmıştır. Dalga ve genlik bölünmesi referans ve obje dalgası kullanılarak yapılmaktadır.

Obje dalgası olarak adlandırılan, objenin herhangi bir P yüzeyinden yansıyan küresel dalga matematiksel olarak Eşitlik 2.30 ile verilmiştir.

$$A_{OB} = \frac{A_{OB1}P}{p} e^{i(kp+\theta_1)} \quad (2.30)$$

Burada, P , obje yüzeyinden seçilen P noktasının görüntüleme düzleminde bulunan $Q = (x, y, 0)$ noktasına olan uzaklıktır. Ayrıca referans dalga, R noktasından yayılan küresel dalga olarak kabul edilmiştir ve matematiksel olarak Eşitlik 2.31’de verilmiştir.

$$A_{REF} = \frac{A_{REF1}R}{r} e^{i(kr+\theta_2)} \quad (2.31)$$

Eşitlik 2.31’de verilen r , R ve Q noktaları arasındaki mesafe olarak tanımlanmıştır. Bu mesafelerde göz önüne alınarak daha önce eşitlik 2.19 ile verilen girişimin şiddet ifadesi, Eşitlik 2.32’de matematiksel olarak yeniden yazılmıştır.

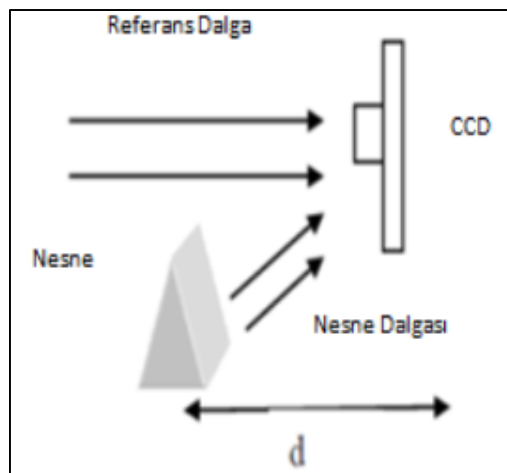
$$\begin{aligned} I(x, y) &= |A_{OB} + A_{REF}|^2 = A_{OB}A_{OB}^* + A_{REF}A_{REF}^* + A_{OB}^*A_{REF} + A_{OB}A_{REF}^* \\ &= \frac{A_{OB1}^2}{p^2} + \frac{A_{REF1}^2}{r^2} + \frac{A_{OB1}}{p} e^{-i(kp+\theta_1)} \frac{A_{REF1}}{r} e^{i(kr+\theta_2)} + \frac{A_{OB1}}{p} e^{i(kp+\theta_1)} \frac{A_{REF1}}{r} e^{-i(kr+\theta_2)} \\ &= \frac{A_{OB1}^2}{p^2} + \frac{A_{REF1}^2}{r^2} + \frac{2A_{OB1}A_{REF1}}{pr} \cos(k(r-p) + \theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Hologram kaydı, ıslak (master) ve gerçek zamanlı kayıt olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Islak hologram kaydı yapmak için özel kimyasal maddeler ile kaplanmış küçük plakalar kullanılmaktadır [137]. Burada iki cam arasına bir film yerleştirilerek kullanılan camlar cismin önüne koyulmaktadır. İki kola ayrılmış lazer ışını ilk kolda cisimi aydınlattıktan sonra, cisim önüne yerleştirilmiş cam plakaya çarpmaktadır. İkinci kolda ise gelen ışın direkt olarak ayna ve mercekler ile kayıt plakasını aydınlatmaktadır ve referans dalga olarak

adlandırılmaktadır. Islak hologramda gerekli olan pozlanma süresi tamamlandığında, plaka üzerine yapılan hologram kaydı da tamamlanmaktadır. Kayıt işlemi bittikten sonra çeşitli solüsyonlarla holografik filme banyo yaptırılarak kurutulmaktadır. Cismin yeniden yapılandırılmasında ise yeni bir lazer ışını kullanılmaktadır. Bu ışın holografik kaydın yapıldığı aynı açıdan gönderilmektedir. Böylece cismin görüntüsü 3 boyutlu olarak görülebilmektedir. Bu görüntü ana kaynaktan gelen ışınla aydınlatıldığı sürece (pozlandırma süresi) görülebilmektedir [137]. Islak hologramda yapılan işlemlerin çokluğu zaman kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle hologram kaydının gerçek zamanlı olarak yapılması düşünülmüştür. Burada gerçek zamandan kasıt, hologram kaydı yapıldıktan sonra kaydedilen hologramların direkt olarak bilgisayara aktarılması ve hiçbir kimyasal işleme gerek kalmadan cismin eş zamanlı olarak geri elde edilmesidir.

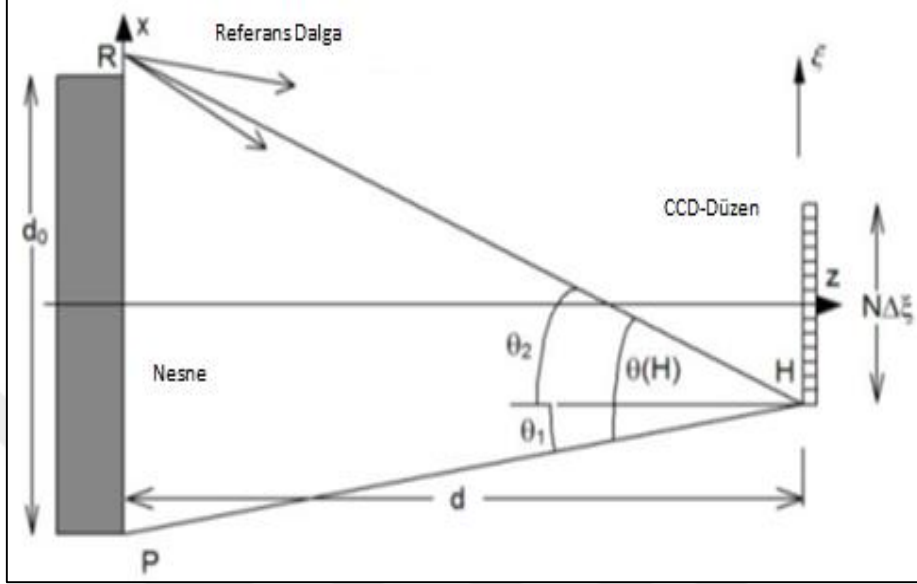
Gerçek zamanlı hologram kaydetmek için kullanılan en önemli teknik sayısal holografi tekniğidir. Bu teknikte 3 boyutlu cisimlerin holografik kaydı bir Charge coupled device (CCD) ya da CMOS kameralar ile yapılmaktadır ve yeniden yapılandırma işlemi bilgisayarda sinyal işleme algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmektedir [11,138-145]. Sayısal holografide eksen üstü (in-line) ve eksen dışı (off-axis) olmak üzere iki farklı hologram düzeneği kullanılmaktadır. Bu çalışmada off-axis sayısal holografi tekniği kullanıldığından burada sadece off-axis hologram düzeneği anlatılmıştır.

Şekil 2.7'de hologram kaydetmek için kullanılan eksen dışı (off-axis) sayısal hologram düzeneği şematik olarak gösterilmiştir [10].



Şekil 2.7 Off-axis sayısal hologram düzeneği [10].

Off-axis sayısal holografi düzeneği, sayısal merceksiz Fourier hologram düzeneği (SMFHD) kullanılarak da açıklanabilmektedir. Şekil 2.8'de SMFHD'nin şematik olarak gösterimi sunulmuştur.



Şekil 2.8 Sayısal merceksiz Fourier hologram kayıt düzeneğinin şematik gösterimi [11].

Bu düzenekte referans dalgası belirlenen R noktasından, obje dalgası ise belirlenen P noktasından yansiyarak görüntü düzlemi üzerine gelmektedir. Girişim deseni de bu düzlem üzerinde oluşmaktadır. Burada (x, y) koordinatları cismin bulunduğu düzlemin koordinatlarını gösterirken, (ξ, η) görüntü (hologram) düzleminin koordinatlarını vermektedir. Off-axis sayısal holografının eksen üstü (in-line) holografiden farkı, referans ve obje dalgalarının aynı eksen de bulunmaması ve aralarında belli bir açının olmasıdır. Objes dalgası ve referans dalgasının sahip olduğu açı değeri sırasıyla Eşitlik 2.33 ve Eşitlik 2.34'te verilmiştir. Bu iki açının toplamı ise Eşitlik 2.35'te verilmiştir.

$$\theta_1 = \tan \theta_1 = \frac{\frac{d_0}{2} + \frac{N\Delta\xi}{2}}{d} \quad (2.33)$$

$$\theta_2 = \tan \theta_2 = \frac{\frac{d_0}{2} - \frac{N\Delta\xi}{2}}{d} \quad (2.34)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (2.35)$$

Açı değerini obje boyuna ve mesafeye bağlı olarak yazmak için Eşitlik 2.36 kullanılmaktadır.

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = \frac{d_0}{d} \quad (2.36)$$

Örnekleme teoremi de göz önüne alındığında bu ifadeler;

$$\frac{d_0}{d} < \frac{\lambda}{2\Delta\xi} \quad (2.37)$$

$$d(d_0) > \frac{2d_0\Delta\xi}{\lambda} \text{ ya da} \quad (2.38)$$

$$d_0(d) < \frac{d\lambda}{2\Delta\xi} \quad (2.39)$$

olarak tanımlanmaktadır [11].

Hologram düzeneğinde istenilen girişim desenini doğru bir şekilde elde etmek için, referans ve obje dalgalarının birbirlerine göre konumlarının doğru olması gerekmektedir. Bu düzenekte kayıt sensörü ve obje arasında alınan minimum mesafe, düzlem referans dalganın da eklenmesiyle yeniden tanımlanabilmektedir. $d < N\Delta\xi$ olduğu durumda $2d_0\Delta\xi/\lambda$ ifadesindeki değer $(d_0\Delta\xi + N\Delta\xi^2)/\lambda$ ile elde edilen değerden daha az olması gerekmektedir. Bunu anlamı ise obje boyutunun görüntü sensörünün sahip olduğu piksel boyutlarından $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ daha az olmasıdır. Bu koşul merceksiz (Lensless) Fourier holografisinin temelini oluşturmak için şarttır [11].

2.5.2 Hologramı Yeniden Yapılandırılma

Kayıt yapılan sayısal hologramlardan gerçek görüntünün tekrar geri elde edilmesi sayısal olarak bilgisayar ortamında yapıldığı gibi uzaysal ışık modülatörlerinin kullanılmasıyla optiksel olarak da yapılmaktadır.

Bu çalışmada sayısal holografi tekniği kullanıldığından, hologramdan cismin görüntüsünün geri elde edilmesi (reconstruction) bilgisayar ortamında yapılmıştır. Bu doğrultuda bu bölümde

hologramdan cismin görüntüsünü (ses dalgasının kendisini) geri elde etmek için kullanılan sinyal işleme algoritmaları anlatılmıştır. Kullanılan algoritmalar sırasıyla Fourier dönüşüm metodu (FDM) [67], Fresnel dönüşüm metodu (F-DM) [68] ve 1 boyutlu sürekli dalgacık dönüşüm metodudur (1B-SDDM) [69-74].

2.5.2.1 Fourier Dönüşüm Metodu (FDM)

18. yüzyıla damgasını vurmuş Fransız bilim adamı Jean B.J. Fourier tarafından literatüre kazandırılan Fourier metodunun temeli, basit ve karmaşık yapıları kendi dalga boylarına indirgeme esasına dayanmaktadır [4,5,7]. Cisimleri dalga boyu modelleri olarak üretip, daha sonra asıl şekillerine geri dönüştürmek, Fourier metodunda kullanılan matematiksel formüller ile mümkün olmuştur [146]. Ayrıca Fourier dönüşümü ile sinyallere ait spektrumlar analiz edilmiş ve frekans domeninde sistem özelliklerinin tanımlanması sağlanmıştır. Ünlü bilim adamı Denis Gabor, Fourier dönüşümlerini kullanarak, cisimlerin görüntülerini karmaşık frekans demeti olarak bir plaka üzerine (hologram plakası) yansıtmıştır. Daha sonra dalgaların genlik ve faz bilgilerini yeniden yapılandırabilen (reconstruction) holografi yöntemini ortaya çıkarmıştır. Gabor'un Fourier eşitliklerini kullanmasıyla kaydı gerçekleştirilen görüntülerin hologramlarından, tekrar aynı cismin kendi öz görüntüleri elde edilmiştir [146].

FDM ile hologramdan cismin görüntüsünü (bu çalışmada cisim yerine ses dalgası kullanılmıştır) yeniden elde etmek ve faz bilgisi çıkartmak için sırasıyla aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Bu bağlamda ilk aşamada Eşitlik 2.32'de verilen girişim ifadesi en sade haliyle eşitlik 2.40'taki gibi tanımlanmıştır.

$$I(x, y) = g(x, y) \quad (2.40)$$

İkinci aşamada hologramın satır satır Fourier dönüşümü alınmıştır (Bkz. Eşitlik 2.41) [67].

$$G(k_{x,y}) = \mathfrak{T}\{g(x, y)\} \quad (2.41)$$

Eşitlik 2.40'da verilen ifadede faz ve genlik bilgisini içeren terimler bulunmamaktadır. Bu terimlerin olduğu Eşitlik 2.42'de verilmiştir.

$$G(k_{x,y}) = A(k_x) + C(k_x - k_0, y) + C^*(k_x - k_0, y) \quad (2.42)$$

Burada genliği ifade eden $A(k_x)$, hologramın arka plan yoğunluğu olarak verilmektedir. $C(k_x - k_0, y)$ ve $C^*(k_x - k_0, y)$ ifadeleri ise bozulma olan desen spektrumudur. Ayrıca bu ifadeler faz bilgisini içermektedir. Sırasıyla fazın reel ve sanal kısımlarını ifade etmektedirler.

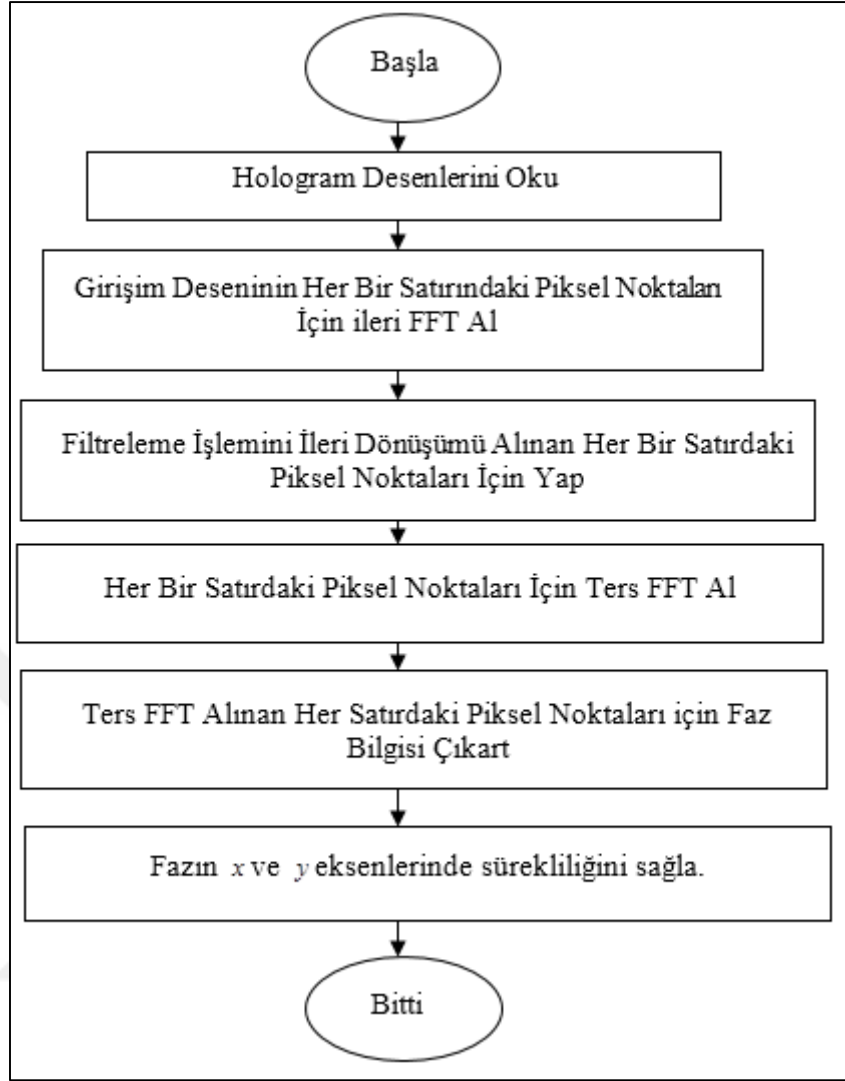
Filtreleme işlemi ile fazın toplandığı maksimum frekans noktası bulunmuştur. Filtreleme yapabilmek için DC bileşen dizinin ilk elemanı olacağından hem genlikte hem de fazda sıfırlanmıştır. Böylece genlik ve faz dizisinin yarısından sonrası sanal bölge olacağı için filtrelenmiştir. Bant geçiren filtre ile filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak satır satır ters Fourier dönüşümü (IFFT) alınarak hologramın fazı çıkartılmıştır (Bkz. Eşitlik 2.43).

$$c(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{G(k_{x,y})\} \quad (2.43)$$

Denklemin 2.43'te verilen Eşitlik ise tam olarak FDM ile bulunan faz bilgisini vermektedir [67].

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{c(x, y)\}}{\text{Re}\{c(x, y)\}} \quad (2.44)$$

Hologramlardan FDM ile faz bilgisi eldesi için kullanılan programa ait akış diyagramı Şekil 2.9'da sunulmuştur.



Şekil 2.9 FDM ile faz bilgisi eldesi için kullanılan programa ait akış diyagramı.

2.5.2.2 Fresnel-Dönüşüm Metodu (F-DM)

Görüntünün yeniden yapılandırılması (reconstruction) için kullanılan ikinci yöntem F-DM 'dir. Bu yöntem için kullanılan en temel ifade Fresnel-Kirchoff integralidir. Bu ifade sayısal hologramın yeniden yapılandırılması için kullanılan en temel denklemdir. Bu denklem basitçe Eşitlik 2.45 ile verilmektedir [10, 147,148].

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) A_{REF}^*(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} r\right)}{r} dx dy \quad (2.45)$$

Burada $r = \sqrt{z^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$ eşitliği ile hesaplanmıştır ve hologram fonksiyonu $I(x, y)$ ile ifade edilmiştir. $A_{REF}(x, y)$ ise referans dalgayı temsil etmektedir. Eşitlik 2.44'ten görüldüğü gibi hologram fonksiyonu ile referans dalga ifadesini çarparak görüntü yeniden elde edilebilmektedir [149]. Eşitlik 2.28'de verilen r parametresinin burada yerine yazılmasıyla hologramda temel geri dönüşüm ifadesi olarak tanımlanan Fresnel Kirchhoff integraline ulaşılmıştır [9,10]. (Bkz. Eşitlik 2.46)

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda z} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} z\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda z} (\xi^2 + \eta^2)\right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) A_{REF}^*(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda z} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \quad (2.46)$$

Bu ifade aynı zamanda eşitlik 2.29'da verilen Fresnel Kirchhoff integralinin ters dönüşüm ifadesidir ve Fresnel dönüşümü olarak adlandırılmaktadır. Burada $\Gamma(\xi, \eta)$ geri elde edilen dalga alanıdır. Geri elde edilen dalga düzleminin koordinatları (ξ, η) ile gösterilirken, hologram düzleminin koordinatları (x, y) ile verilmektedir. Kaydedilen hologramın genliği ve referans dalganın kompleks eşlenik alanı sırasıyla $I(x, y)$ ve $A_{REF}(x, y)$ olarak tanımlanmaktadır. Kullanılan dalga boyu ise λ ile ifade edilmektedir. Ayrıca z yayılım mesafesi olarak verilmektedir.

Eşitlik 2.46'da verilen Fresnel kırınım integrali aslında Fourier dönüşümünün özel bir formudur. Bu ifadede integralden hemen önce verilen faz ve şiddet terimleri alınmadığında, ifade Fourier dönüşümüne eşit olmaktadır.

F-DM ile Eşitlik 2.46'da verilen eşitlikten faz bilgisini bulmak için Eşitlik 2.47 kullanılmıştır.

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)]} \quad (2.47)$$

Burada Im ve Re sırasıyla geri elde edilen hologramın sanal gerçek bölgelerini vermektedir.

2.5.2.3 Bir Boyutlu-Sürekli Dalgacık Dönüşüm Metodu (1B-SDDM)

Sayısal holografide çoklu çözünürlük tekniği olarak kullanılan dalgacık dönüşümü, ayrık ve sürekli dalgacık dönüşümü olarak ikiye ayrılmaktadır [69-73]. Ayrık analizin gerçekleştirildiği durumlarda ölçek ve dönüşüm parametreleri ayrık zamanda yapılmaktadır. Sürekli dalgacık dönüşümünde (SDD) ise bu parametrelerin sürekli kılınması gerekmektedir [150,151].

Kararlı olmayan sinyaller incelenirken Fourier dönüşümü gibi yöntemlerde bir pencereleme fonksiyonu kullanılarak bu sinyalin kararlı bölgeye gelmesi sağlanır. Fakat seçilen pencerenin dar aralıkta olması konum bölgesinde yüksek çözünürlük, frekans bölgesinde düşük çözünürlük elde edilmesine neden olmaktadır. Tam tersi durumda yani geniş aralıkta pencere seçilmesi durumunda ise, konum bölgesinde düşük çözünürlük, frekans bölgesinde yüksek çözünürlük elde edilmektedir [9]. Pencereleme işlemi ile yaşanan çözünürlük problemini ortadan kaldırmak için SDD yönteminin kullanılması önerilmiştir. Grossman ve Morlet tarafından ilk defa literatüre kazandırılan SDD yöntemi ile kararlı olmayan sinyallerin analizi kolaylıkla yapılabilmektedir. Ayrıca frekans ve konum (zaman) bölgeleri eş zamanlı olarak analiz edilebilmiştir [70].

Gaussian dalgacığı, Meksikalı şapkası dalgacığı, Shannon dalgacık ve Morlet dalgacık gibi çeşitleri bulunan dalgacık dönüşümünde kullanılan değişken yapılı pencere fonksiyonu ana dalgacık (mother wavelet) olarak tanımlanmaktadır [70]. Kaydedilen bir hologramın sürekli dalgacık dönüşümü alındığında, hologramın her bir satırı bu dönüşüm ile Eşitlik 2.48'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$C_s(s, b) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \psi^* \left(\frac{x-b}{s} \right) dx \quad (2.48)$$

Burada analiz edilen konum bölgesindeki Morlet dalgacık fonksiyonu $\psi_{s,b}(x)$ olarak verilmektedir. Ayrıca Morlet dalgacığının kompleks eşleniği $\psi_{s,b}^*(x) = \psi^* \left(\frac{x-b}{s} \right)$ ile ifade edilirken, dalgacığın ölçeklendirme ve dönüşüm parametreleri sırasıyla s ve b olarak tanımlanmaktadır. s ve b parametrelerinin sürekli değişken olduğu durumlarda dalgacık dönüşümü sürekli dalgacık dönüşümü olarak adlandırılmaktadır. SDD ile belirlenen s değerleri

için tüm x konum uzayında, bu dalgacık b parameterisine bağlı olarak ötelenmektedir. Bu işlem ile sxb piksel boyutlarına sahip bir matris elde edilmektedir.

Bir düzlem dalgadan oluşan ve Gauss fonksiyonu ile modüle edilmiş bir boyutlu Morlet dalgacık fonksiyonunu Eşitlik 2.49 ile ifade edilmektedir [69,73].

$$\psi(x) = \pi^{-1/4} \exp(i\omega_0 x) \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (2.49)$$

Burada Morlet dalgacığının merkezi frekansı olarak alınan ω_0 'ın frekansı boyutsuzdur ve değeri 6 olarak alınmıştır. Morlet dalgacığının konum uzayındaki ifadesi Eşitlik 2.50 ile verilmiştir.

$$\psi_{s,b}\left(\frac{x-b}{s}\right) = \pi^{-1/4} \exp\left(i\omega_0\left(\frac{x-b}{s}\right)\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-b}{s}\right)^2\right) \quad (2.50)$$

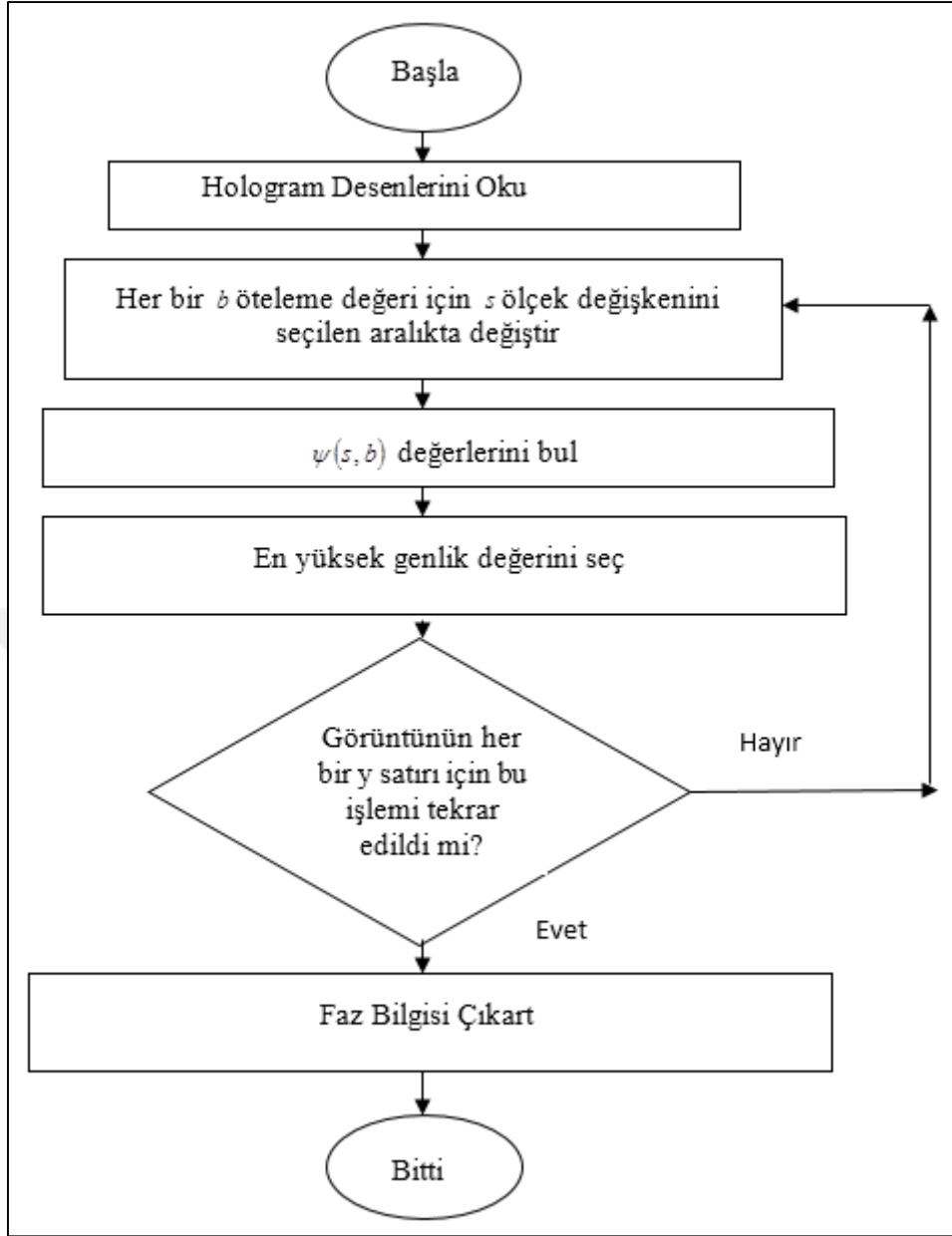
Bu dalgacığının frekans uzayındaki ifadesi ise Eşitlik 2.51 ile gösterilmiştir.

$$\psi(s, f) = \pi^{-1/4} \sqrt{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}(sf - \omega_0)^2\right) \quad (2.51)$$

Eşitlik 2.48'de verilen $C_s(s, b)$ sürekli dalgacık dönüşüm ifadesine ait faz bilgisi Eşitlik 2.50 kullanılarak hesaplanabilmektedir. Hesaplanan faz değeri $[-\pi, +\pi]$ değerleri arasındadır [73]. 1B-SDD metodunda Eşitlik 2.52'de verilen eşitlik kullanılarak faz bilgisi elde edilebilmektedir.

$$\phi(x) = \arctan \frac{\text{Im}[C(s, b)]}{\text{Re}[C(s, b)]} \quad (2.52)$$

Hologramlardan 1B-SDDM ile faz bilgisi eldesi için kullanılan programa ait akış diyagramı Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10 1B-SDDM ile faz bilgisi eldesi için kullanılan programa ait akış diyagramı.



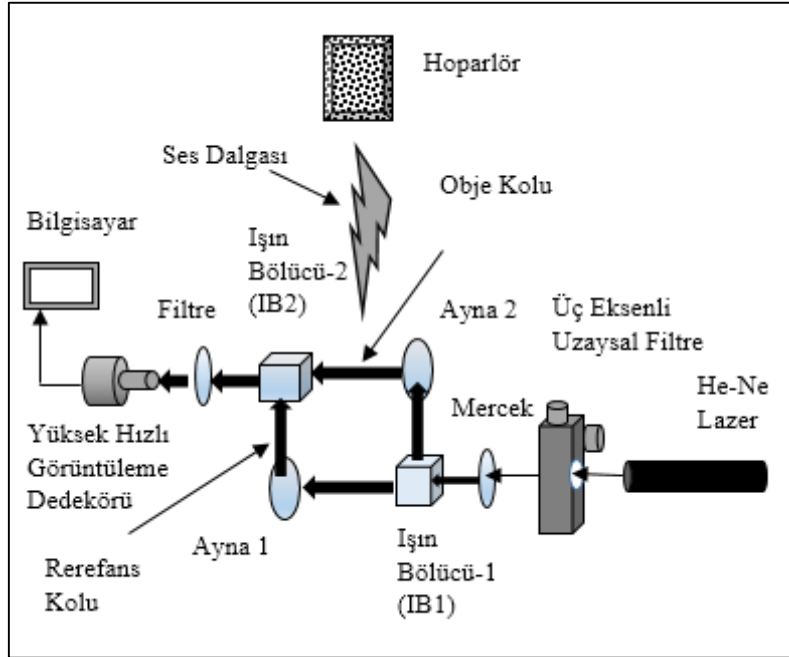
BÖLÜM 3

OPTİK SES KAYDEDİCİ SİSTEMİN YAPISI VE ZAMANSAL FAZ DAĞILIMIN ÇIKARTILMA AŞAMALARI

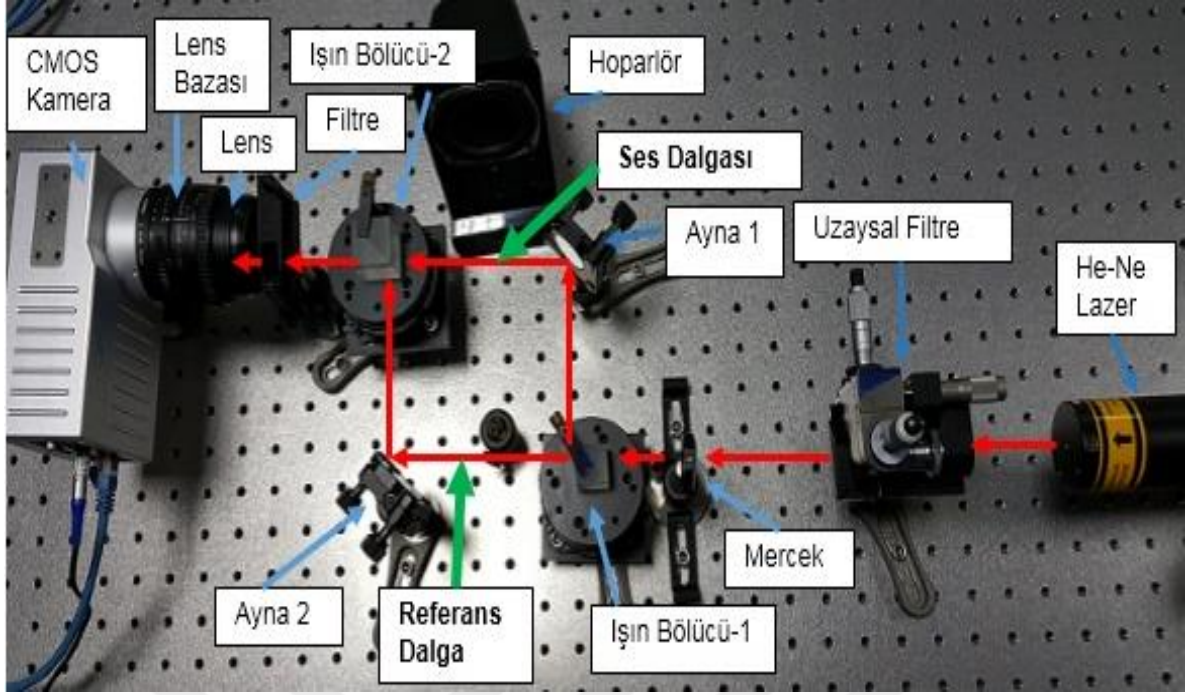
Bu bölümde sayısal holografıye dayalı optik ses kaydedici sistem ve yapısı anlatılmıştır. Daha sonra ses hologramlarından yeniden yapılandırma metotları ile geri elde edilen ses dalgasına karşı düşen zamansal faz dağılımının çıkartılma aşamaları gösterilmiştir.

3.1 OPTİK SES KAYDEDİCİ

Bu çalışmada ses dalgalarının holografik kaydı için temeli Mach-Zehnder interferometrisine [31] dayanan off-axis sayısal holografı tekniği kullanılmıştır. Bu optik ses kaydedici sistemin şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilirken, donanımsal gösterimi ise Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.1 Off-axis sayısal holografıye dayalı optik ses kaydedicinin şematik gösterimi.



Şekil 3.2 Optik ses kaydedici sistemin donanımsal gösterimi.

Şekil 3.2’de verilen optik ses kaydedici sistem ile ses dalgalarının hologramları kaydedilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ses dalgaları, normal ses (fonksiyon jenaratörü ile üretilmiş farklı frekanslardaki ses sinyalleri, MP3’e kaydedilmiş kelimeler ve cümleler, örnek müzik parçası [152]) ile ses ötesi dalgalar (ultrasonik)’dir. Normal ses dalgası insan kulağının sahip olduğu duyarlılık sınırları içerisinde olan frekansı 20 Hz ile 20 KHz arasındaki ses dalgalarıdır. Ses ötesi dalgalar ise insan kulağının duyamayacağı aralıkta yer alan 20 KHz’in üzerindeki tüm frekans değerini içeren dalgalardır. Bu dalgalar ultrasonik dalgalar olarak da adlandırılmaktadır [153]. Önerilen sistemde kullanılmak üzere üretilen tüm ses dalgaları Creative SBS A60 model hoparlör vasıtasıyla obje koluna aktarılmıştır. Bu hoparlörün sahip olduğu toplam RMS ses çıkış gücü 4 Watt’tır ve frekans yanıtı 90 Hz- 20 KHz aralığındadır. Şekil 3.2’de gösterilen hoparlördeki sinyal gürültü oranı ise 75 desibeldir. Hoparlörün ortasında bulunan diyafram sayesinde ses dalgası akustik olarak yayılmaktadır. Bu çalışmada ses dalgalarının direkt olarak obje koluna verilmesi yerine, bir hoparlör vasıtasıyla aktarılmasının nedeni sesin genliğini arttırmaktır. Ses dalgalarının sahip olduğu genliğin büyük olması sesin şiddetinin artması demektir. Yüksek şiddete sahip ses dalgası ise uzak mesafelerden kolayca algılanmaktadır. Diğer taraftan yüksek genlikli ses dalgası sayesinde obje kolundaki ışın daha fazla titreşmektedir. Bu titreşim ile obje kolunda bir optik yol farkı oluşarak, faz farkı meydana gelmektedir.

Bu sistemde ışık kaynağı olarak 10 mW güce sahip monokromatik He-Ne Lazer ışık kaynağı kullanılmıştır. Bu lazer 632nm dalga boyuna sahiptir. Lazer kaynağından çıkan ışın sahip olduğu dalga boyu nedeniyle görünür bölgede yer almaktadır [154].

Şekil 3.2’de verilen sistemde lazer ışık kaynağından çıkan ışın eşit yol uzunluğa sahiptir ve birbirlerine 90 derecelik açı ile ilerleyen iki kola ayrılmıştır. Daha sonra üç eksenli uzaysal filtreden (three-axis spatial filter) geçirilerek bir mercekle yardımcıyla paralelleştirilmiştir. Bu ışın merceğin hemen önüne yerleştirilen ışın bölücü (beam-splitter) ile referans ve obje dalgası olmak üzere iki kola bölünmüştür. Burada 1. kol obje dalgasının ilerlediği obje kolu olarak adlandırılmıştır. Objeye dalgasının fazı ortamda yayılan ses dalgaları ile modüle edilmiştir.

Modülasyon bir bilgi yükleme işlemidir. Bu işlem, dalganın sahip olduğu özelliklerin (faz, frekans ve genlik) değiştirilmesiyle yapılır. Şayet dalganın genliği değiştiriliyorsa genlik modülasyonu, frekansı değiştiriliyorsa frekans modülasyonu, fazı değiştiriliyorsa faz modülasyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada sesin basınç etkisinden yararlanarak hologramların faz bilgisi değiştirilmiştir ve bu doğrultuda ses dalgası ile kırınım indeks dağılımı (refractive-index distribution) modüle edilmiştir. Bu dalgaların basınç etkisiyle titreşen lazer ışını obje kolunda bir faz farkı yaratmıştır.

Eşitlik 2.16’da verilen girişim (hologram) ifadesindeki faz değerinin basınca bağlı olarak değişimi eşitlik 3.1 ile verilmiştir.

$$\Delta\theta(x, y) = kz + \varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n = \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Burada, hologramın faz ifadesi ise $\Delta\theta(x, y)$ olarak verilmiştir. Ayrıca havanın kırınım indeksi n ile gösterilirken, P_0 , atmosferik basınç, P ise ses dalgası basıncı olarak tanımlanmaktadır. Ses dalgasının sahip olduğu basınç değerinin atmosferik basınç ile aynı olmadığı açıkça görülmektedir.

Sistemde tanımlanan ikinci kol referans dalganın bulunduğu koldur. Referans kolunda ilerleyen ışın dalgası 2. aynadan yansyarak ikinci ışın bölücüye gelmiştir. Her iki koldan gelen ışınların 2. Işın bölücü ile toplanmasıyla girişim olayı meydana gelmiştir. Girişim olayı ile oluşan

hologram desenleri, oldukça yüksek kayıt hızına sahip bir görüntü sensörü olan CR600x2 model CMOS kamera ile kaydedilmiştir. Kaydedilen hologramların odaklanması için lens kullanılmıştır. Bu lens CMOS kameraya lens bazası ile monte edilmiştir. Hologram kaydı için kullanılan CMOS kamera tek çekimde saniyede minimum 500 görüntü, maksimum 76000 görüntü alabilecek kapasiteye sahiptir. Bu çalışmada kamera genel olarak saniyede 2000 görüntü alacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca iyi bir çözünürlük elde etmek için piksel boyutu 512X512 olarak seçilmiştir. Burada kameranın sahip olduğu her bir pikselin adım aralığı ise 14µmX14µm'dir. Kamera ile kaydı yapılan hologramlar bir arayüz vasıtası ile bilgisayara aktarılmış ve sinyaller sayısal olarak bilgisayarda işlenmiştir.

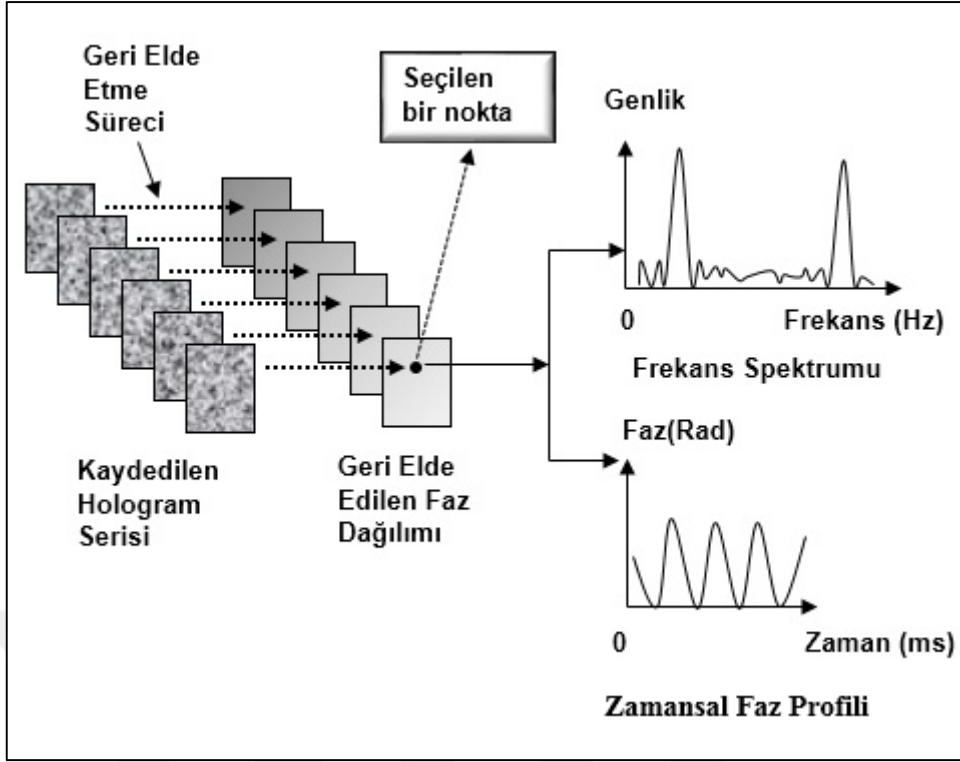
CMOS kameranın saniyede alacağı görüntü sayısı, ses dalgasının sahip olduğu frekans değerine göre ayarlanmıştır. Çünkü Nyquist örnekleme teoremine göre örnekleme frekansı, kaydı yapılan ses dalgasının maksimum frekansının en az 2 katı olmalıdır. Yani, ses dalgasının frekansı f_{max} ise, kayıt etme zaman aralığının (yani örnekleme adımı) $1/2f_{max}$ 'dan daha kısa olması gerekmektedir. Şekil 3.2'de gösterilen sistemde kaydı yapılan ses dalgaları 1 KHz frekans değerine sahiptir. Bu bağlamda maksimum örnekleme frekansı en az 2 KHz olmalıdır ve CMOS kamera ile saniyede 2000 hologram kaydı yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ortama verilen ses dalgaları 3 saniyelik ses dalgaları olduğundan 3 saniye boyunca toplamda 6000 adet hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan CMOS kameranın özellikleri de bu şartlar doğrultusunda ayarlanmıştır. Şekil 3.3'te CMOS kamera için alınan parametler CR600x2 CMOS kamerasının ekran görüntüsü alınarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3 CR600x2 CMOS kamera parametrelerinin gösterimi.

3.2 ZAMANSAL FAZ PROFİLİ VE FREKANS SPEKTRUMUNUN ÇIKARTILMASI

Hologram kaydı, kaydedilen hologramlardan ses dalgasının geri elde edilmesi, zamansal faz profili (ses dalgası) ve bu dalgayla ait frekans spektrumunun elde edilmesi gibi işlemlerin sırasıyla gösterimi Şekil 3.4'te verilmiştir [120]. Bu çalışmada, Şekil 3.4'te gösterilen zamansal faz profilinin, holografik kaydı yapılan ses dalgasına eşit olduğu düşünülmüştür. Burada, holografik kaydı yapılan ses dalgası ya da müzik parçasının sahip olduğu en yüksek frekans bileşenine göre örnekleme adımı tespit edilmiştir.



Şekil 3.4 Zamansal faz profili (ses dalgası) ve bu dalgaya ait frekans spektrumunun eldesi.

Zamansal faz profilini bulabilmek için geri elde edilen faz dağılımının (reconstructed phase distribution) sahip olduğu tüm piksel noktaları değil sadece tek bir piksel noktası kullanılmıştır. Çünkü burada zamansal faz profilinin (ses dalgası) yaratılması amaçlanmıştır. Bununla birlikte frekans spektrumunun çıkartılması da şekil 3.4 'te gösterilmiştir. Frekans spektrumu ile çeşitli yüzeyler üzerindeki çatlak tespiti yapılması amaçlanmıştır [120].

Bilindiği gibi hologram kaydı deneysel olarak sürekli zamanda yapılmaktadır. Bunun aksine sinyal işleme algoritmaları da ayrık zamanda işlenmektedir. Sürekli ve ayrık zaman arasındaki ilişkiyi frekans spektrumu ile göstermek mümkündür. Eşitlik (3.2) kullanılarak obje koluna verilen ses dalgasının sahip olduğu frekans değerinin frekans spektrumunda hangi noktada yer aldığı kolaylıkla bulunabilmektedir [120,155].

$$\Omega = \frac{2\pi}{N} k \quad (3.2)$$

Burada ayrık zaman sinyalin frekansı Ω olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca saniyede alınan örnek sayısı N ile verilirken, k ise ayrık frekans indeksi olarak ifade edilmektedir.

Sürekli zaman sinyalinin (gerçek ses sinyali) frekansı ω (açısal frekans) olarak verildiğinde ve frekans f olarak tanımlandığında ω ve Ω arasındaki ilişki Eşitlik (3.3) ile verilebilmektedir.

$$\Omega = \frac{\omega}{f_s} \quad (3.3)$$

Burada $\omega = 2\pi f$ 'dir. Bununla birlikte f_s örnekleme frekansıdır. Bu frekansın ayrık zaman indeksine karşı düşen değeri, k , Eşitlik (3.4) ile verilebilmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{N} k &= \frac{2\pi f}{f_s} \\ \Rightarrow k &= \frac{fN}{f_s} \end{aligned} \quad (3.4)$$



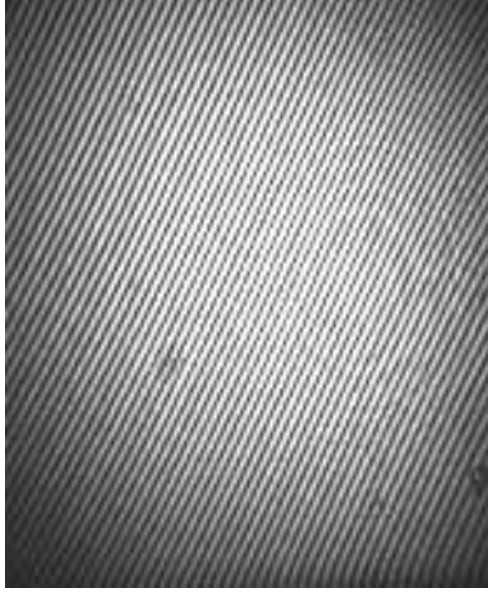
BÖLÜM 4

SES DALGALARININ KAYDI, YENİDEN YAPILANDIRILMASI VE FREKANS SPEKTRUMLARININ ÇIKARTILMASI

Bu tez çalışmasının ilk kısmında ses dalgalarının optik ses kaydedici ile kaydedilmesi ve geri elde edilerek dinlenilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda sırasıyla, fonksiyon jeneratörü ile üretilmiş farklı frekans değerlerine sahip ses sinyalleri (“500 Hz-1 KHz” arasındaki ses sinyalleri), MP3’e kaydedilmiş çeşitli kelime ve cümleler (“a_e_i” sesi, “Okula Gidiyorum” ve “Bülent Ecevit University” cümleleri), örnek müzik parçası [152] ve ultrasonik ses dalgalarının hologram kaydı yapılmıştır. Ses hologramlarından bu ses dalgasını geri elde etmek için sinyal işleme algoritması olarak bölüm 2.5.2.1’de ayrıntıları verilen Fourier dönüşüm metodu kullanılmıştır. Hologramlardan geri elde edilen zamansal faz işareti ve frekans spektrumu çıkartılarak ses dalgasının sisteme verilen ses dalgasına denk olup olmadığı incelenmiştir. Bununla birlikte geri elde edilen ses dalgaları multimedya dosyası olarak kaydedilip dinlenmiştir.

4.1 FONKSİYON JENERATÖRÜ İLE ÜRETİLMİŞ 500 Hz SİNÜS DALGASI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

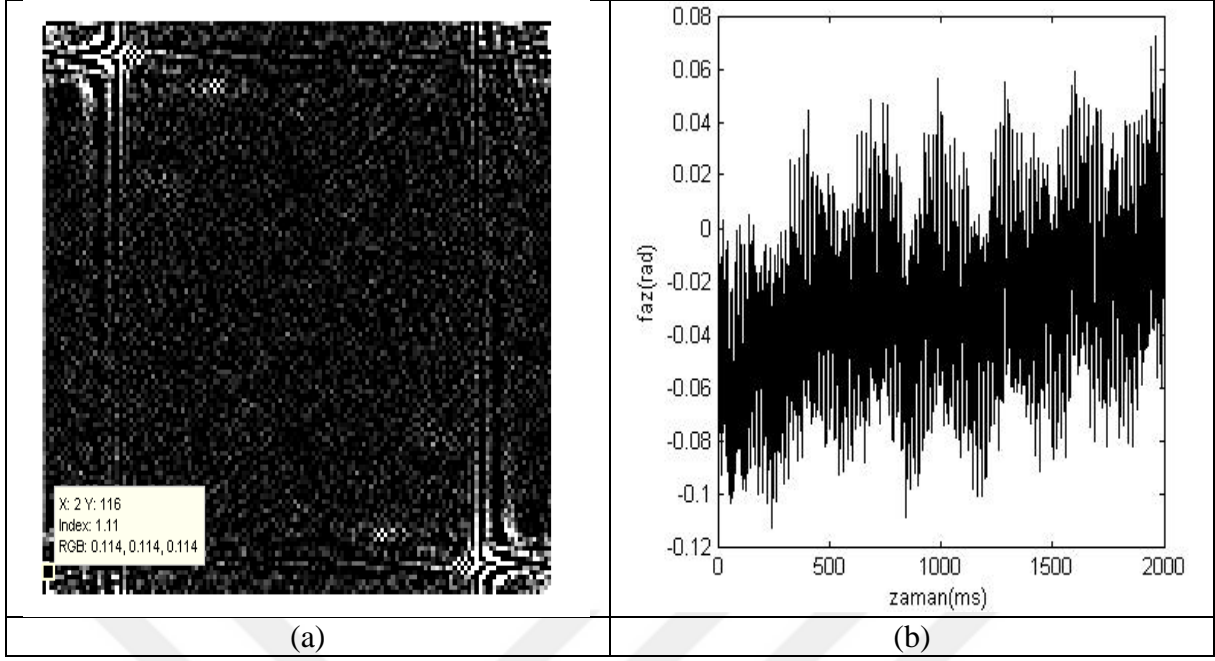
Bu bölümde, ilk aşamada hologram kaydı yapmak için sisteme fonksiyon jeneratörü ile üretilmiş 500 Hz frekans değerine sahip ses dalgası verilmiştir. Bu ses dalgası bir hoparlör yardımıyla obje koluna aktarılmıştır. CMOS kamera ile hologram kaydı yapmak için Nyquist kriteri göz önünde bulundurulmuş ve örnekleme frekansı bu kriter gereğince alınmıştır. Bu nedenle saniyede 2000 görüntü alacak şekilde hologram kaydı yapılmıştır. 500 Hz frekans değerine sahip ses dalgası için kaydedilmiş ve örnek olarak seçilmiş 600. hologram deseni şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 500 Hz sinüs dalgasına ait deneysel sistem ile kaydedilen 600. hologram deseni.

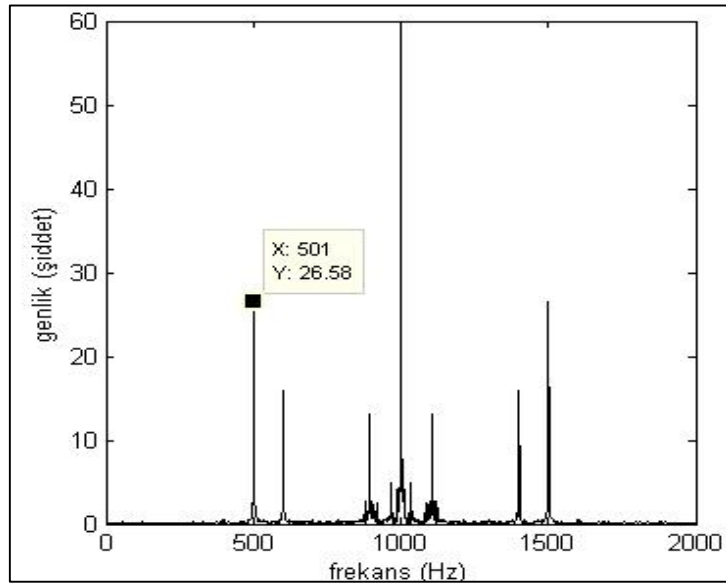
Ses hologramlarının geri elde edilerek dinlenebilmesi için, ses dalgasının 3 saniye boyunca değişimini gösteren zamansal faz profili çıkartılmıştır. Bu faz profili, hologramların tek bir piksel noktası için bulunmuştur. Kullanılacak piksel noktası belirlenirken hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı kullanılmıştır ve bu dağılımdaki en aydınlık piksel noktası seçilmiştir. Karanlık noktalarda ses dalgasına ait hiçbir bilgi bulunmadığından aydınlık olduğu düşünülen noktalardan seçim işlemi gerçekleştirilmiştir. 500 Hz frekans değerindeki sinüs dalgası için bu nokta (2,116) olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.2a'da, holografik kaydı yapılan 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı (2,116) noktası işaretlenerek gösterilmiştir. Şekil 4.2b'de ise (2,116) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) verilmiştir.



Şekil 4.2 500 Hz sinüs dalgası için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (2, 116) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).

Şekil 4.3'te ise (2, 116) noktası için geri elde edilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu gösterilmektedir. Bu çalışmada, kaydedilen hologramlardan frekans spektrumunu çıkartmak için MATLAB kütüphanesinde bulunan FFT hazır komutu kullanılmıştır.

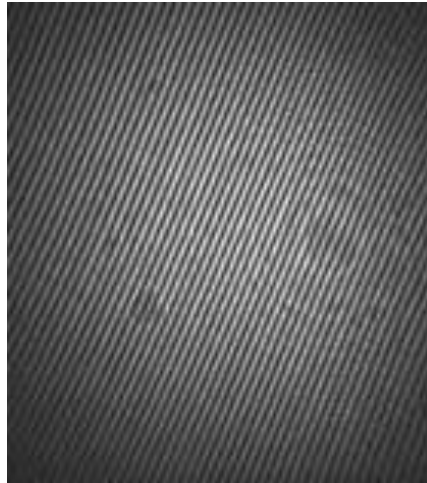


Şekil 4.3 500 Hz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

Bölüm 3.2 de verilen matematiksel ifadeler kullanılarak sürekli zaman sinyalin ayrık zamandaki karşılığını bulmak kolaydır. Bu bağlamda ortama verilen 500 Hz frekans değerindeki ses dalgasına (sinüs dalgası) ait sinyalin, frekans spektrumunda da 500 Hz değerinde görülmesi beklenmektedir. Şekil 4.3'te verilen frekans spektrumuna bakılarak maksimum genlik değerinin 501 Hz frekans değerini gösteren noktada olduğunu görmekteyiz. Buradan da anlaşıldığı gibi örnekleme frekansına dikkat edilerek hologram kaydı yapıldığında, elde edilen zamansal faz işaretinin % 0.2'lik bir hata oranı elde edildiği görülmüştür. Yani deneysel sistemde kullanılan ses dalgasına hemen hemen eşit olduğunu söyleyemek mümkündür. Ayrıca bu zamansal faz profili (ses dalgası) kullanılarak ses tekrar dinlendiğinde 1 saniye kadarlık bir ses dinlendiği ve ortama verilen 500 Hz sinüs dalgası ile aynı olduğu söylenebilmektedir.

4.2 FONKSİYON JENERATÖRÜ İLE ÜRETİLMİŞ 1 KHz SİNÜS DALGASI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

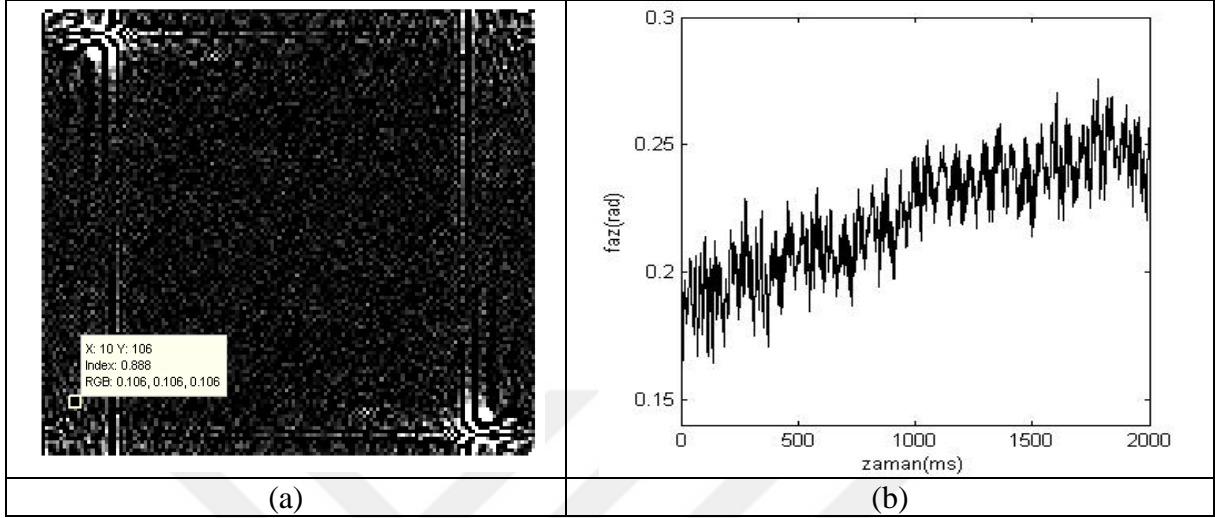
Bu aşamada fonksiyon jeneratörü ile üretilmiş ve ortama bir hoparlör yardımı ile aktarılmış 1 KHz sinüs dalgasının sayısal holografik kaydı yapılmıştır. Üretilen ses dalgası 1 saniyelik bir ses dalgası olduğundan, Nyquist kriteri göz önünde bulundurularak CMOS kamera ile saniyede 2000 adet hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'de 1 KHz sinüs ses dalgasına ait deneysel sistem ile kaydedilmiş ve örnek olarak seçilmiş 600. hologram deseni verilmiştir.



Şekil 4.4 1 KHz sinüs dalgasına ait deneysel sistem ile kaydedilen 600. hologram deseni.

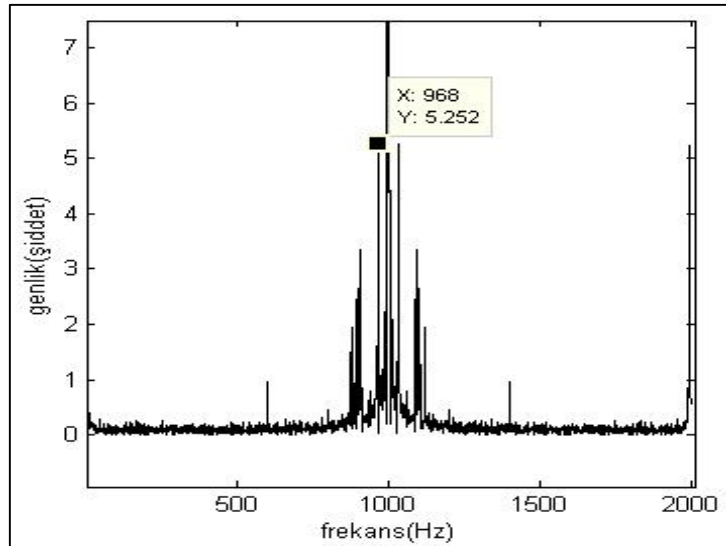
1 KHz frekans değerindeki ses dalgasına ait zamansal faz profilini çıkartmak için, holografik kaydı yapılan 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımında en aydınlık nokta olduğu

düşünülen (10,106) piksel noktası seçilmiştir. Şekil 4.5a’da 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı, (10,106) noktası işaretlenerek gösterilmiştir. Şekil 4.5b’de ise bu nokta kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) sunulmuştur.



Şekil 4.5 1 KHz sinüs dalgası için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar
a) holografik kaydı yapılan 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı
b) (10, 106) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).

Şekil 4.6’da ise 1 KHz sinüs dalgasına ait (10, 106) noktası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu verilmektedir.



Şekil 4.6 1 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

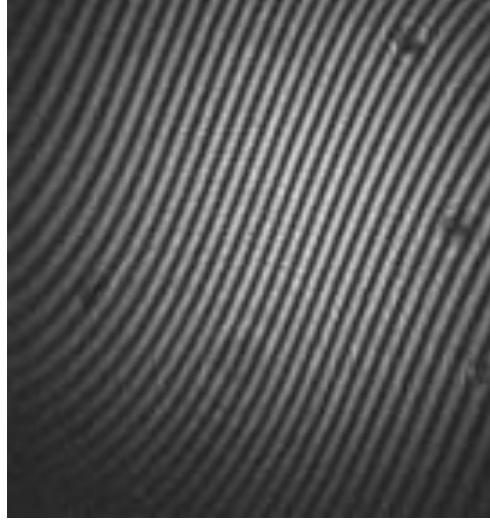
Objeye koluna verilen 1 KHz sinüs dalgası dalgasına ait sinyalin frekans spektrumunda 1 KHz değerinde görölmesi beklenmektedir. Şekil 4.6'da verilen frekans spktrumuna bakılarak maksimum genlik değerinin 968 Hz'i gösteren noktada olduğunu görmekteyiz. Elde edilen zamansal faz profili % 3.2'lik bir hata oranı ile holografik kaydı yapılan ses dalgasından farklı bulunmuştur. Yani deneysel sistemde holografik kaydı yapılan ses dalgasına hemen hemen eşit olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu zamansal faz profili kullanılarak ses tekrar dinlendiğinde 1 saniye kadarlık bir ses dinlendiği ve sistemde kullanılan 1 KHz frekans değerindeki ses dalgası ile aynı olduğu söylenebilmektedir.

Ayrıca 500 Hz sinüs dalgası için duyulan ses kalın (bas) bir ses iken, bu aşamada 1 KHz sinüs dalgası için duyulan ses tizdir. Bu sonuç çalışmanın doğruluğunu kanıtlamaktadır. Çünkü insan kulağı frekans değeri düşük olan ses dalgalarını kalın, frekans değeri yüksek olan ses dalgalarını tiz sesler olarak algılamaktadır. Sayısal holografı ile kaydı yapılan 500 Hz ve 1 KHz'lik sinüs dalgaları geri elde edilip dinlendiğinde de bu fark açıkça görölmektedir.

4.3 FONKSİYON JENERATÖRÜ İLE ÜRETİLMİŞ 500 Hz-1 KHz ARASINDA DEĞİŞEN FREKANS DEĞERİNDEKİ SINÜS DALGASI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

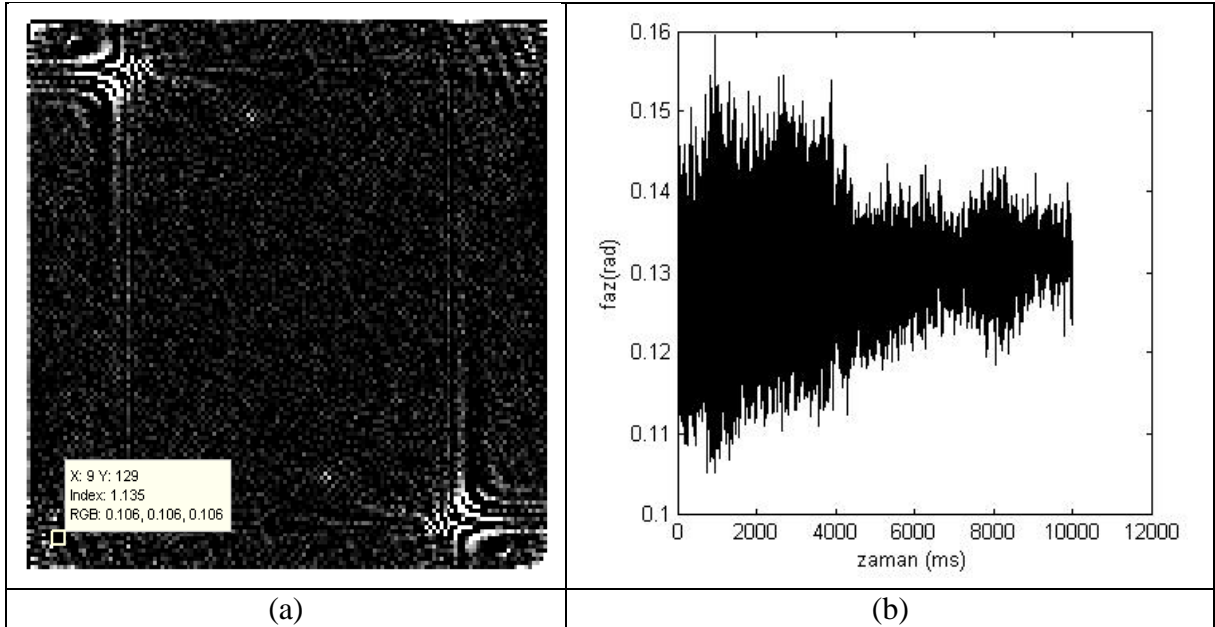
Holografik kaydı yapılan 500 Hz ve 1 KHz frekans değerlerindeki ses dalgalarına ait hologramlardan geri elde edilen zamansal faz profili kullanılarak, ses sinyallerinin dinlebildiği yukarıdaki bölümde söylenmiştir. Bu iki ses dalgası arasındaki sesin farklı olduğunu daha net bir şekilde duyabilmek için saniyede 2000 görüntü alınarak 5 saniyelik bir hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla toplamda 10000 adet hologram kaydedilmiştir. 5 saniyelik hologram kaydı süresince başlangıçta fonksiyon jeneratörü ile 500 Hz frekans değerinde sinüs dalgası üretilmiş ve yavaş yavaş bu ses dalgası 1 KHz frekans değerine sahip sinüs dalgası olacak şekilde arttırılmıştır. Böylelikle hologramlardan geri elde edilen zamansal faz profili kullanılarak holografik kaydı yapılan ses tekrar dinlendiğinde iki sinyal arasındaki kalın ve tiz seslerin ayrımı daha net yapılabılmıştır.

Frekans değeri 500 Hz-1 KHz arasında değişen sinüs dalgasına ait deneysel sistem ile kaydı yapılmış ve örnek olarak seçilmiş 600. hologram deseni Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



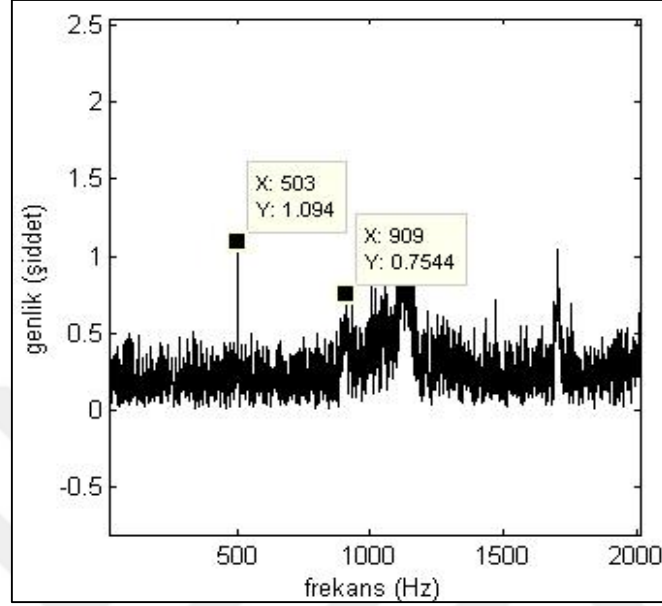
Şekil 4.7 Frekans değeri 500 Hz-1 KHz arasında değişen sinüs dalgasına ait deneysel sistem ile kaydedilen 600. hologram deseni.

5 saniye boyunca değişen bu sinüs dalgasının sayısal holografik kaydı yapıldıktan sonra, hologramlardan geri elde edilen genlik dağılımı kullanılarak şiddetin en yoğun olduğu nokta seçilmiştir. Bu nokta (9,129) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.8a'da kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen genlik dağılımı (9,129) noktası işaretlenerek gösterilmiştir. Şekil 4.8b'de ise bu nokta için geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) verilmiştir.



Şekil 4.8 Frekans değeri 500 Hz-1 KHz arasında değişen sinüs dalgası için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 600. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (9, 129) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).

Şekil 4.9’da ise frekans değeri 500 Hz ile 1 KHz arasındaki değerlerde değiştirilerek fonksiyon jeneratörü ile üretilen sinüs dalgasına ait (9, 129) noktası için, deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu verilmektedir.

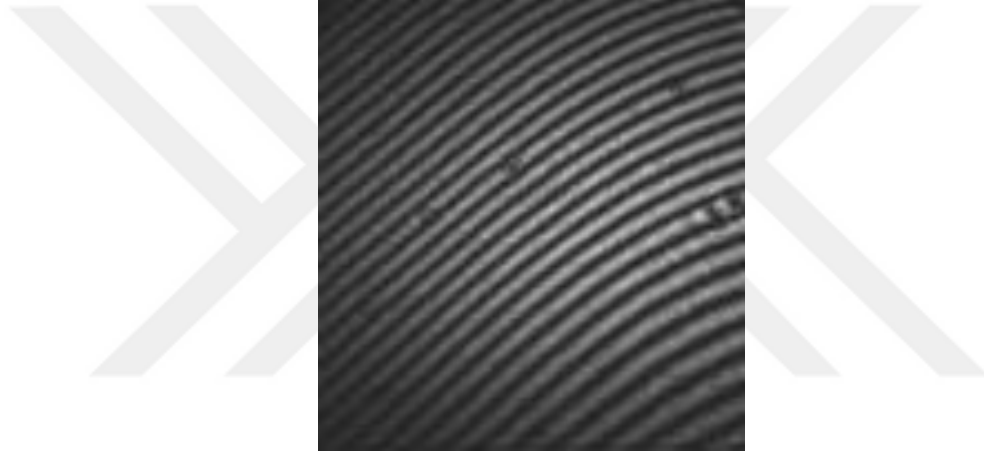


Şekil 4.9 Frekans değeri 500 Hz ile 1 KHz arasında değişen sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

5 saniyelik hologram kaydı süresince fonksiyon jeneratörü ile farklı frekans değerlerini içererek üretilen sinüs dalgasına ait geri elde edilen frekans spektrumundan, maksimum genlik değerini veren noktaların yaklaşık olarak 503 Hz ve 909 Hz olduğunu görmekteyiz. Kısacası, holografik kaydı yapılan ses dalgasının sahip olduğu frekans değeri, 500 Hz sinüs dalgası için % 0.6’lık ve 1 KHz sinüs dalgası için %9.1’lik bir hata payı bulunmuştur. Sistemi etkileyen gürültülerin varlığı, frekans spektrumunda bulunan frekans değerlerinin düşük hata oranıyla bulunmasına neden olmuştur. Diğer taraftan kaydedilen hologramlardan geri elde edilen zamansal faz profilini (ses dalgası) kullanarak sesi tekrar dinlediğimizde, ortama verdiğimiz değişken frekanslı ses ile aynı olduğunu, yani ses dalgasının bas sestem tiz sese doğru değiştiğini söyleyebilmekteyiz. Ayrıca bu sesin gerçekten 5 saniyelik bir ses dalgası olduğunu da söylemek mümkündür.

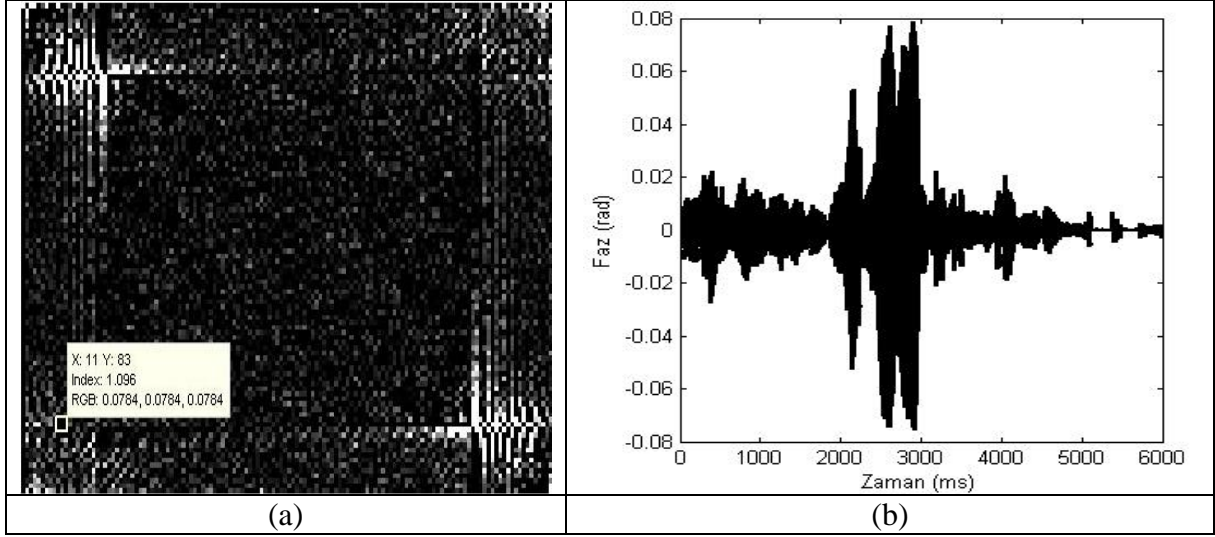
4.4 MP3'E KAYDEDİLMİŞ "a_e_i" SESİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bu aşamada obje kolunda faz farkı yaratmak için ortama, bir hoparlör yardımıyla MP3'e kaydedilmiş 3sn'lik "a, e, i" sesi verilmiştir. 3 saniye boyunca a, e ve i harfleri sırasıyla telaffuz edilmiştir. Bu ses dalgasının sahip olduğu frekans değerinin 1 KHz'e yakın olduğu düşünüldüğünden örnekleme frekansı buna göre alınmıştır. Bu nedenle saniyede 2000 görüntü alacak şekilde 3 saniye boyunca toplan 6000 hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Kaydedilen hologramlardan geri elde edilen genlik dağılımı kullanılarak en aydınlık olduğu düşünülen nokta çıkartılmıştır. Bu nokta (11,83) olarak belirlenmiştir. Bu ses dalgası için kaydı yapılan hologramlardan örnek olarak 3000. hologram deseni seçilerek Şekil 4.10'te sunulmuştur.



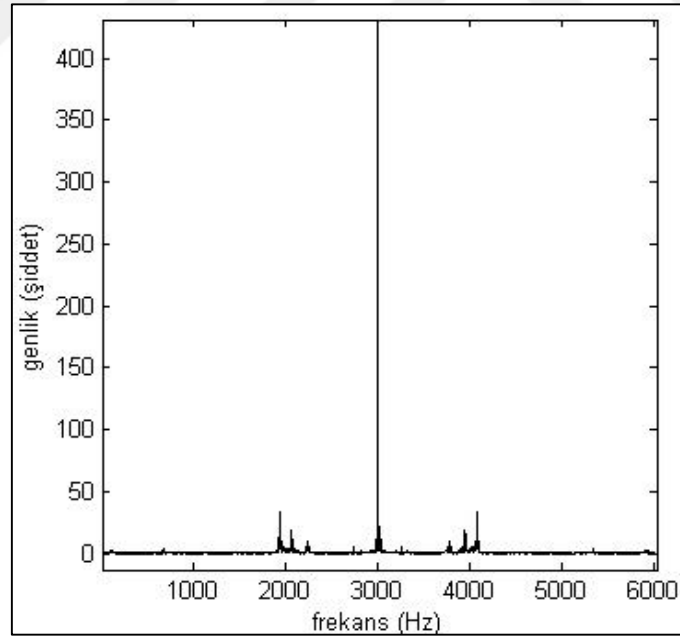
Şekil 4.10 "a, e, i" sesi için deneysel sistem ile kaydedilen 3000. hologram deseni.

Şekil 4.11a'da deneysel sistem ile kaydedilen 3000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı (11,83) noktası işaretlenerek gösterilmiştir. Bu noktanın kullanılmasıyla, deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ise Şekil 4.11b'de verilmiştir.



Şekil 4.11 “a_e_i” sesi için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 300. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (11,83) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).

Deneysel sistemde kullanılan a_e_i sesi için, (11,83) noktası kullanılarak bu sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu ise Şekil 4.12’de sunulmuştur.

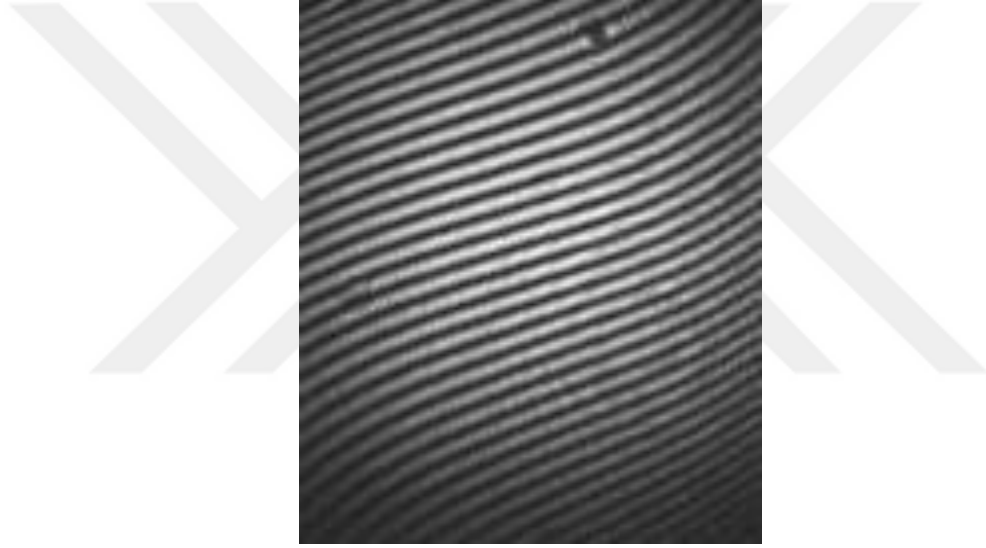


Şekil 4.12 “a, e,i” sesi için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

“a, e,i” sesi için deneysel sistem ile kaydedilen hologramlardan geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) kullanılarak bu ses tekrar dinlendiğinde, obje koluna bir hoparlör vasıtasıyla aktarılan ses dalgası ile aynı olduğu söylenebilmektedir.

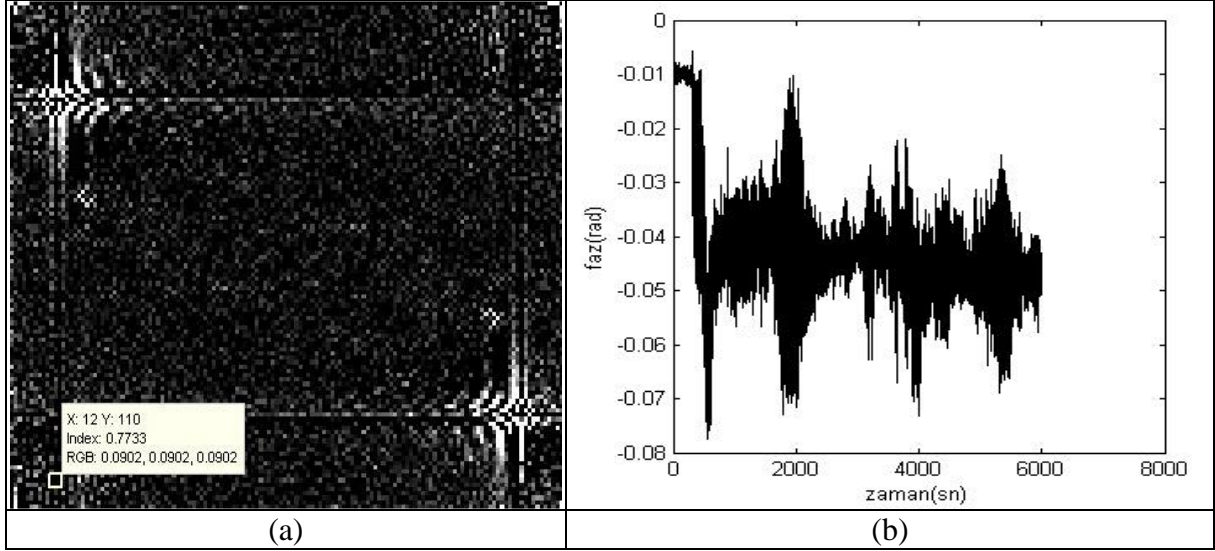
4.5 MP3'E KAYDEDİLMİŞ “Okula Gidiyorum” CÜMLESİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bu çalışmanın geçerliliğini ve doğruluğunu daha da kuvvetlendirmek için farklı ses dalgalarının sayısal holografik kaydı yapılmıştır. Bu bağlamda obje koluna ses dalgası olarak “Okula gidiyorum” cümlesi verilmiştir. Ayrıca MP3'e kaydedilen bu ses dalgası 3 saniyelik bir cümle olup bir hoparlör yardımıyla obje koluna gönderilmiştir. Sahip olduğu frekans değeri ise 1 KHz'dir ve uygun örnekleme frekansı bu doğrultuda alınmıştır. 3 saniye boyunca deneysel sistem ile 6000 adet hologram kaydı gerçekleştirilen “Okula gidiyorum” cümlesi için örnek olarak alınmış 3000. hologramın deseni Şekil 4.13'te sunulmuştur.



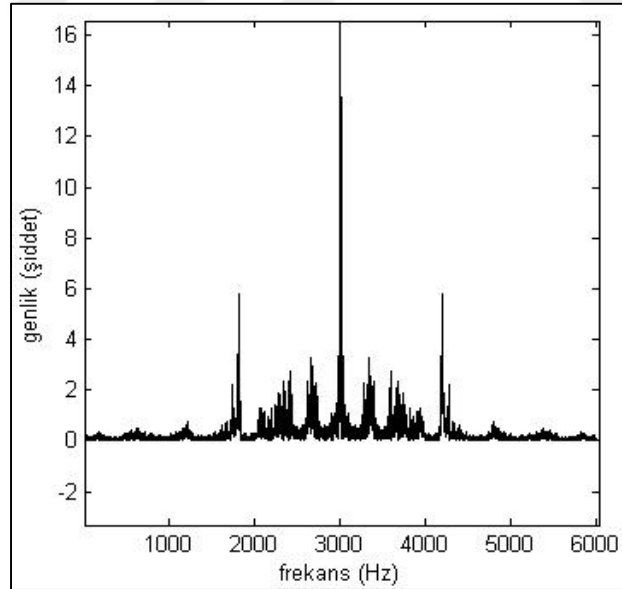
Şekil 4.13 “Okula gidiyorum” cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen 3000. hologram deseni.

Şekil 4.14a'da “okula gidiyorum” cümlesi için deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan geri elde edilmiş genlik dağılımı (12,110) noktası işaretlenerek gösterilmiştir. Şiddetin en yoğun olduğu bu noktanın kullanılmasıyla, kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ise Şekil 4.14b'de verilmiştir.



Şekil 4.14 “Okula gidiyorum” cümlesi için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar
a) holografik kaydı yapılan 3000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı
b) (12,110) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).

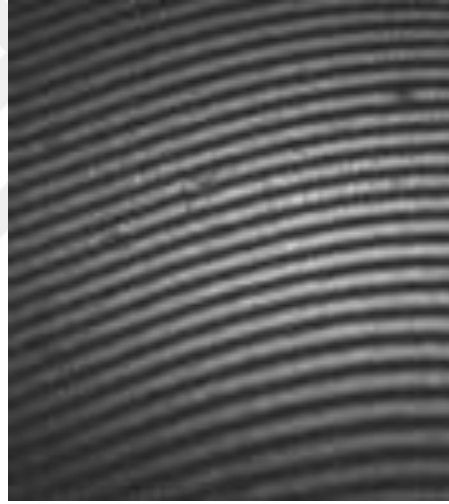
Deneysel sistemde kullanılan “Okula gidiyorum” cümlesi için, (12,110) noktası kullanılarak bu sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu ise Şekil 4.15’te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 “Okula gidiyorum” cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

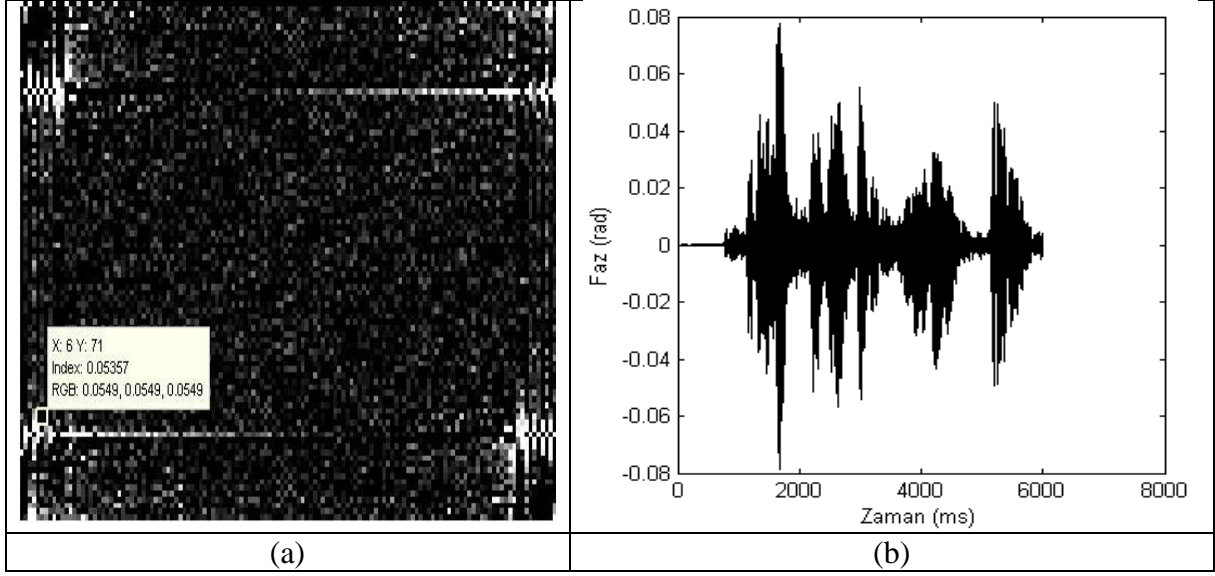
4.6 MP3'E KAYDEDİLMİŞ "Bülent Ecevit University" CÜMLESİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bu çalışmada MP3'e kaydedilen diğer örnek bir cümle de "Bülent Ecevit University" cümlesidir. Bu cümlede "Okula gidiyorum" cümlesinden farklı olarak yuvarlak, sesli ünlü harfler bulunmaktadır. (Bkz. "ü" harfi). Önerilen sistem ile obje koluna verilen her türlü cümlenin ve ses sinyallerin holografik kaydı ve geri elde edilmesi amaçlandığından, bu çalışmada ikinci cümle olarak "Bülent Ecevit University" cümlesi kullanılmıştır. 3 saniyelik bir ses dalgası olan bu cümle için saniyede 2000 adet hologram kaydı yapılmış ve toplamda CMOS kamera ile 3 saniyede 6000 adet hologram çekilmiştir. Deneysel sistem ile kaydı yapılan hologram serisinden 3000. hologram deseni örnek olarak seçilmiş ve Şekil 4.16'da sunulmuştur.



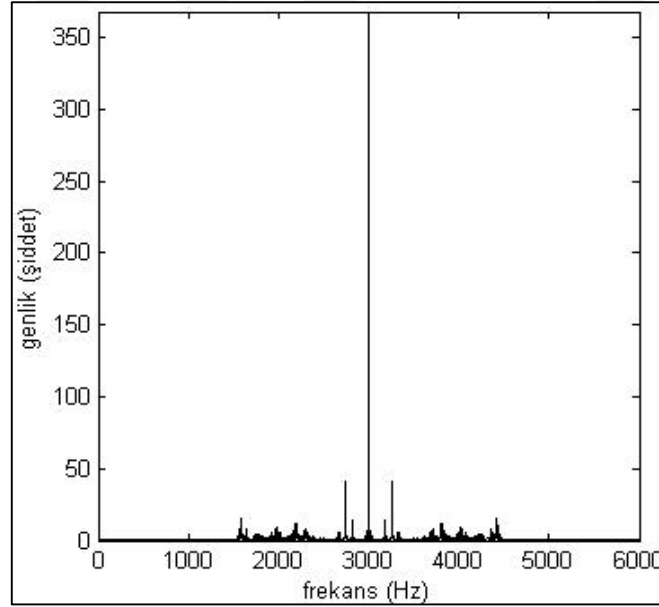
Şekil 4.16 "Bülent Ecevit University" cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen örnek 3000. hologram deseni.

"Bülent Ecevit University" cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen 3000. hologramdan geri elde edilmiş genlik dağılımı (6,71) noktası işaretlenerek Şekil 4.17a'da gösterilmiştir. Şiddetin en yoğun olduğu bu nokta için hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ise Şekil 4.17b'de verilmiştir.



Şekil 4.17 “Bülent Ecevit University” cümlesi için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 3000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (6,71) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).

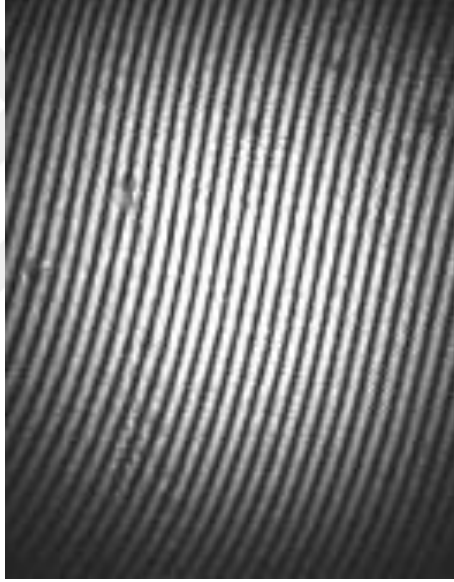
“Bülent Ecevit University” cümlesi için deneysel sistem ile 3sn boyunca kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu Şekil 4.18’de verilmektedir.



Şekil 4.18 “Bülent Ecevit University” cümlesi için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

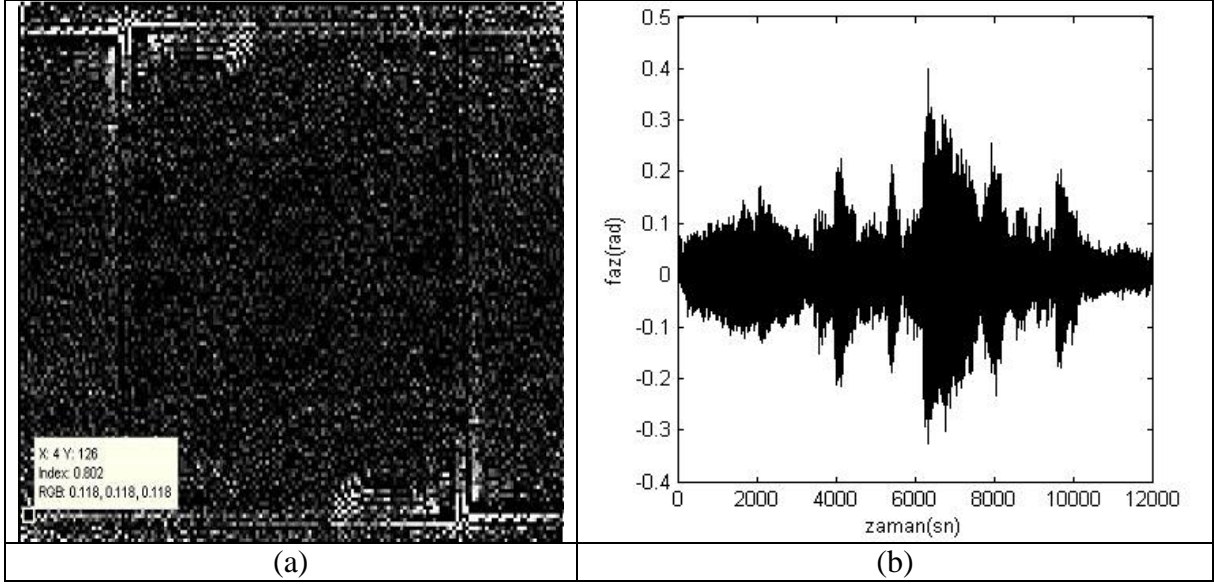
4.7 MÜZİK PARÇASI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Tez çalışmasının ilk amacı, ortama verilen bir müzik parçasının sayısal holografik kaydının yapılması ve geri elde edilerek dinlenilmesidir. Bu aşamada obje koluna bir hoparlör yardımıyla müzik parçası verilerek, bu amaç gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda 2 saat 40 dakika uzunluğundaki “The best of Piano” müzik parçasının 7-13 saniye arasındaki ezgisi seçilerek sayısal holografik kaydı yapılmıştır [152]. Yaklaşık 1 KHz değerine sahip olan müzik parçası için uygun örnekleme frekansı ile saniyede 2000 adet hologram kaydedilmiştir. Ortama verilen bu ses dalgası 6sn’lik bir ses olduğundan 6 saniye boyunca toplamda 12000 adet hologram kaydı yapılmıştır. Müzik parçasının seri olarak kaydedilen hologramlarından 9810. Hologram deseni örnek olarak seçilerek şekil 4.19’da sunulmuştur.



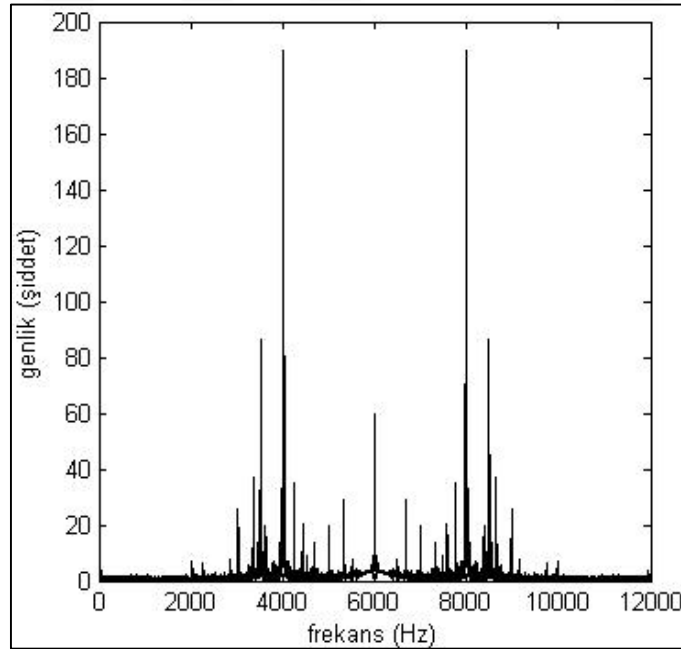
Şekil 4.19 “The best of Piano” parçası için deneysel sistem ile kaydedilen örnek 9810. hologram deseni.

“The best of Piano” müzik parçası için deneysel sistem ile kaydedilen 9810. hologramdan geri elde edilmiş genlik görüntüsü (4,126) noktası işaretlenerek Şekil 4.20a’da gösterilmiştir. Şiddetin en yoğun olduğu bu nokta için hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ise Şekil 4.20b’de verilmiştir.



Şekil 4.20 “The best of Piano” parçası için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar a) holografik kaydı yapılan 9810. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı b) (4,126) noktası kullanılarak hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası).

Şekil 4.21’de ise bu parçanın, deneysel sistem ile 6sn boyunca kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu verilmektedir.



Şekil 4.21 “The best of Piano” müzik parçası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

4.8 ULTRASONİK SES DALGALARI İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

İnsan kulağının duyabileceği aralıktaki ses dalgalarına (20 Hz-20 KHz) ek olarak bu çalışmada, önerilen sistem ile ultrasonik ses dalgalarının da hologram kaydı yapılmıştır. Günümüzde ultrasonik seslerin görüntülenmesi birçok alan için önem arz etmektedir. Özellikle sağlık uygulamalarındaki medikal tanılar ve sualtı görüntülemesi için yapılan çalışmalara bakıldığında bu önemi kavramak mümkündür [156-160]. Ultrasonik sesler üzerinde, Meyer ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma dikkat çekmiştir. Burada lazer etkisiyle oluşturulan ultrasonik seslerin oluşturduğu darbeler, ultrasonik holografi tekniği kullanılarak kontrol edilebilmiştir [161]. Yamamoto ise akışkan dalga kılavuzundaki ultrasonik dalgaların yayılımı için optik görselleştirme yapmıştır [162]. Son zamanlarda ise Zang ve arkadaşları düşük frekans aralığındaki ultrasonik su altı görüntülemesi için bir çalışma yaparken [163], Wang ve arkadaşları 3boyutlu ultrasonik dalga alanlarını darbeli lazer holografik mikroskopi kullanarak ölçmüştür [164]. Bu tez çalışmasında ise literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak sayısal holografi tekniğine dayalı optik ses kaydedici ile holografik kaydı yapılan ultrasonik ses dalgalarının sahip olduğu frekans değeri bulunmuştur.

Bu çalışmada görüntüleme sensörü olarak kullanılan CMOS kamera saniyede maksimum 80000 görüntü alabildiğinden Nyquist kriterleri de göz önüne alınarak 20 KHz ila 39 KHz arasındaki frekans değerlerine sahip ultrasonik sesler incelenmiştir. Bu nedenle sırasıyla 21 KHz, 25 KHz, 35 KHz ve 39 KHz frekans değerlerine sahip ultrasonik ses dalgalarının sayısal holografik kaydı ve geri elde edilmesi işlemleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ortama verilen bu seslerin her biri için frekans spektrumu çizdirilmiştir ve geri elde edilen sesin haritalandırılması yapılarak holografik kaydı yapılan ses dalgasının sahip olduğu frekans değerinin bu frekans spektrumunda görülüp görülmediği incelenmiştir.

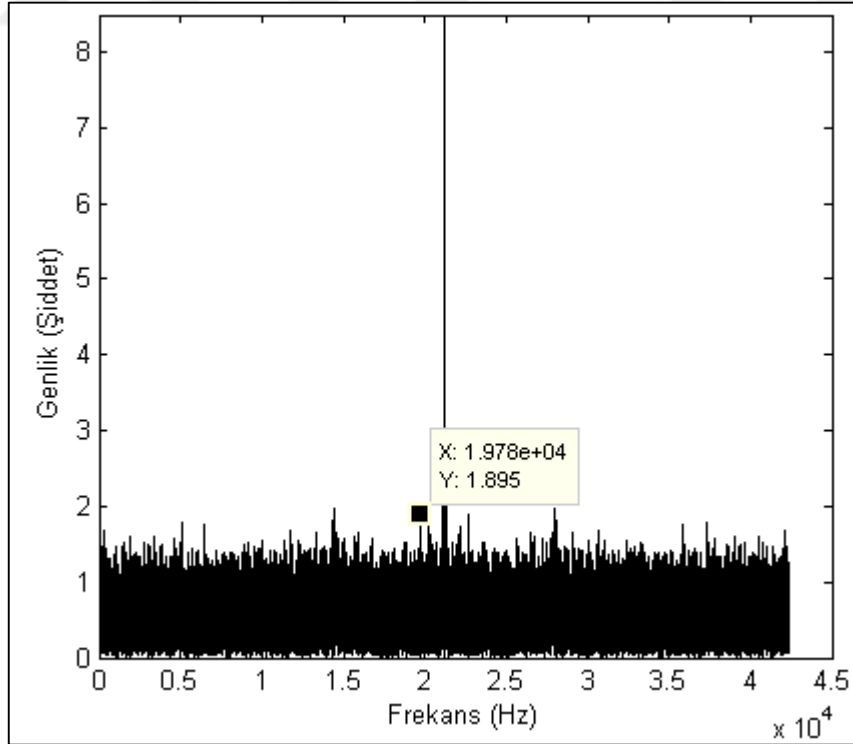
Bu aşamada ilk olarak foksiyon jeneratörü ile üretilmiş 21 KHz sinüs dalgasının hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Nyquist kriteri göz önünde bulundurularak 21 KHz sinüs dalgası için saniyede 42400 görüntü alarak hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. CMOS kameranın ayarları yapılırken saniyede alınan görüntü sayısı çok olduğundan kaydedilecek hologramın piksel boyutları 32X32 olarak seçilmiştir. Kaydı yapılan hologram serisinden frekans spektrumu eldesi için, örnek olarak seçilen bir hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı kullanılarak en aydınlık olduğu düşünülen nokta belirlenmiştir. Bu nokta 21 KHz frekans değerine sahip sinüs dalgası için (3,30) olarak alınmıştır. Bu ses dalgası için deneysel sistem ile holografik

kaydı yapılan 10000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı, (3,30) noktası işaretlenerek Şekil 4.22’de sunulmuştur.



Şekil 4.22 21 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 10000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı.

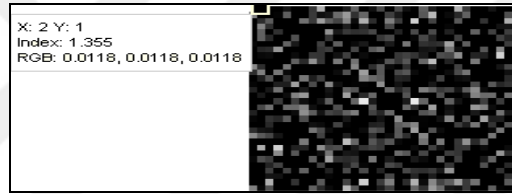
Sesin haritalandırılması için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden, (3,30) noktasının kullanılmasıyla frekans spektrumu elde edilmiştir. Bu spektrum Şekil 4.23’te sunulmuştur.



Şekil 4.23 21 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

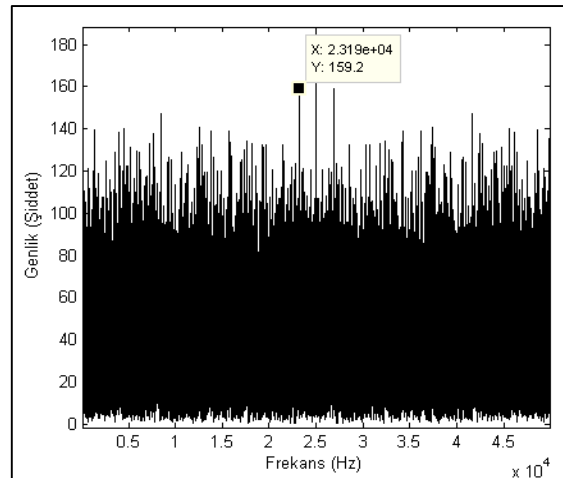
Şekil 4.23'te bulduğumuz frekans değeri, frekans spektrumuna göre %5.8'lik bir hata payı ile 19780 Hz olarak tespit edilmiştir. Yani ortama verilen ve fonksiyon jeneratörü ile üretilen 21 KHz frekans değerindeki sinüs dalgasına çok yakın bir değerde çıktığı gözlemlenmiştir.

Ultrasonik ses sinyallerinin analizi için kullanılan ikinci ses dalgası fonksiyon jeneratörü ile üretilmiş 25 KHz frekans değerine sahip sinüs dalgasıdır. Bu ses dalgası için saniyede 50000 görüntü alarak hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Bu ses sinyali için CMOS kamera ile kaydedilen hologramın piksel boyutları 32X32'dir. Kaydı yapılan hologram serisinden örnek olarak seçilen 20000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı kullanılarak en aydınlık nokta seçilmiştir. Bu nokta (2,1) olarak belirlenmiştir. Bu ses dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 20000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı, (2,1) noktası işaretlenerek Şekil 4.24'te sunulmuştur.



Şekil 4.24 25 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 20000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı.

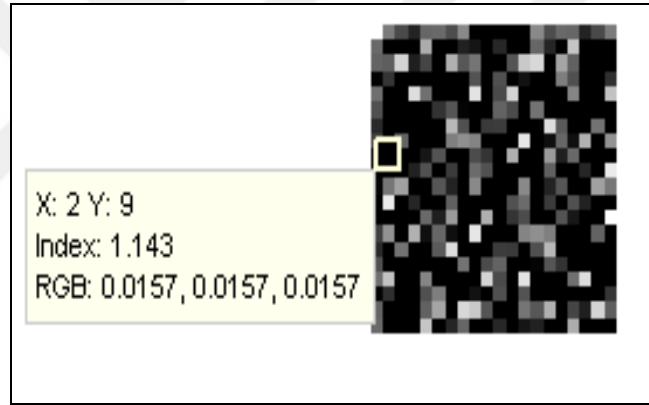
Deneysel sistemde holografik kaydı yapılan 25 KHz frekans değerindeki sinüs dalgasının haritalandırılması için kaydedilmiş hologram serisinden, (2,1) noktasının kullanılmasıyla elde edilen frekans spektrumu ise şekil 4.25'de sunulmuştur.



Şekil 4.25 25 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

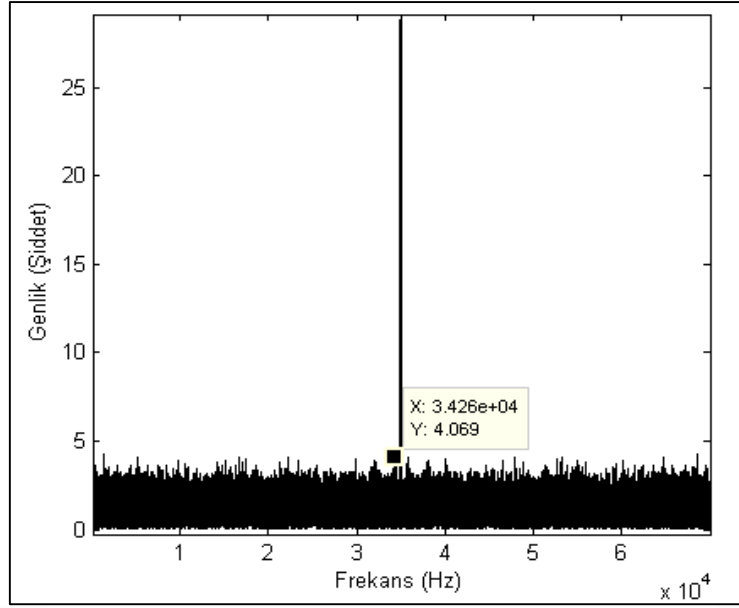
Şekil 4.25'te görüldüğü gibi geri elde edilen sesin maksimum frekans değeri %7.2'lik bir hata payı ile 23190 KHz olarak bulunmuştur. Frekans spektrumunda görülen çok küçük miktardaki bu frekans kayması sistemde var olan gürültülerden kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada obje koluna verilen bir diğer ultrasonik ses, fonksiyon jeneratörü ile üretilmiş 35 KHz frekans değerine sahip sinüs dalgasıdır. Bu ses dalgası için CMOS kamera ile kaydedilen hologramın piksel boyutları 20X20'dir. Bununla birlikte saniyede 70018 görüntü olarak hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Kaydı yapılan hologram serisinden örnek olarak seçilen 30000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı kullanılarak en aydınlık nokta belirlenmiştir. Bu nokta (2,1) olarak seçilmiştir. Bu ses dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 30000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı, (2,9) noktası işaretlenerek Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 35 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 30000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı.

Deneysel sistemde holografik kaydı yapılan 35 KHz frekans değerindeki sinüs dalgasının haritalandırılması için kaydedilmiş hologram serisinden, (2,9) noktasının kullanılmasıyla elde edilen frekans spektrumu ise şekil 4.27'de sunulmuştur.



Şekil 4.27 35 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

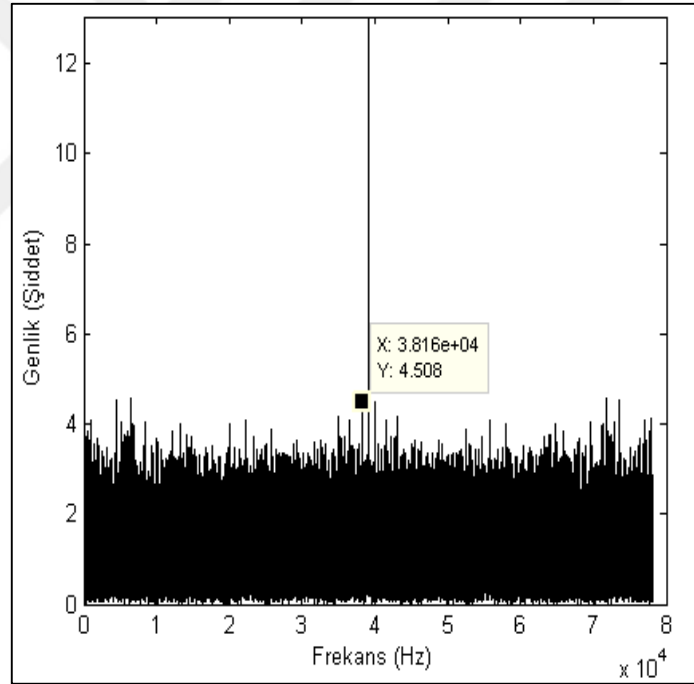
Şekil 4.27’de görüldüğü gibi geri elde edilen sesin maksimum frekans değeri, %2.1’lik bir hata payı ile 34260 KHz olarak bulunmuştur. Yani bu frekans değerinin, deneysel sistemde kullanılan 35 KHz’lik ses dalgasının sahip olduğu frekans değerine çok yakın bir değerde çıktığı gözlemlenmiştir.

Ultrasonik seslerin görselleştirilmesi için analizi yapılan ses dalgası fonksiyon jeneratörü ile üretilmiş 39 KHz frekans değerine sahip sinüs dalgasıdır. Bu ses dalgası için CMOS kamera ile kaydedilen hologramın piksel boyutları 12X12’dir. Ayrıca saniyede 78090 görüntü olarak hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Kaydı yapılan hologram serisinden örnek olarak seçilen 35000. hologramdan geri elde edilen genlik görüntü kullanılarak en aydınlık nokta belirlenmiştir. Bu nokta (5,8) olarak alınmıştır. Bu ses dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 35000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı, (5,8) noktası işaretlenerek Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.28 39 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile holografik kaydı yapılan 35000. hologramdan geri elde edilen genlik dağılımı.

Şekil 4.29'da, deneysel sistemde holografik kaydı yapılan 39 KHz frekans değerindeki sinüs dalgasının haritalandırılması için kaydedilmiş hologram serisinden, (5,8) noktasının kullanılmasıyla elde edilen frekans spektrumu sunulmuştur



Şekil 4.29 39 KHz sinüs dalgası için deneysel sistem ile kaydedilen hologram serisinden elde edilen frekans spektrumu.

Şekil 4.29'da görüldüğü gibi geri elde edilen sesin maksimum frekans değeri % 2.2'lik bir hata payı 38160 KHz olarak bulunmuştur. Yani frekans spektrumunda okunan maksimum frekansın, holografik kaydı yapılan 39 KHz sinüs dalgasının sahip olduğu frekans değerine çok yakın bir değerde elde edildiği gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 5

YENİDEN YAPILANDIRMA (RECONSTRUCTION) METOTLARININ GÜRÜLTÜ BASTIRMA KABİLİYETLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tezin ikinci kısmında, ses hologramlarından ses dalgalarının geri elde edilmesi için reconstruction sürecinde kullanılan metotların gürültü bastırma kabiliyetleri araştırılmıştır. Analizi yapılacak metotların matematiksel ifadeleri daha önce bölüm 2.5.2’de anlatılmıştır. Bu metotlar sırasıyla Fourier Dönüşüm metodu (FDM), Fresnel Dönüşüm metodu (F-DM) ve bir boyutlu sürekli dalgacık dönüşüm metodudur (1B-SDDM).

Sistemde kaydı yapılan ses hologramlarından yeniden yapılanma süreci ile elde edilen zamansal faz dağılımları sadece holografik kaydı yapılan ses dalgasına ait profili değil, aynı zamanda teknik gürültüyü, koherent gürültüyü ve çevresel faktörlerin yarattığı gürültüyü de içermektedir [165-170]. Teknik gürültü genellikle foton gürültüsü olarak adlandırılmaktadır. Bu gürültüde kayıt sensörünün elektronik gürültüsü ve analog-dijital dönüşüm işleminden kaynaklanan gürültü mevcuttur [165]. Koherent gürültü ise benek gürültüsü olarak bilinmektedir. Sistemi etkileyen bu gürültülerden, özellikle çevresel faktörlerin neden olduğu gürültüyü ortadan tamamen kaldırmak ise imkansızdır.

Bilindiği gibi sayısal holografi ile geri elde edilen görüntülerde meydana gelen ve bahsi geçen durumlardan kaynaklanan gürültüleri azaltmak için bu zamana kadar çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır [171-175]. Bu tez çalışmasında ise kaydı yapılan ses hologramlarından sinyal işleme algoritmaları ile geri elde edilen zamansal faz profilinde (ses dalgası) görülen, sistem gürültüsünü de içinde barındıran gürültülerin analizi yapılmıştır. Fakat buradaki amaç gürültüleri yok etmek değil, geri elde etme sürecinde kullanılan ve holografi uygulamalarında gürültü yok etmek için çok tercih edilen sinyal işleme algoritmaları ile sistem çıkışında elde edilen zamansal faz profilindeki gürültünün analizini yapmaktır. Yani kullanılan algoritmalarından hangisinin sistemde var olan gürültüyü daha iyi bastırdığını incelemektir. Bu bağlamda geri elde edilen zamansal faz profilinin (ses dalgasının) deneysel sistemde kullanılan

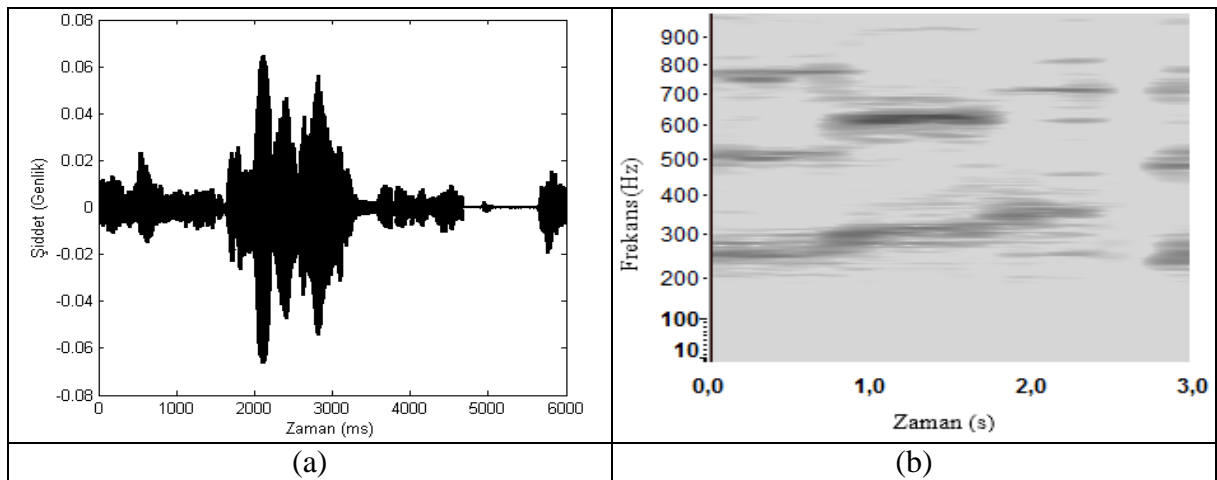
ses ne kadar yaklaştığını görmek için işaret gürültü oranları (İGO) hesaplanmıştır (Bkz. Denklem 4.1) [75,76].

$$SNR = \frac{\sum_{n=1}^{n=6000} (P_{E[n]})^2}{\sum_{n=1}^{n=6000} (|P_{0[n]} - P_{E[n]}|)^2} \quad (4.1)$$

Burada, $P_{0[n]}$, MP3'e kaydedilmiş ve ortama bir hoparlör yardımı ile aktarılarak deneysel sistemde kaydedilen ses dalgasıdır. (Bkz. Şekil 4.30), $P_{E[n]}$ ise geri elde etme sürecinde kullanılan algoritmalar ile sistem çıkışında elde edilen zamansal faz profilidir. Ayrıca, $[n]$ ayrık zaman indeksi olarak tanımlanmaktadır.

Tez çalışmasının bu aşamasında sistemdeki gürültünün ne kadar bastırıldığını incelemek için kullanılan ilk yöntem FDM'dir. Ayrıca bu aşamada hologram kaydı yapılacak ses dalgası olarak "a,e,i" sesi seçilmiştir. 3sn'lik bir ses olan "a, e, i" ses dalgası için 3 saniye boyunca toplam 6000 görüntü alınarak hologram kaydı gerçekleştirilmiştir.

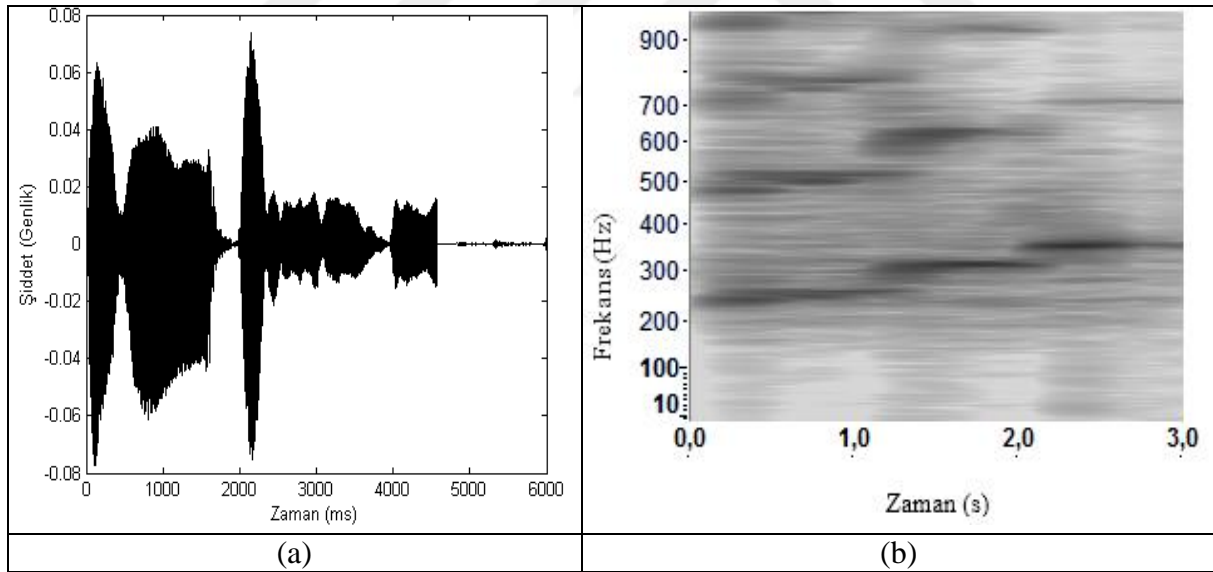
Deneysel sistemde kullanılmak üzere, MP3 ile kaydedildikten sonra ortama bir hoparlör vasıtasıyla aktarılan "a,e,i" ses dalgasının MATLAB'a kaydedilmiş görüntüsü ve bu ses dalgasına ait spektrogramı Şekil 5.1'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5.1 Deneysel sistemde kaydedilmiş insan sesine ("a,e,i") ait sonuçlar a) Deneysel sistem ile kaydı yapılan ses dalgası b) bu ses dalgasına ait spektrogram.

Ayrıca “a,e,i” ses dalgasının deneysel olarak hologramlarının kaydedilmesine ek olarak, MATLAB ortamında simülasyon yapılarak da ses hologramları üretilmiştir. Burada hologramı üretilen ses dalgasının 1 KHz frekans değerine sahip olduğu düşünülmüştür. Bu doğrultuda Nyquist kriteri göz önüne alınarak saniyede 2000 örnek alınarak ses hologramı yaratılmıştır. Simülasyon ile 3 saniyelik ses dalgası için 6000 hologram üretilmiştir. MATLAB ile hologram üretmek için Eşitlik 2.19 kullanılmıştır. Bu denklemde ses hologramları, ses dalgası (MP3’e kaydedilen insan sesi) ile oluşturulan obje dalgası ($A_{OB}(x, y)$) ve referans dalgasının ($A_{REF}(x, y)$) birleşimi ile yaratılmıştır. Simülasyon çalışmasında, CMOS kamera deneysel sistemde olduğu gibi yüksek hızda görüntü alabilen görüntü sensörü olarak kabul edilmiştir ve görüntüler 96X136 piksel çözünürlüğünde elde edilmiştir. Her bir pikselin boyutu ise 14 μm x 14 μm olarak alınmıştır.

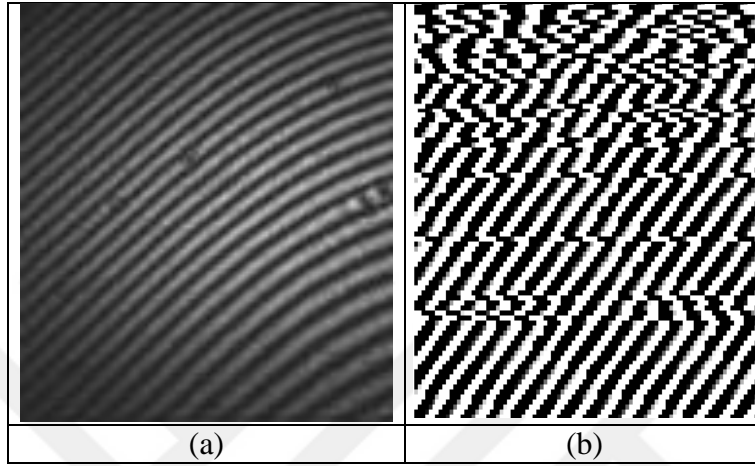
Simülasyon çalışmasında kullanılan ses dalgasının MATLAB’a direkt olarak aktarılarak çıkartılmış görüntüsü Şekil 5.2a’da verilirken, bu ses dalgasına ait ilgili spektrogramı Şekil 5.2b’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Simülasyon çalışması için kullanılan insan sesine (“a,e,i”) ait sonuçlar a) Simülasyon çalışmasında kullanılan ses dalgası b) bu ses dalgasına ait spektrogram.

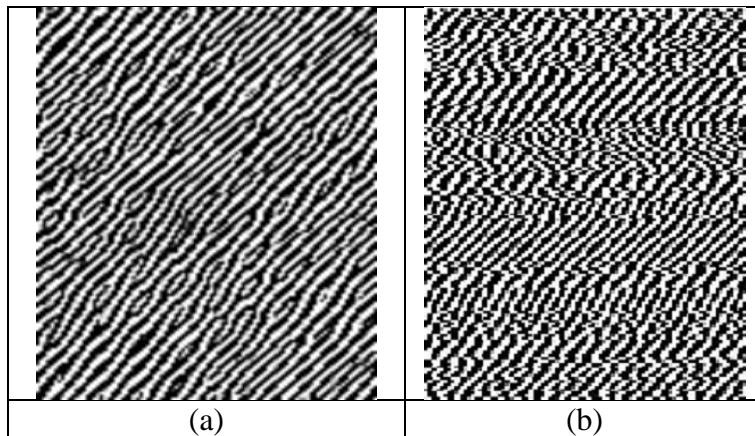
Daha önce bahsedildiği gibi kaydedilen hologramlardan zamansal faz profilini (ses dalgası) çıkartmak için geri elde edilen genlik dağılımlarından en aydınlık olduğu düşünülen nokta seçilmiştir. FDM ile deneysel sistemde holografik kaydı yapılan ses dalgasına ait hologramlardan zamansal faz profili (ses dalgası) eldesi için bu nokta (11,83) olarak

belirlenmiştir. Diğer taraftan simülasyon çalışmasında kullanılan ses dalgasına ait üretilen hologramlardan zamansal faz profili çıkartmak için (26,38) noktası kullanılmıştır. “a, e, i” sesi için deneysel ortamda kaydedilmiş hologram serisinden örnek olarak alınmış 3000. hologramın deseni Şekil 5.3a’da ve deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan FDM kullanılarak geri elde edilmiş faz dağılımı Şekil 5.3b’de sunulmuştur.



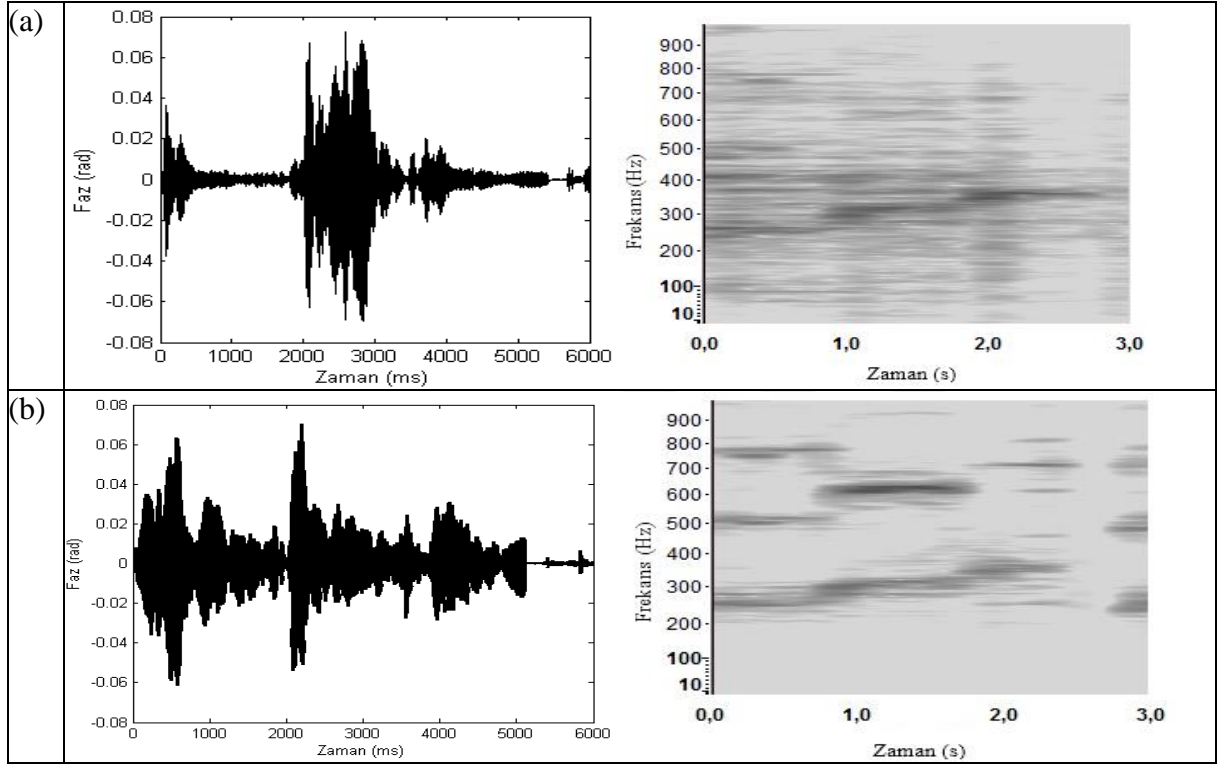
Şekil 5.3 Deneysel sistemde kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Deneysel sistemde kaydedilen örnek 3000. hologram deseni b) Deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan FDM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.

Şekil 5.4’te ise sırasıyla simülasyon ile üretilmiş hologram serisinden örnek olarak alınmış 3000. hologramın deseni ve FDM kullanılarak simülasyon ile üretilmiş 3000. hologramdan geri elde edilmiş faz dağılımı gösterilmiştir.



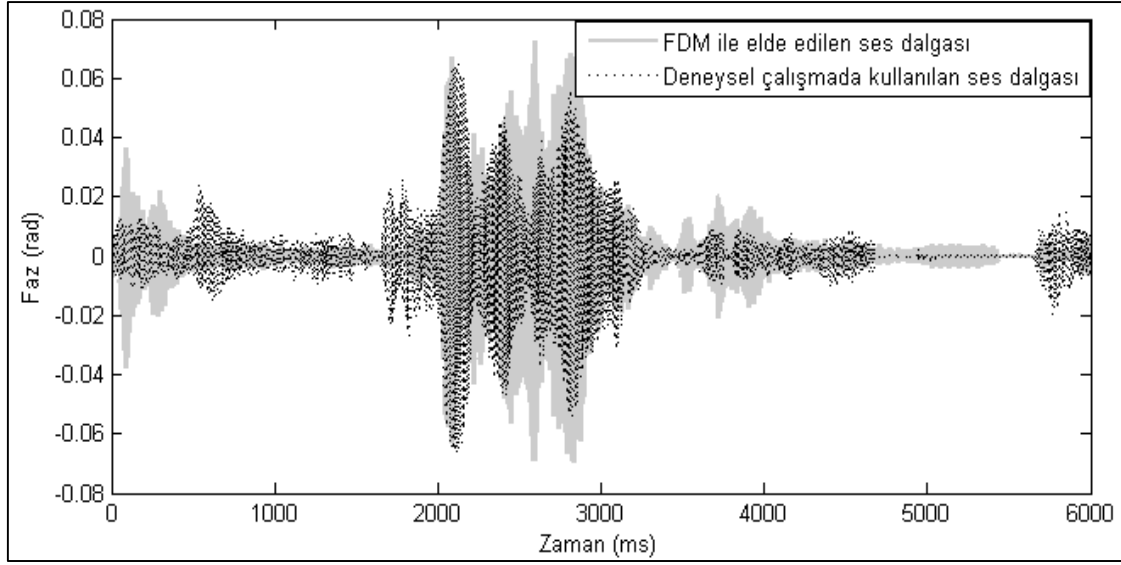
Şekil 5.4 Simulasyon çalışması için kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Simulasyon ile üretilen örnek 3000. hologram deseni b) Simülasyon ile üretilen 3000. hologramdan FDM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.

“a_e_i” ses dalgasının sayısal holografik kaydı yapıldıktan sonra, bu hologramlardan FDM ile geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ve bu ses dalgasına ait spektrogram Şekil 5.5a’da verilmiştir. Bahsi geçen şekillerin simülasyon çalışması ile elde edilmiş sonuçları ise Şekil 5.5b’de sunulmuştur.



Şekil 5.5 “a_e_i” ses dalgasının kaydı yapılan hologramlarından FDM ile geri elde edilen zamansal faz profilleri (ses dalgası) ve bu ses dalgalarına ait çıkartılan spektrogramlar a) Deneysel sistemde kaydedilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram b) Simulasyon ile üretilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram.

Bu aşamada “a, e, i” ses dalgasının deneysel olarak kaydedilmiş hologramlarından FDM ile geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) (Bkz. Şekil 5.5a), deneysel sistemde kullanılan ses dalgası (Bkz. Şekil 5.1a) ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 5.6’da verilmiştir.

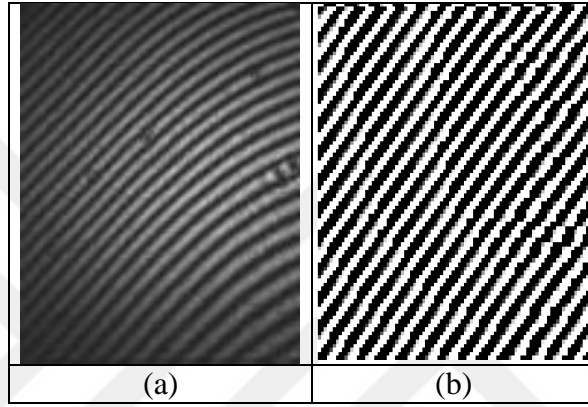


Şekil 5.6 Deneysel çalışmada kullanılan ses dalgası ve sayısal holografik kaydı yapılan ses hologramlarından FDM ile geri elde edilen zamansal faz dağılımının (ses dalgası) karşılaştırılması.

Şekil 5.6'da görsel olarak sunulan karşılaştırma, İGO değerleri hesaplanarak da verilmiştir. Deneysel sistemde kaydedilen ses hologramlarından FDM ile geri elde edilen zamansal faz profilinin (ses dalgasının), deneysel sistemde kullanılan ses dalgasına olan benzerliği İGO değerinin %66.90 olarak hesaplanmasıyla sayısal olarak da verilmiştir.

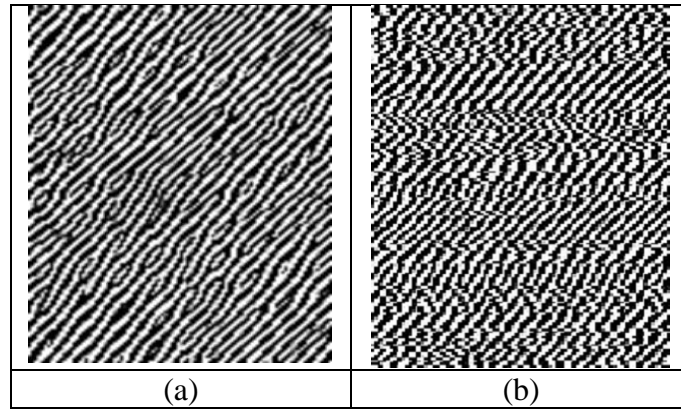
FDM metodu ile elde edilen zamansal faz profilinin (ses dalgası), $P_{0[n]}$ 'e çok benzediği (Bkz. Şekil 5.6) ve gürültü bastırma yeteneğinin oldukça iyi olduğu söylenebilmektedir. FDM yönteminde yapılan filtreleme işleminin bu sonuç üzerindeki etkisi büyüktür. Bu filtrede, sıfır derece terimi ve ikiz görüntünün bulunduğu noktalar, sayısal ortamda filtreleme işlemi ile sıfır yapılmaktadır. Ayrıca Şekil 5.5b'ye bakıldığında, Simulasyon çalışmasında üretilen hologramlardan FDM ile geri elde edilen zamansal faz profilinin, simülasyon çalışmasında kullanılan ses dalgasına göre daha fazla gürültüye sahip olduğu da görülebilmektedir. (Bkz. Şekil 5.2a). Yapılan her işlem bilgisayar simülasyonu ile gerçekleştirildiğinden simüle edilmiş ses hologramlarının neredeyse ideal olduğunu söylemek mümkündür. Buna rağmen, geri elde etme sürecinde FDM kullanılmasıyla elde edilen zamansal faz dağılımında gürültü gözlenmektedir. Bunun anlamı ise bu yöntemle elde edilen sonuçların zaten biraz gürültüye sahip olduğudur. Çünkü yeniden yapılanma sürecinde kullanılan yöntemlerin hiçbiri, sayısal holografî sistemindeki çevresel faktörlerin neden olduğu gürültüyü tamamen baskılayamamaktadır.

Gürültü analizi yapmak için bu aşamada ikinci yöntem olarak F-DM kullanılmıştır. F-DM ile sayısal holografik kaydı yapılan ses dalgasına ait zamansal faz profili (ses dalgası) çıkartmak için hologramlardan geri elde edilen genlik dağılımından (24,37) noktası seçilmiştir. Diğer taraftan bu nokta, simülasyon ile üretilen hologramlardan geri elde edilen genlik dağılımına bakılarak (10,19) olarak belirlenmiştir. Şekil 5.7a’da “a, e, i” sesi için deneysel ortamda kaydedilmiş hologram serisinden örnek olarak alınmış 3000. hologramın deseni sunulurken, Şekil 5.7b’de deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan F-DM kullanılarak geri elde edilmiş faz dağılımı gösterilmiştir.



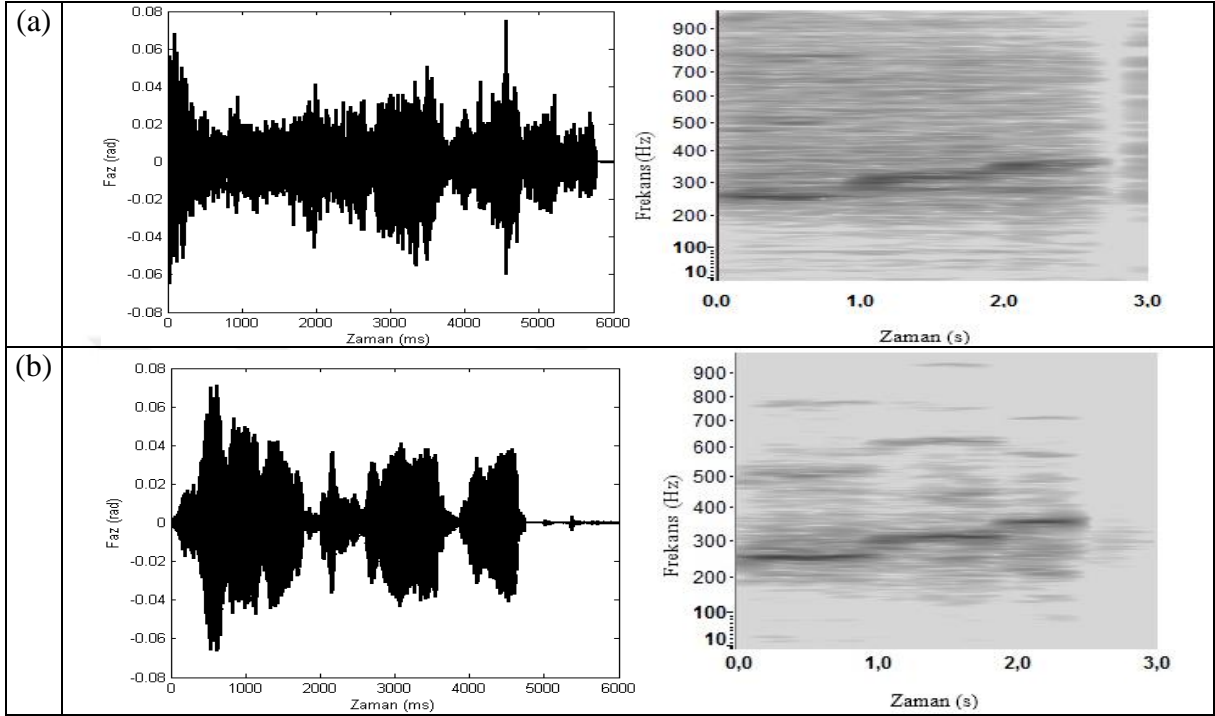
Şekil 5.7 Deneysel sistemde kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Deneysel sistemde kaydedilen örnek 3000. hologram deseni b) Deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan F-DM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.

Simülasyon ile üretilmiş hologram serisinden örnek olarak alınmış 3000. hologramın deseni ve Simülasyon ile üretilmiş 3000. hologramdan F-DM kullanılarak geri elde edilmiş faz dağılımı sırasıyla Şekil 5.8a ve Şekil 5.8b’de sunulmuştur.



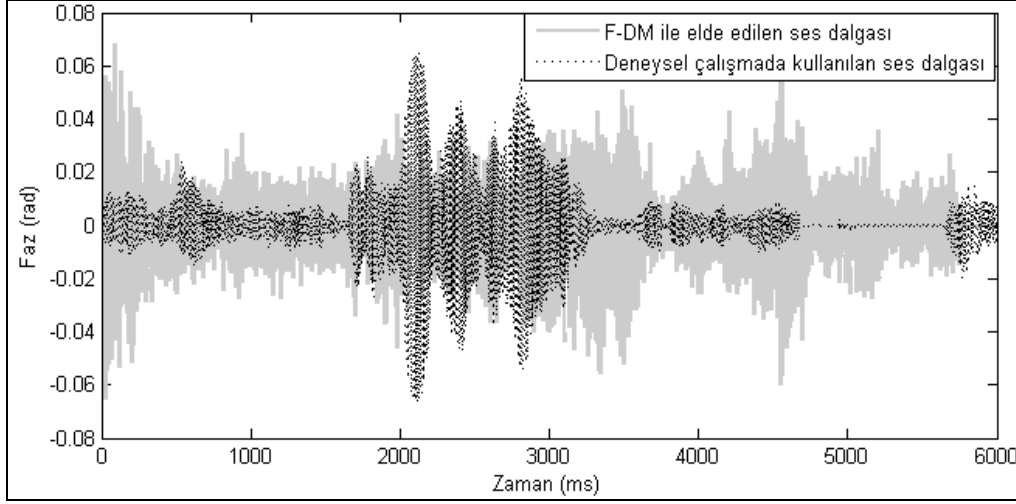
Şekil 5.8 Simulasyon çalışması için kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Simulasyon ile üretilen örnek 3000. hologram deseni b) Simülasyon ile üretilen 3000. hologramdan F-DM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.

Deneyisel sistemde kaydedilen “a_e_i” ses dalgasının hologramlarından F-DM ile geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ve bu ses dalgasına ait spektrogram Şekil 5.9a’da, simülasyon ile üretilen hologramlardan F-DM ile geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ve bu ses dalgasına ait spektrogram Şekil 5.9b’de sunulmuştur.



Şekil 5.9 “a_e_i” ses dalgasının kaydı yapılan hologramlarından F-DM ile geri elde edilen zamansal faz profilleri (ses dalgası) ve bu ses dalgalarına ait çıkartılan spektrogramlar a) Deneyisel sistemde kaydedilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram b) Simülasyon ile üretilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram.

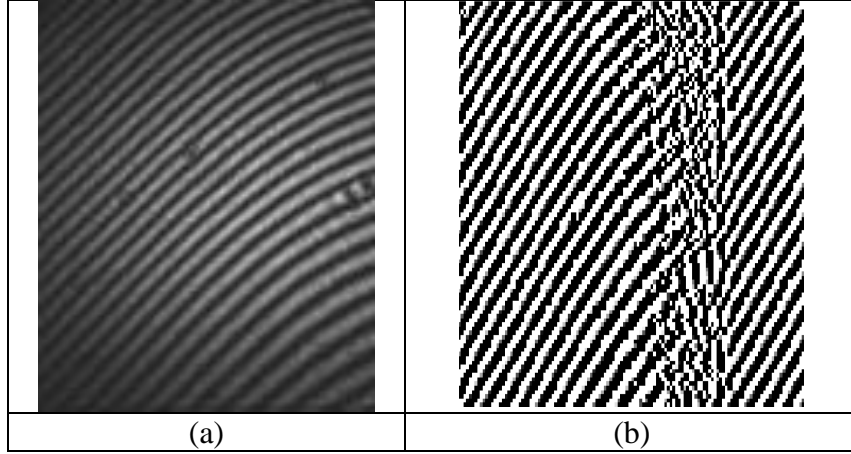
Bu aşamada “a, e, i” ses dalgasının deneysel olarak kaydedilmiş hologramlarından F-DM ile geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) (Bkz. Şekil 5.9a), deneysel sistemde kullanılan ses dalgası (Bkz. Şekil 5.1a) ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 5.10’da sunulmuştur.



Şekil 5.10 Deneysel çalışmada kullanılan ses dalgası ve sayısal holografik kaydı yapılan ses hologramlarından F-DM ile geri elde edilen zamansal faz dağılımının (ses dalgası) karşılaştırılması.

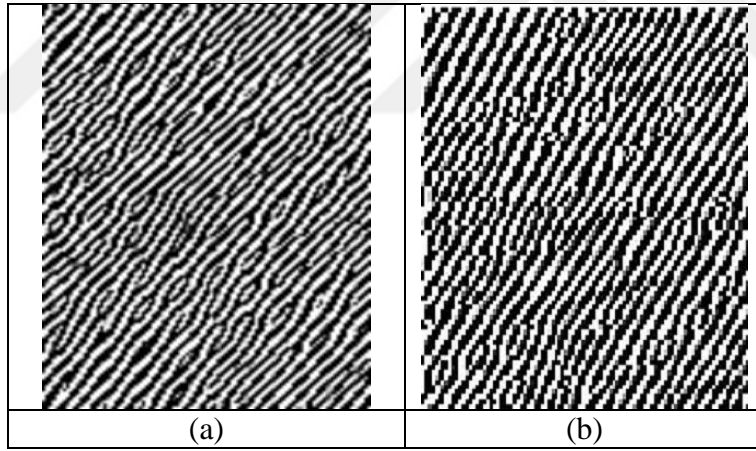
F-DM yöntemi ile bulunan sonuçlar incelendiğinde, bu yöntem ile sistem çıkışında elde edilen İGO değerinin %8,70 olarak hesaplandığı görülmektedir. İGO değerinin %10'dan daha küçük değerde çıkmasının nedeni F-DM'in sistemde var olan gürültüyü bastırma özelliğinin FDM'e göre çok düşük olmasıdır. F-DM ile elde edilen zamansal faz profilinin deneysel sistemde kaydı yapılan gerçek sese ne kadar benzediği, Şekil 5.10'a bakılarak da görülebilmektedir. Ayrıca Şekil 5.9b'de verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde de F-DM 'in, FDM'ye göre çok fazla miktarda gürültü içerdiği söylenebilmektedir. Çünkü bu metotta ses hologramı uygun bir kayıt mesafesi alınarak kaydedilmektedir ve bu mesafe geri elde etme sürecinde de kullanılmaktadır. Mesafenin yanlış alınması geri elde edilen ses dalgasının hassasiyetini bozmaktadır. Bu da hesaplanan İGO değerine etki etmektedir.

Tez çalışmasının bu aşamasında gürültü analizi yapmak için kullanılan son yöntem 1B-SDDM'dir. Deneysel çalışmadaki sonuçlarda kullanılmak üzere bu yöntem ile zamansal faz profili (ses dalgası) çıkartmak için, kaydedilen 3000. hologram deseninden geri elde edilen genlik dağılımı kullanılarak (17,23) noktası seçilmiştir. Simulasyon çalışması için kullanılan nokta ise (25,29) olarak belirlenmiştir. Şekil 5.11a'da "a, e, i" sesi için deneysel ortamda kaydedilmiş hologram serisinden örnek olarak alınmış 3000. hologramın deseni verilirken, Şekil 5.11b'de deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan 1B-SDDM kullanılarak geri elde edilmiş faz dağılımı gösterilmiştir.



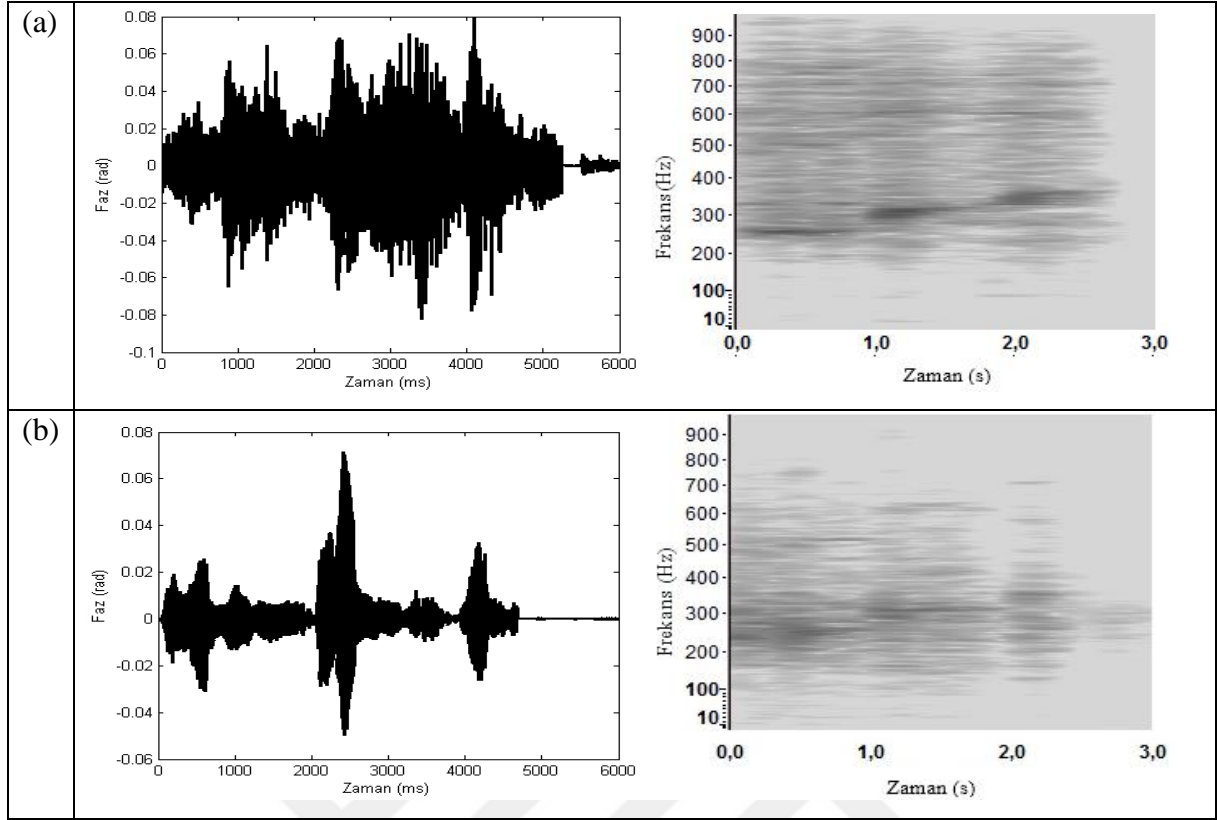
Şekil 5.11 Deneysel sistemde kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Deneysel sistemde kaydedilen örnek 3000. hologram deseni b) Deneysel sistemde kaydedilen 3000. hologramdan 1B-SDDM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.

Simülasyon ile üretilmiş hologram serisinden örnek olarak alınmış 3000. hologramın deseni ve bu hologramdan 1B-SDDM kullanılarak geri elde edilmiş faz dağılımı sırasıyla Şekil 5.12a ve Şekil 5.12b’de verilmiştir.



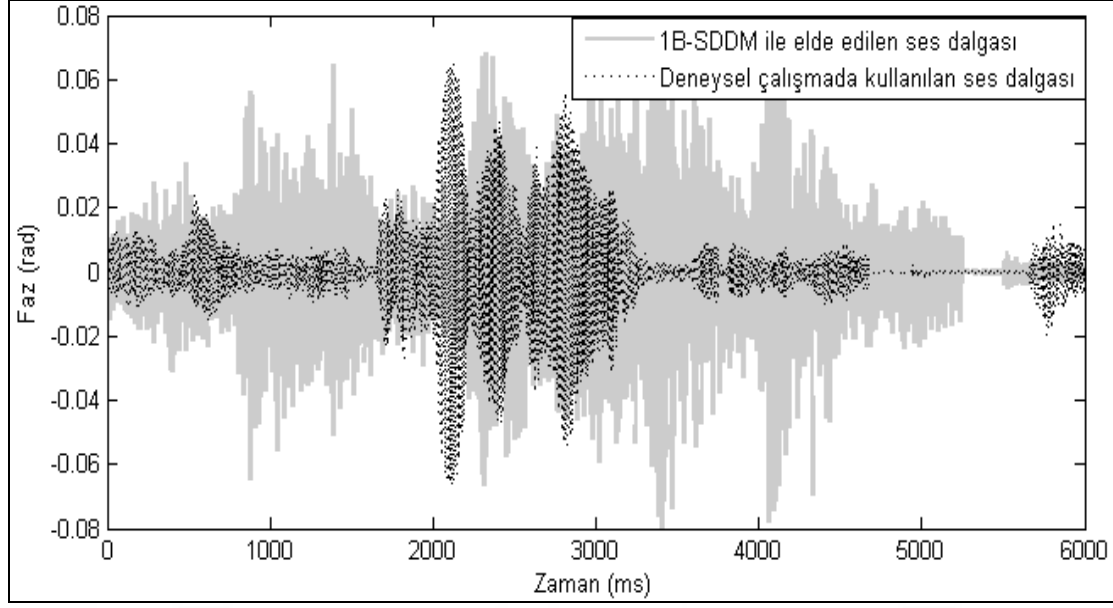
Şekil 5.12 Simülasyon çalışması için kullanılan insan sesi (“a,e,i”) ile bulunan sonuçlar a) Simülasyon ile üretilen örnek 3000. hologram deseni b) Simülasyon ile üretilen 3000. hologramdan 1B-SDDM ile geri elde edilmiş faz dağılımı.

Deneysel sistemde kaydedilen “a_e_i” ses dalgasının hologramlarından 1B-SDDM ile geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ve bu ses dalgasına ait spektrogram Şekil 5.13a’da, simülasyon ile üretilen hologramlardan 1B-SDDM ile geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) ve bu ses dalgasına ait spektrogram Şekil 5.13b’de sunulmuştur.



Şekil 5.13 “a_e_i” ses dalgasının kaydı yapılan hologramlarından 1B-SDDM ile geri elde edilen zamansal faz profilleri (ses dalgası) ve bu ses dalgalarına ait çıkartılan spektrogramlar a) Deneyisel sistemde kaydedilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram b) Simulasyon ile üretilen ses hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu ses dalgasına ait çıkartılan spektrogram.

Bu aşamada “a, e, i” ses dalgasının deneysel olarak kaydedilmiş hologramlarından 1B-SDDM ile geri elde edilen zamansal faz profili (ses dalgası) (Bkz. Şekil 5.13a), deneysel sistemde kullanılan ses dalgası (Bkz. Şekil 5.1a) ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 5.14’te sunulmuştur.



Şekil 5.14 Deneysel çalışmada kullanılan ses dalgası ve sayısal holografik kaydı yapılan ses hologramlarından 1B-SDDM ile geri elde edilen zamansal faz dağılımının (ses dalgası) karşılaştırılması.

1B-SDDM yöntemi ile bulunan sonuçlar incelendiğinde, bu yöntem ile sistem çıkışında elde edilen İGO değerinin %4.78 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bu değere bakılarak sonucun (1D-SDDM ile elde edilen zamansal faz profili) oldukça yüksek gürültüye sahip olduğu ve deneysel sistemde hologram kaydı yapılan ses dalgasından çok farklı olduğu anlaşılmaktadır (Bkz. Şekil 5.14). Yani 1B-SDD metodun sistemdeki gürültüyü bastırma kabiliyeti oldukça düşüktür. Şekil 5.14 incelendiğinde bu metot ile hassas bir sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Fakat görüntünün hassas olması ses hologramları için yapılan uygulamalar açısından değil, holografi ile görüntüleri geri elde etme uygulamaları açısından önemlidir.

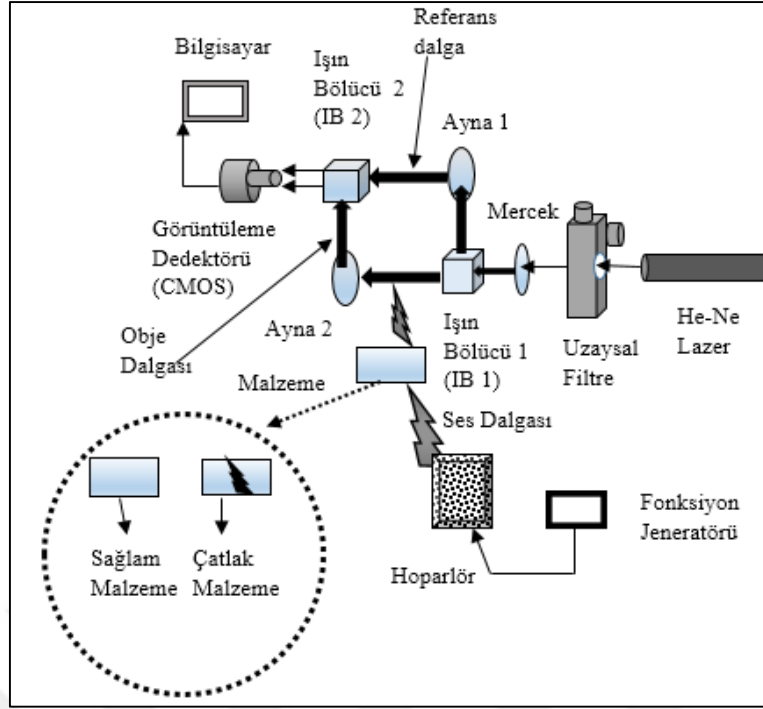
Yukarıdaki tüm durumlar göz önüne alındığında ve hologramlardan ses dalgasını geri elde etmek için kullanılan sinyal işleme algoritmaları gürültü bastırma kabiliyeti açısından karşılaştırıldığında, FDM'in en iyi sonucu verdiği açıkça görülebilmektedir.

BÖLÜM 6

OPTİK SES KAYDEDİCİ İLE MALZEMELERDE ÇEŞİTLİ SEBEPLERLE MEYDANA GELEN ÇATLAKLARIN TESPİTİ

Bu tez çalışmasının üçüncü ve son kısmında önerilen sistem ile malzemelerde bulunan çatlaklar tespit edilmiştir. Bu doğrultuda malzemenin darbe alması veya zamanla yorulmadan kaynaklanan çatlakların tespiti için üç farklı malzeme (cam, metal ve tahta) incelenmiştir. Tahribatlı ölçüm yöntemleri ve tahribatsız ölçüm sistemleri (non-destructive testing- NDT) ile iki farklı şekilde yapılan çatlak tespiti [87-89], bu çalışmada bir NDT yöntem olan temeli off-axis sayısal holografi tekniğine dayalı optik ses kaydedici ile yapılmıştır [120].

Çatlak tespitini yapmak için ilk olarak sayısal holografi ile seslerin hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Hologram kaydı için temel olarak bölüm 3.1’de anlatılan ve Şekil 3.1’de verilen Mach-Zehnder interferometrisi kullanılmıştır. Fakat burada ses dalgaları obje koluna direkt olarak verilmemiş, analizi yapılacak malzeme üzerinden geçirilerek obje koluna aktarılmıştır. Bu çalışma için Şekil 3.1’de verilen sistem yeniden düzenlenmiştir. Şekil 6.1’de yeniden düzenlenen ve çatlak tespiti için kullanılan sistem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Optik ses kaydediciye dayalı çatlak dedektörü şeması.

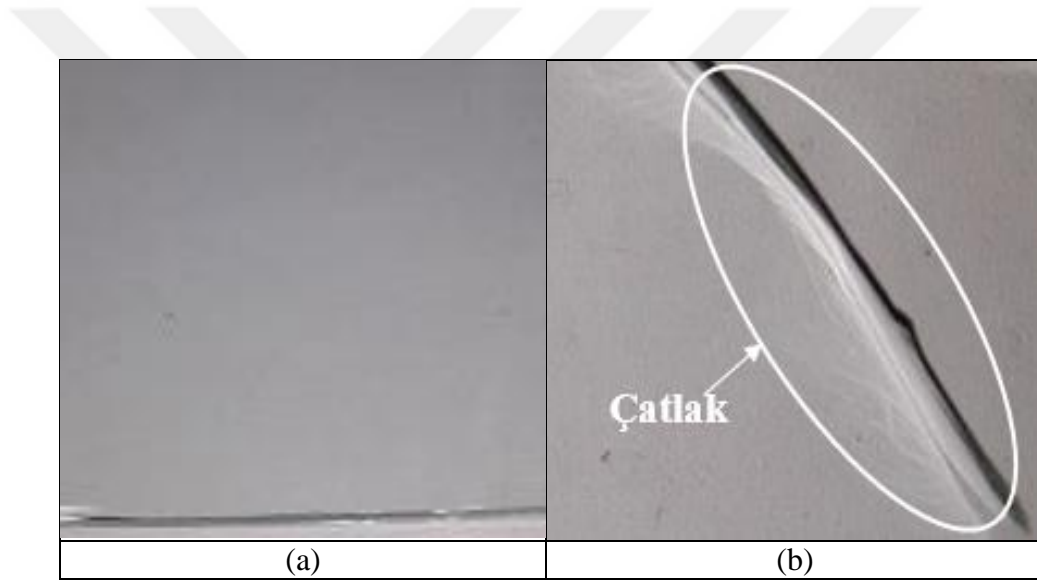
Böyle bir sistem kullanılarak iki farklı yolla çatlakın varlığı tespit edilebilmektedir. Çatlak analizi yapmanın ilk yolu kaydı yapılan ses hologramlarından geri elde edilen frekans spektrumunu kullanmaktır. İkinci yol ise ses dalgasının malzeme üzerinden geçerken sergilediği davranışın üç boyutlu olarak çıkartılmasıdır. Her iki yol için analizi yapılacak malzemenin hem sağlam hem de çatlaklı yüzeyleri ayrı ayrı incelenmektedir.

6.1 FREKANS SPEKTRUMU KULLANILARAK MALZEMELERDEKİ ÇATLAKLARIN TESPİTİ

Sayısal holografi sistemi ile çatlak tespiti yapmak için bu çalışmada ilk olarak geri elde edilen ses dalgasına ait frekans spektrumu incelenmiştir. Hologram kaydı yapılırken ses dalgaları obje koluna direkt olarak verilmemiş, sağlam ve çatlak malzemelerden ayrı ayrı geçirilerek obje koluna aktarılmıştır. Kaydı yapılan hologramlardan ses dalgaları geri elde edilirken Fourier dönüşüm metodu kullanılmıştır. Ayrıca bu hologramlardan frekans spektrumunun çıkartılması için Bölüm 3.2 sunulan ve Şekil 3.4 ile verilen aşamalar kullanılmıştır. Burada ilk olarak sağlam (çatlaklı değil) malzemenin obje koluna aktarılan ses dalgası için çıkartılan frekans spektrumundaki frekans değerinin, ortama verilen ses dalgasının frekans değeri ile aynı çıkması beklenmektedir. Fakat aynı ses dalgası çatlaklı malzemenin üzerinden geçirildiğinde elde edilen frekans spektrumundaki frekans değerinde sapmanın görüleceği düşünülmektedir.

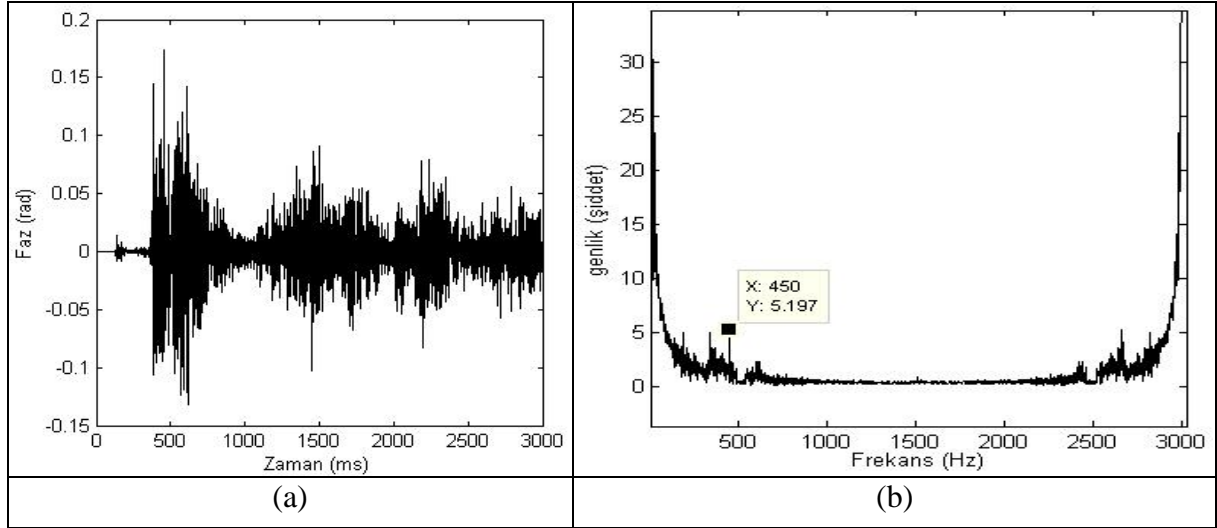
Çalışmanın bu aşamasında çatlak tespiti yapılacak malzeme olarak cam kullanılmıştır. Bu nedenle şekil 6.1’de verilen deneysel düzenekteki obje kolu önüne ilk olarak sağlam cam yerleştirilmiştir. (Bkz. Şekil 6.2a). Fonksiyon jeneratörü ile üretilen 500 Hz ve 1 KHz’lik ses dalgaları sırasıyla camdan geçirilerek obje koluna aktarılmıştır. Kaydı yapılan hologramlardan 500 Hz ve 1 KHz’lik ses dalgaları için ayrı ayrı frekans spektrumu çıkartılmıştır. Daha sonra sağlam cam sistemden çıkartılmıştır ve çatlatılarak tekrar sisteme eklenmiştir. Aynı işlemler sırasıyla tekrarlanarak frekans spektrumu çatlatılmış cam için de çıkartılmıştır.

Şekil 6.2’de bu çalışma için kullanılan sağlam cam ve bu camın çatlatılmış hali sunulmuştur. Sistemde kullanılan çatlatılmış camdaki çatlaklar, sağlam cama uygulanan çekiç darbesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 6.2 Cam malzemeler a) Sağlam cam b) Çekiç darbesiyle çatlatılmış cam.

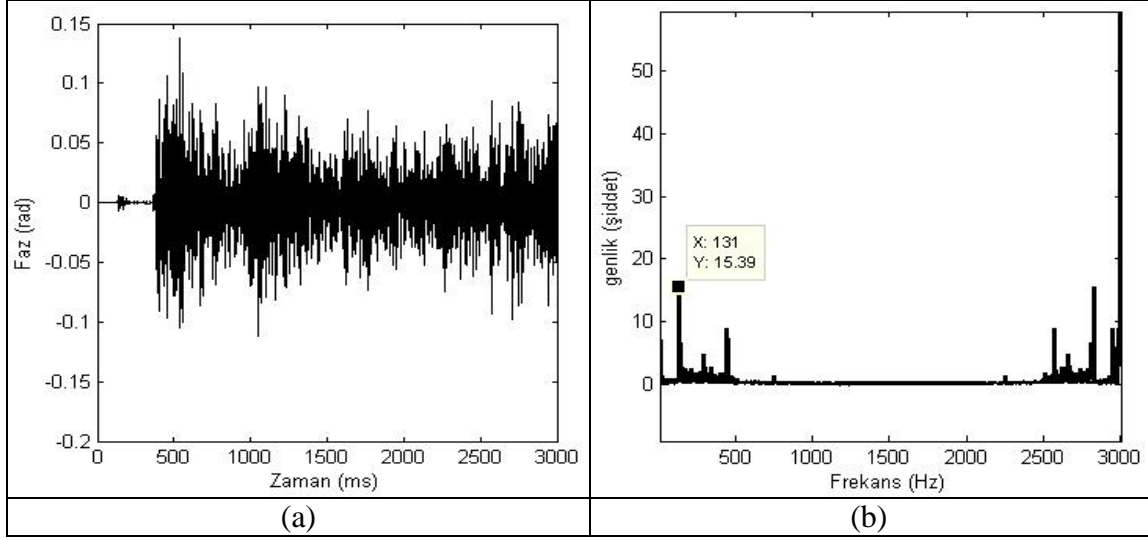
Sağlam camdan geçirilerek obje koluna aktarılan 500 Hz frekans değerindeki sinüs dalgasının kaydedilmiş hologramlarından geri elde edilen zamansal faz profili ve bu hologramlardan çıkartılan frekans spektrumu Şekil 6.3a ve Şekil 6.3b’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.3 500 Hz sinüs dalgası kullanılarak sağlam cam için deneysel sistemden elde edilen sonuçlar a) kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili b) kaydedilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu.

Fonksiyon jeneratörü ile üretilmiş 500 Hz frekans değerindeki sinüs dalgasının hologram kaydı gerçekleştirilirken Nyquist kriteri göz önünde bulundurularak CMOS kamera ile saniyede 1000 adet görüntü kaydedilmiştir. Yani bu sese ait örnekleme frekansı (f_s) 1 KHz olarak alınmıştır. Ortama verilen ses dalgası 3 saniyelik bir ses olduğundan 3 saniye boyunca toplamda 3000 adet hologram kaydedilmiştir. Normal şartlarda bu ses dalgası direkt olarak obje koluna verildiğinde, elde edilen frekans spektrumundaki beklenen maksimum genlik tepe değeri 500 Hz'dir. Fakat bu ses dalgası sağlam camdan geçirildikten sonra obje koluna verildiğinde, frekans spektrumunda okunan maksimum genlik değerinin kayması beklenmektedir. Bu bağlamda maksimum genlik değeri 450 Hz olarak bulunmuştur. (Bkz. Şekil 6.3b). Bu değer tam olarak 500 Hz değil de 450 Hz çıkmasının sebebi sistemde var olan gürültülerin olmasıdır. Bu nedenle bu gürültülerin de var olduğu kabul edilerek bulunan frekans değerininin sağlam malzeme için doğru olduğu kabul edilmiştir.

500 Hz frekans değerine sahip ses dalgası çatlatılmış camdan obje koluna aktarıldığında daha farklı bir durum gözlenmiştir. Bu durumda elde edilen frekans spektrumunda okunan maksimum genlik değerinin çok küçük değerlerde çıktığı açıkça görülebilmektedir. Bu azalma frekans spektrumundan okunan değer kaydığı anlamına gelmektedir. Çatlak camdan geçirilen ses dalgası için kaydı yapılan hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili ve bu hologramlardan çıkartılan frekans spektrumu Şekil 6.4a ve Şekil 6.4b'de sırasıyla sunulmuştur.

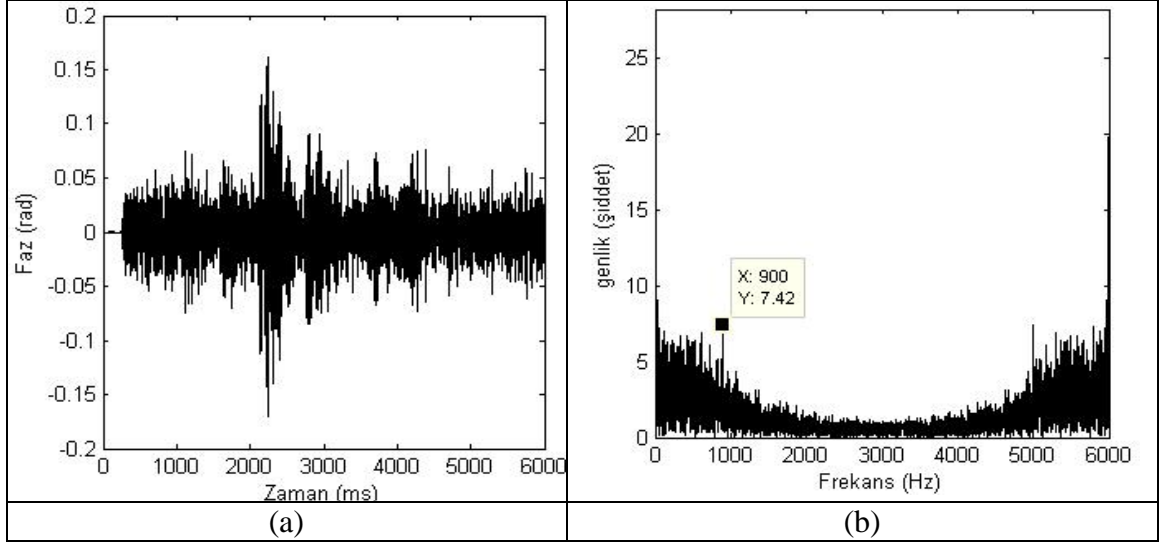


Şekil 6.4 500 Hz sinüs dalgası kullanılarak çatlak cam için deneysel sistemden elde edilen sonuçlar a) kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili b) kaydedilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu.

Şekil 6.4b'ye bakılarak frekans spektrumunda okunan maksimum genlik tepe değerinin 131 Hz olarak bulunduğu görülebilmektedir. Bunun nedeni ise ses dalgasının çatlak camdan geçerken kırınımına uğramasıdır. Yani çatlak cam için çıkartılan frekans spektrumundaki kaymanın sağlam malzeme için bulunan sonuca göre fazla çıkması, camda çatlak olduğunu göstermektedir.

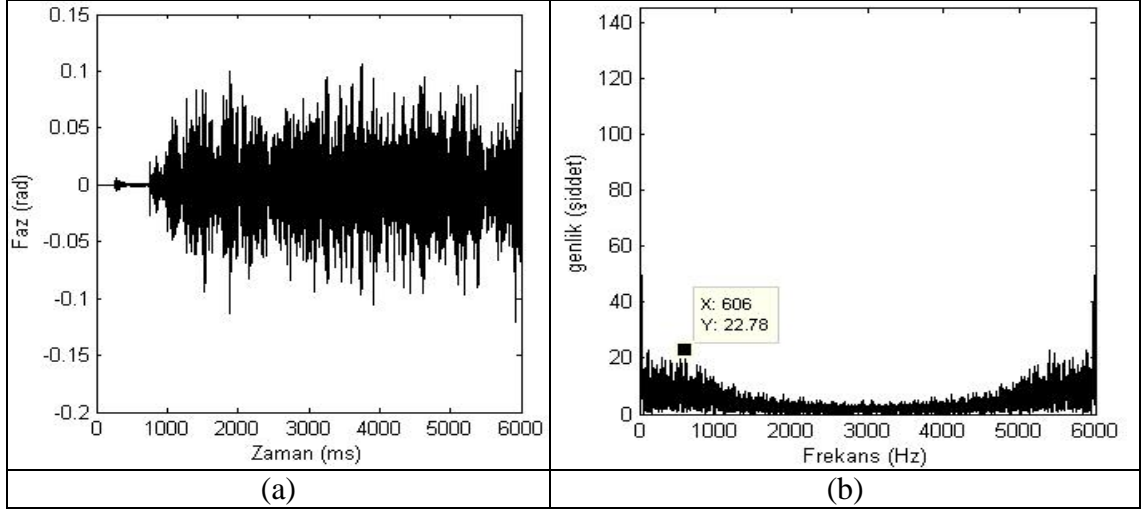
Frekans spektrumu ile çatlak tespit etmenin doğru bir yöntem olduğunu kuvvetlendirmek için çalışmanın bu aşamasında farklı malzemeleri incelemek yerine, tek bir tür malzemedeki obje koluna aktarılan farklı frekans değerlerine sahip ses dalgaları incelenmiştir. Bu bağlamda yukarıda bahsedilen işlemler fonksiyon jeneratörü üretilmiş 1 KHz frekans değerindeki sinüs dalgası kullanılarak da yapılmıştır. Nyquist kriteri göz önüne alınarak 1 KHz'lik ses dalgasının örnekleme frekansı 2 KHz olarak alınmıştır ve saniyede 2000 görüntü kaydederek 3 saniye boyunca toplamda 6000 adet hologram kaydedilmiştir. Ortama verilen ses dalgası ilk olarak sağlam camdan geçirildikten sonra obje koluna aktarılarak hologram kaydı gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.5a ve Şekil 6.5b'de sağlam camdan geçirilen 1 KHz'lik ses dalgası için kaydı yapılan hologramlardan geri elde edilen zamansal faz profili ve bu hologramlardan çıkartılan frekans spektrumu sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.5 1 KHz sinüs dalgası kullanılarak sağlam cam için deneysel sistemden elde edilen sonuçlar a) kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili b) kaydedilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu.

Herhangi bir yüzeyden geçirilmeden obje koluna direkt olarak verilen 1 KHz'lik ses dalgası için kaydedilen hologramlardan geri elde edilen frekans spektrumunda okunması beklenen maksimum genlik tepe değeri 1 KHz'dir. Bu ses dalgası sağlam camdan geçirilerek obje koluna aktarıldığında frekans spektrumunda okunan değer 900 Hz olarak bulunmuştur. (Bkz. Şekil 6.5b). Ortama verilen ses dalgası çatlak camdan geçirildiğinde ise tıpkı 500 Hz frekans değerine sahip ses dalgasında elde edilen sonuç gibi frekans spektrumunda bu değer büyük bir kayma göstererek sonuç vermesi beklenmektedir. Çatlak camdan geçirilen 1 KHz'lik ses dalgası için kayıt edilen hologramlardan geri elde edilen zamansal faz profili ve bu hologramlardan çıkartılan frekans spektrumu Şekil 6.6a ve Şekil 6.6b'de sırasıyla gösterilmiştir.



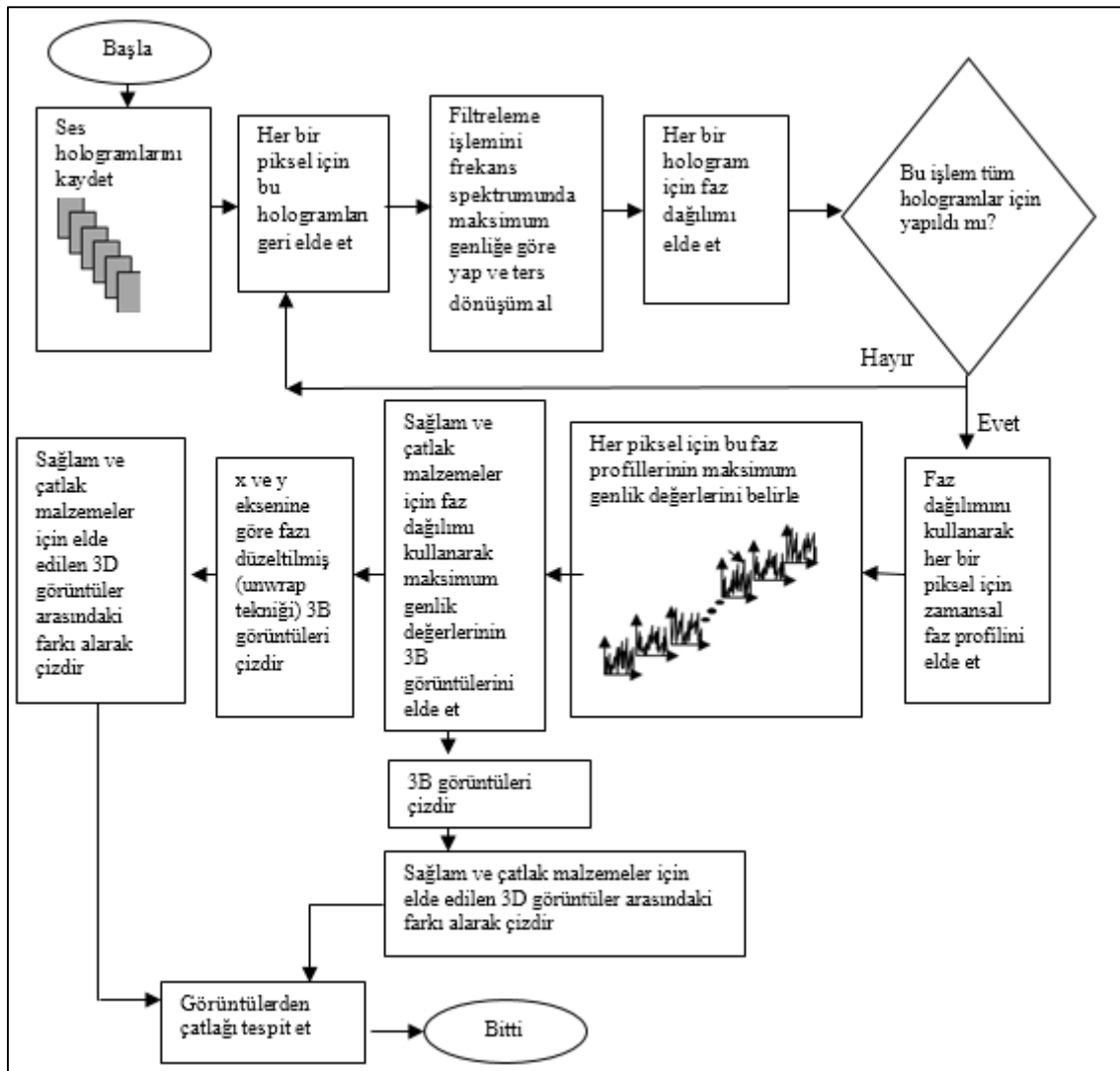
Şekil 6.6 1 KHz sinüs dalgası kullanılarak çatlak cam için deneysel sistemden elde edilen sonuçlar a) kaydedilen hologram serisinden geri elde edilen zamansal faz profili b) kaydedilen hologram serisinden çıkartılan frekans spektrumu.

Şekil 6.6b den görüldüğü gibi frekans spektrumunda okunan maksimum genlik tepe değeri çatlak cam için 606 Hz olarak bulunmuştur. Bu değer çatlak cama ait sonuçlar için beklenen bir durumdur. Görüldüğü gibi sayısal holografiye dayanan optik ses kaydedici ile ses dalgalarının holografik kaydı bir malzemedan geçirilerek yapıldığında ve bu hologramlardan frekans spektrumları çıkartıldığında, frekans spektrumunda bulunan değerlerin sağlam ve çatlak malzemeler için farklı olduğu açıkça görülebilmektedir. Holografik kaydı yapılan ses dalgasının sahip olduğu frekans değeri sağlam malzemeler için incelendiğinde, yaklaşık olarak frekans spektrumundan tahmin edilebilmektedir. Oysaki bu değer çatlak malzemeler için büyük oranda farklılık göstermektedir. Elde edilen frekans değerinin gerçek değerinden daha küçük bulunduğu, kaydı yapılan ses hologramlarından çıkartılan frekans spektrumundan açıkça görülebilmektedir.

6.2 SES DALGASININ ŞİDDETİ İLE MALZEMELERDEKİ ÇATLAKLARIN TESPİTİ

Çatlak tespiti frekans spektrumlarındaki maksimum genlik değerlerine bakılarak yapılabildiği gibi yukarıda bahsi geçen ikinci yol kullanılarak da gerçekleştirilebilmektedir. Bu yolda, ses dalgasının malzemedan geçerken sergilediği davranış üç boyutlu (3B) olarak çıkartılmıştır. Yani ses dalgasının malzemedan geçerken sahip olduğu şiddet değeri incelenmiştir. Bu bağlamda 3 farklı malzeme incelenmiştir (Cam, tahta ve metal). Obje koluna aktarılmak üzere ses dalgası olarak 1 KHz frekans değerine sahip ses sinyali kullanılmıştır. 3 saniyelik bir ses dalgası için toplam 6000 adet hologram kaydı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bu aşamasında, ses dalgasının malzemenin malzemenin hangi noktalarında yüksek veya düşük genliğe sahip olduğu belirlenerek çatlak tespiti gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda sayısal holografik kaydı yapılan ses hologramlarının her bir piksel noktası için zamansal faz profili çıkartılmıştır. Kaydı yapılan N adet hologram kullanılarak elde edilen bu faz profillerinin maksimum genlik değerleri hesaplanmıştır. Böylece bir hologramın piksel sayısı kadar maksimum genlik değeri elde edilmiştir. Sonuçta malzemenin geçen ses dalgasının davranışı ve çatlak bulunan bölgeden geçen ses dalgalarının genlik değerleri 3B görüntülerle gösterilmiştir. Önerilen yöntem ile çatlak tespit etmek için izlenen adımlar Şekil 6.7’de verilen akış diyagramı ile gösterilmiştir.



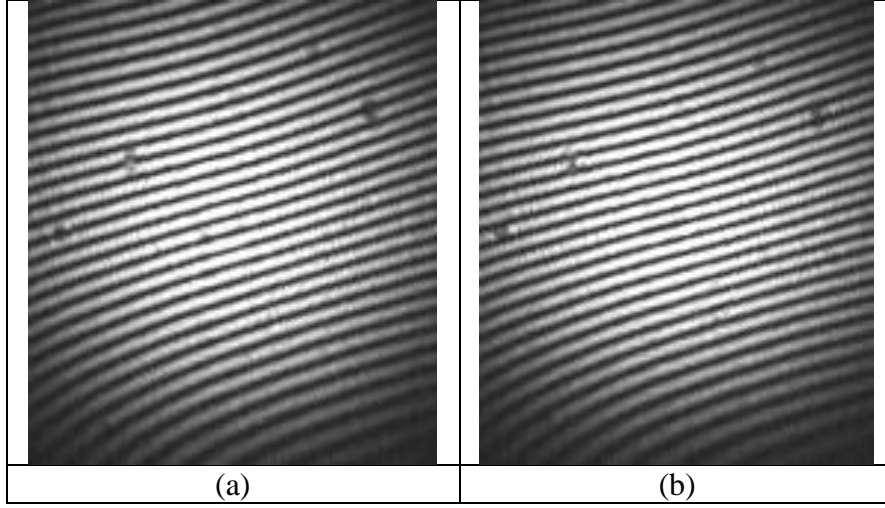
Şekil 6.7 Çatlak dedeksiyonu için kullanılan akış diyagramı.

Bu çalışmada, her bir piksel için zamansal faz bilgileri elde edilmiştir. Bu bilgiler, Fourier Dönüşüm metodu (FDM) kullanılarak çıkartılmıştır.

Önerilen sistemle çatlak tespiti yapmak için, çatlağın çıplak gözle görülebildiği cam ve tahta malzemeler ve gözle görülemeyen metal malzeme için 3 boyutlu görüntüler çıkartılmıştır. Normal şartlarda malzemelerdeki çatlak boyutu milimetre boyutlarında olduğunda herhangi bir sisteme gerek kalmadan çatlakları tespit etmek mümkündür. Fakat bu boyut mikrometre mertebelerine çıktığında çatlak tespiti için bir cihaz veya sistem kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Cam ve tahta gibi malzemelerde çatlakları görmek mümkün olduğundan önerilen sistemle çatlak tespiti, ilk önce bu malzemeler için yapılmıştır. Bu bağlamda çalışmanın ilk aşamasında sırasıyla şekil 6.2'de gösterilen sağlam ve çatlak camlar için çatlak tespiti yapılmıştır. Şekil 6.2'de çatlağın olduğu kısım beyaz daire içine alınarak gösterilmiştir.

Deney düzeneğinde görüntüleme sensörü olarak kullanılan yüksek hızlı CMOS kamera belirli bir çözünürlüğe sahiptir. Bu kamera için kullanılan örnekleme frekansı arttırıldığında kameranın çözünürlüğü azalmaktadır. Çözünürlüğün azalması ise, çatlak için elde edilen 3D görüntülerin bozulmasına neden olmaktadır. Bu durumda, çatlak algılama doğru şekilde yapılamamaktadır ve çıkartılan 3B görüntülerden çatlaklar tam olarak tespit edilememektedir. Bu aşama için sonuçlar 1 KHz'den daha yüksek frekanstaki ses dalgaları için de elde edilmiştir. Fakat yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı çözünürlük bozulduğundan istenilen sonuçlara ulaşılamamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada 1 KHz frekans değerine sahip bir ses dalgası kullanılmıştır. Bu doğrultuda cam yüzeydeki çatlak tespiti için fonksiyon jeneratörü ile üretilen 1 KHz frekans değerine sahip sinüs dalgası üretilmiştir. Daha sonra bu ses dalgası bir hoparlör yardımıyla sırasıyla sağlam ve çatlak camlardan geçirilerek her bir durum için saniyede 2000 hologram kaydı gerçekleştirilmiştir.

Ortama verilen 1 KHz değerindeki ses dalgasının sağlam camdan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan hologram serisinden, örnek olarak seçilmiş 1000. hologram deseni Şekil 6.8 a'da verilmiştir. Şekil 6.8b'de verilen hologram deseni ise ses dalgasının çatlak camdan geçirildikten sonra kaydı yapılan 1000. hologramdır.



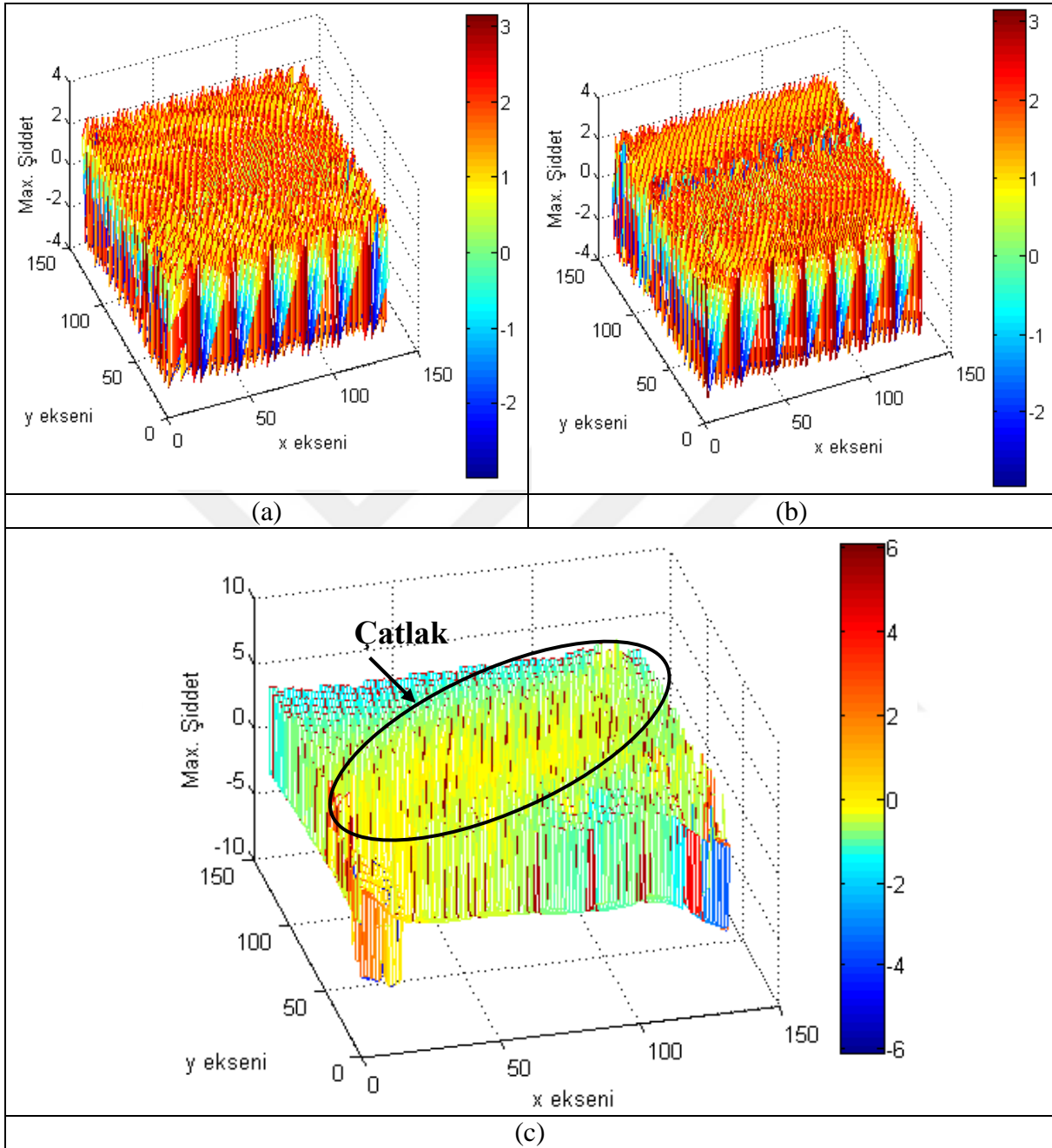
Şekil 6.8 1 KHz sinüs dalgası kullanılarak deneysel sistemde kaydedilen hologram desenleri a) ses dalgasının sağlam camdan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni b) ses dalgasının çatlak camdan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni.

Ses dalgaları hava ortamı yerine farklı malzemelerden geçirildiğinde sahip oldukları genlik değerleri zamana göre farklılık göstermektedir. Yani ses dalgası bir malzemedan geçerken enerjisi değişmektedir. Çünkü malzemenin iç yapısında bulunan atomlar hareket halinde olduğundan, ses dalgası malzemedan geçerken bu atomların yeri değişmektedir. Bu durumda da ses dalgasının sahip olduğu frekans ve dalgaboyu değişime uğramaktadır.

Malzemelerin sahip oldukları tanecik yapılarının farklı olması, içerisinden geçen ses dalgasının hızının da değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca ortamın yoğunluğu sesin yayılma hızına da etki etmektedir. Örneğin gaz maddelerin sahip olduğu tanecikler arasındaki boşluk, sıvı maddelere göre daha fazladır. Katılarda ise tanecikler daha sık haldedir. Ses dalgaları maddelerin sahip olduğu taneciklerin çarpışması ile iletildiğinden, tanecikleri daha sık olan katı maddelerde daha hızlı iletilmektedir. Bu durumda ses dalgası sağlam malzemedan geçerken hızı ve buna bağlı olarak genliği yüksek olacaktır. Fakat malzemede çatlak olduğu durumda, çatlak bölgedeki taneciklerin sıklığı azalacağından ve gelen ses dalgası kırınım ve saçılmaya maruz kalacağından, bu saçılma ile birlikte ses dalgasının yayılma hızı azalacaktır. Dolayısıyla bu dalganın genliği (yoğunluğu-enerjisi) de buna bağlı olarak azalacaktır.

Bu çalışmada sağlam (çatlaksız malzemedan geçen ses dalgası) ile çatlak malzemedan geçen dalga arasındaki fark 3B görüntüler ile verilmiştir. Malzemede çatlak olup olmadığı bu 3B

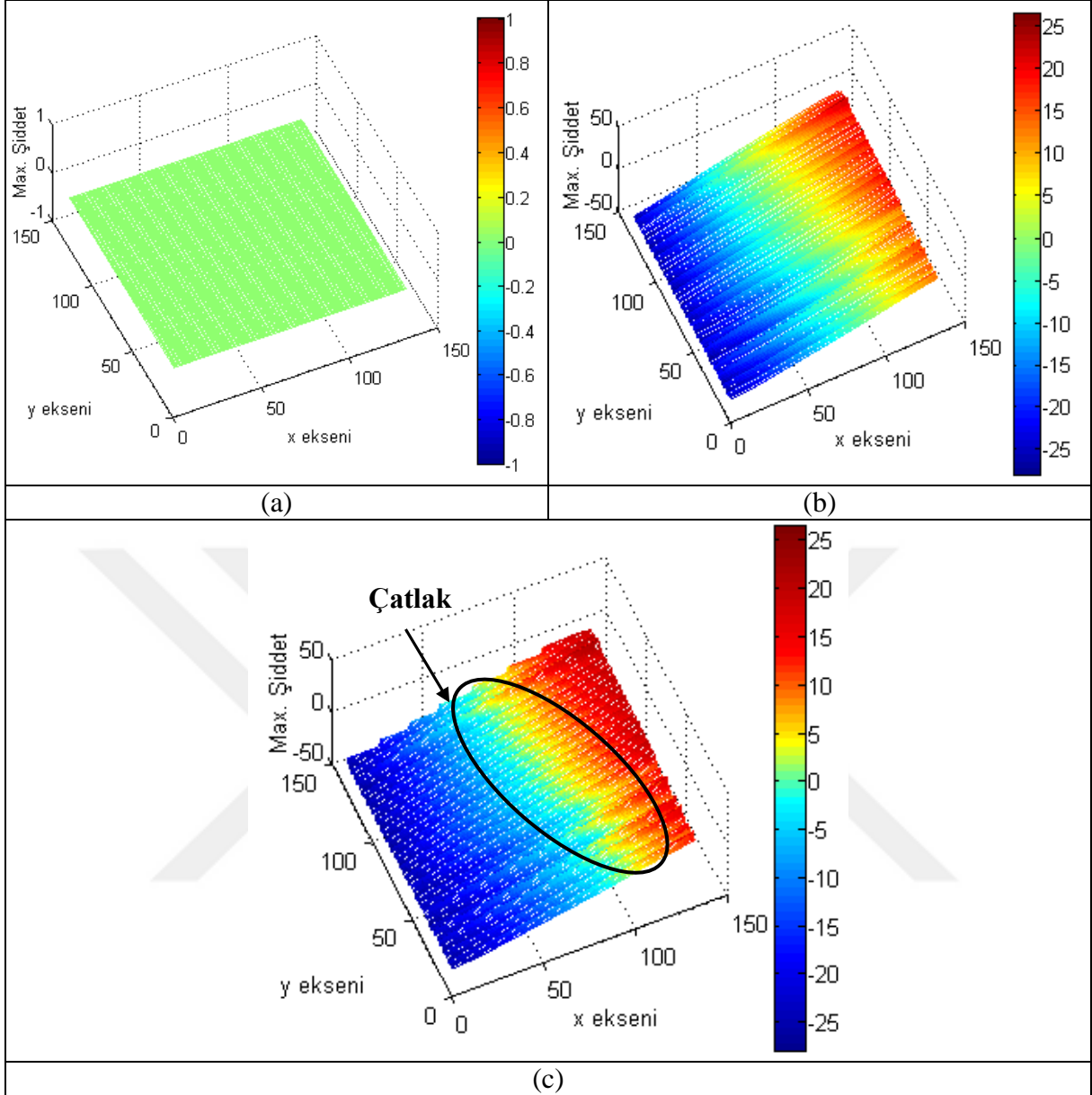
görüntülere bakılarak belirlenmiştir. Şekil 6.9’da sağlam ve çatlak cam malzemedan geçen ses dalgasının sahip olduğu zamansal davranışları gösteren 3 boyutlu görüntüler sunulmuştur.



Şekil 6.9 Cam malzemedan geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin olduğu durumlar) a) sağlam cam malzemesi için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak cam malzemesi için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.

Şekil 6.9'da, cam malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler fazda süreksizliğin olduğu durumlar için gösterilmiştir. Burada x ve y eksenleri hologramların sahip olduğu piksel sayısını göstermektedir. z eksenini ise ses dalgasının malzemeden geçtikten sonra sahip olduğu şiddet değerine (maksimum genlik değeri) karşılık gelmektedir. Ses dalgasının sağlam ve çatlatılmış cam malzemelerden geçerken sergilediği davranışlar sırasıyla Şekil 6.9a ve Şekil 6.9b'de verilmiştir. Şekil 6.9c'de ise sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla elde edilen 3B görüntü sunulmuştur.

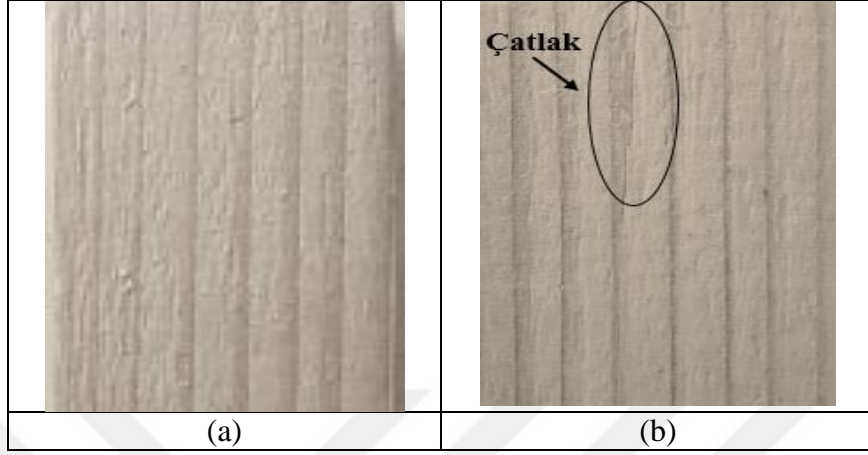
Bu şekillere bakılarak, ses dalgasının çatlak olmayan bölgeden yüksek şiddetle, çatlak olan bölgelerden ise daha düşük şiddetle geçtiği görülmektedir. Bu durum, çatlak bölgeden geçen ses dalgasının şiddetinde azalma olduğu anlamına gelmektedir ki her iki durumun farkı alındığında çatlak olan bölgenin olduğu yerde bir çıkıntı görülmektedir. Çatlak olmayan bölgelerdeki fark ise yaklaşık olarak sıfır seviyelerindedir. Şekil 6.9c'de farkın çıkıntı olarak görüldüğü yer (çatlak bölge) siyah daire içine alınarak gösterilmiştir. Şekil 6.9'da verilen görüntülerde fazda süreksizlikler olduğu açıkça görülebilmektedir. Bu süreksizlik MATLAB'da unwrap tekniği ile giderilebilmektedir. Süreksizliğin giderilmesiyle Şekil 6.9'da verilen durumlar için çıkartılan görüntüler Şekil 6.10'da tekrar sunulmuştur.



Şekil 6.10 Cam malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin giderildiği durumlar) a) sağlam cam malzemesi için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak cam malzemesi için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.

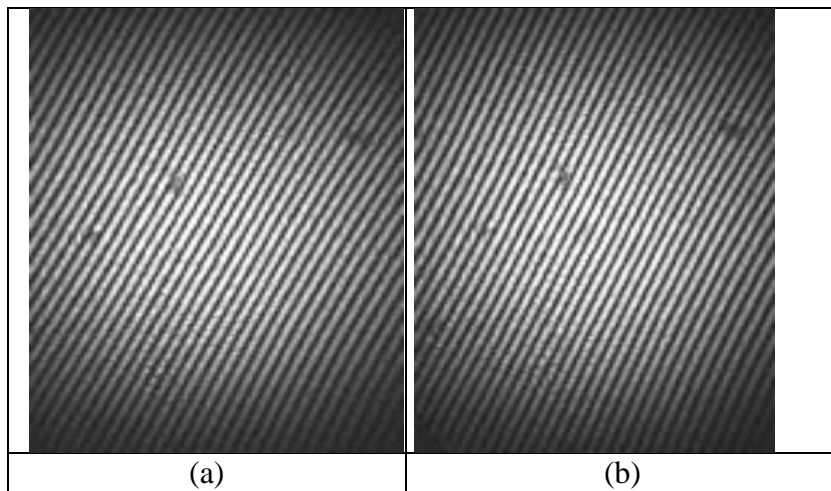
Cam yüzey için elde edilen 3 boyutlu görüntüler, sayısal holografide ses dalgası kullanılarak çatlak tespitinin tahribatsız ölçüm için çok uygun bir yöntem olduğunu açıkça göstermektedir. Şekil 6.2 ve Şekil 6.10 karşılaştırıldığı zaman, cam yüzeyindeki çatlak tespitinin doğru bir şekilde yapıldığı da açıkça söylenebilmektedir.

Cam yüzey dışında üzerindeki çatlağın gözle görülebildiği bir diğer malzeme tahtadır. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında ikinci olarak çatlak tespiti, tahta için yapılmıştır. Kullanılan sağlam ve çatlatılmış tahta yüzeyler Şekil 6.11’de sunulmuştur.



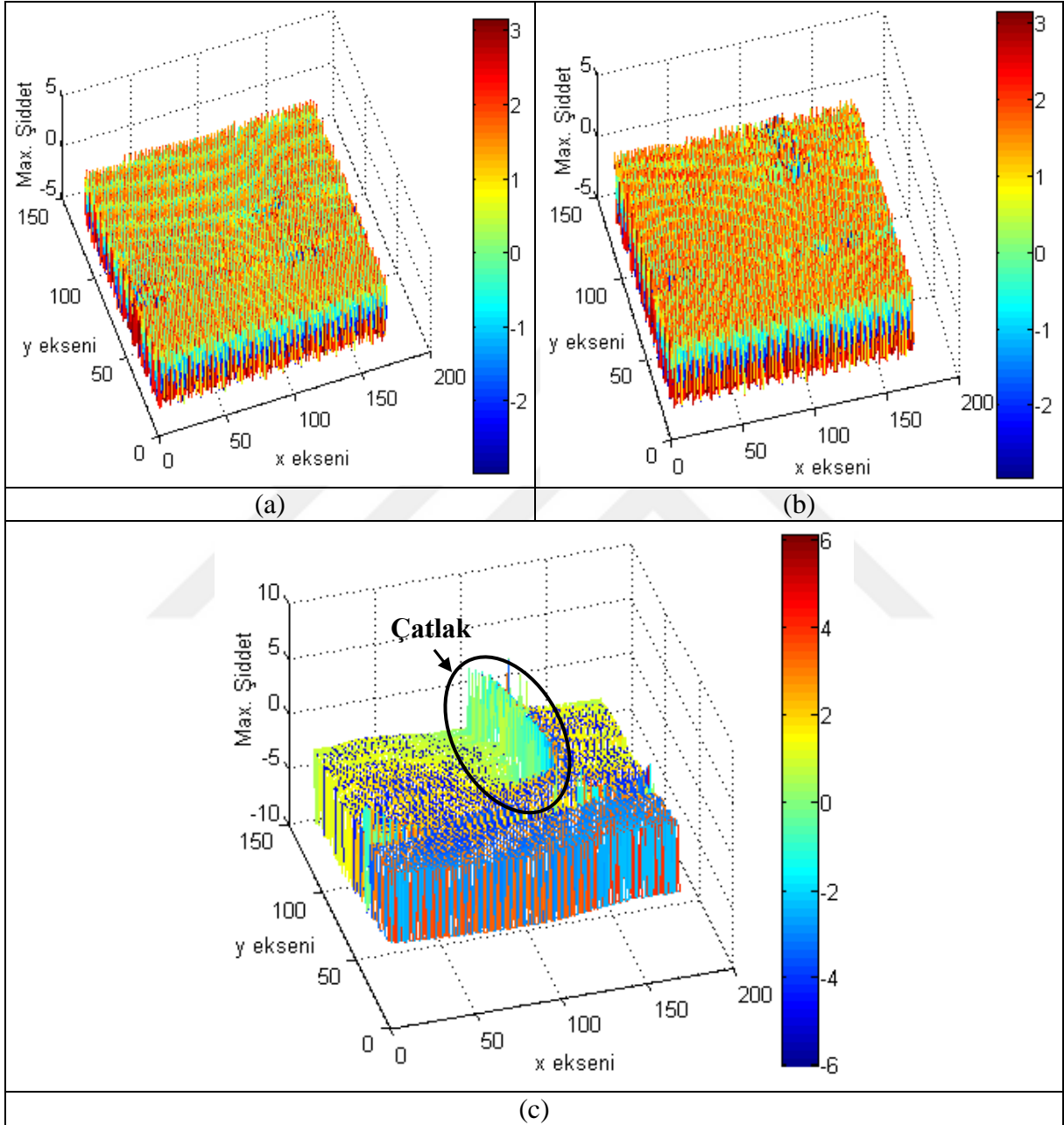
Şekil 6.11 Tahta malzemeler a) Sağlam tahta b) Çatlatılmış tahta.

Şekil 6.11b’de tahta yüzey üzerinde görülen çatlak kısım siyah daire içine alınarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi çatlak, tahta malzemenin sağ üst tarafında bulunmaktadır. Bu aşamada hologram kaydı yapılırken 1 KHz frekans değerine sahip ses dalgası sırasıyla sağlam ve çatlak tahta malzemelerden geçirilerek obje koluna aktarılmıştır. Her iki durum için ayrı ayrı kaydı yapılan hologram serisinden seçilmiş örnek 1000. hologram desenleri Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

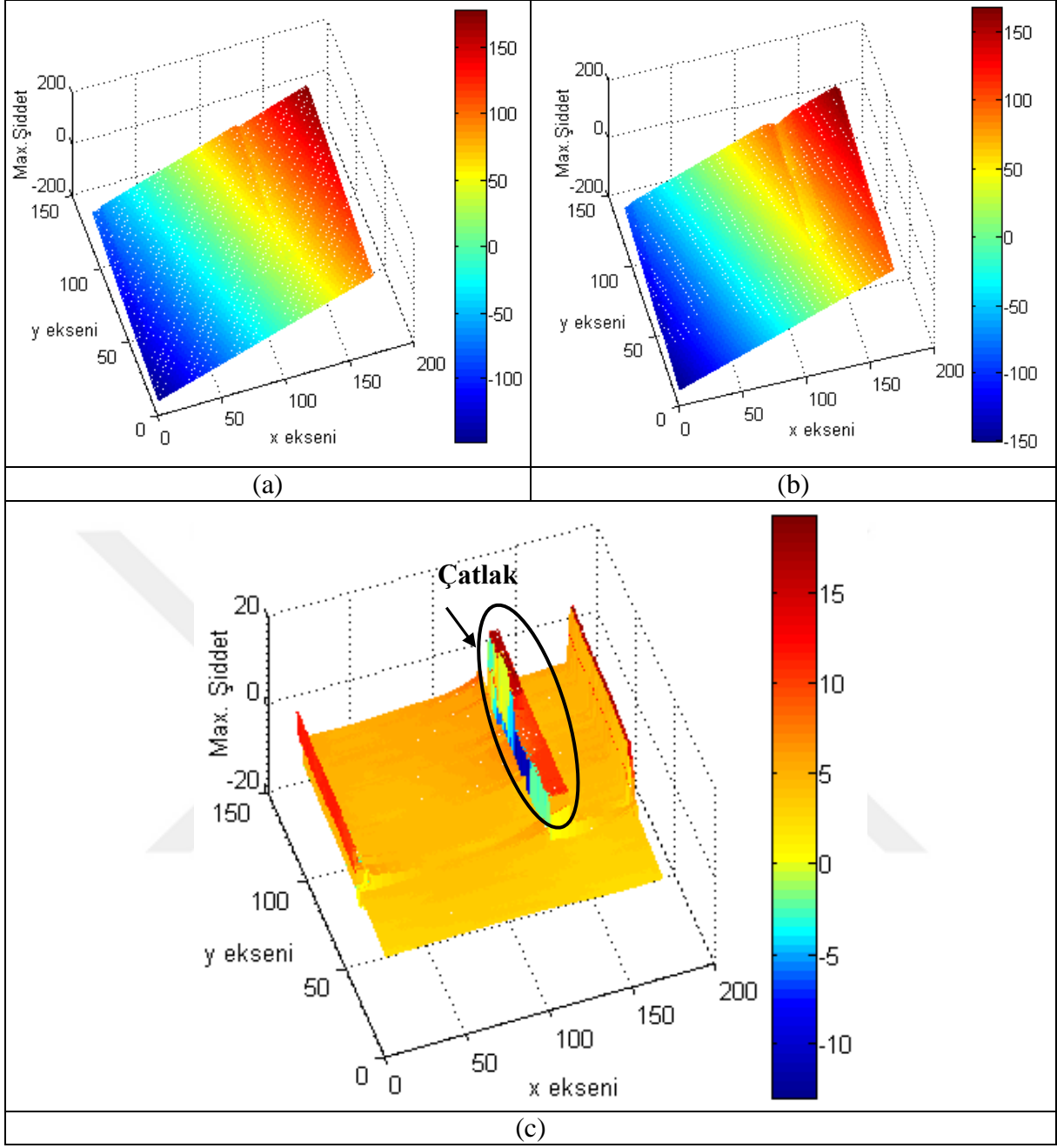


Şekil 6.12 1 KHz sinüs dalgası kullanılarak deneysel sistemde kaydedilen hologram desenleri a) ses dalgasının sağlam tahtadan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni b) ses dalgasının çatlak tahtadan geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni.

Ses dalgasının tahta yüzeyler üzerinden geçerken sergilediği zamansal davranış 3 boyutlu olarak şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te gösterilmiştir. Fazda süreksizliğin olduğu durumlar için çıkartılmış 3B görüntüler Şekil 6.13'te verilirken, süreksizliğin giderilerek yeniden çıkartıldığı 3B görünler Şekil 6.14'de sunulmuştur.



Şekil 6.13 Tahta malzemedan geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin olduğu durumlar) a) sağlam tahta malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak tahta malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.



Şekil 6.14 Tahta malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin giderildiği durumlar) a) sağlam tahta malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak tahta malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.

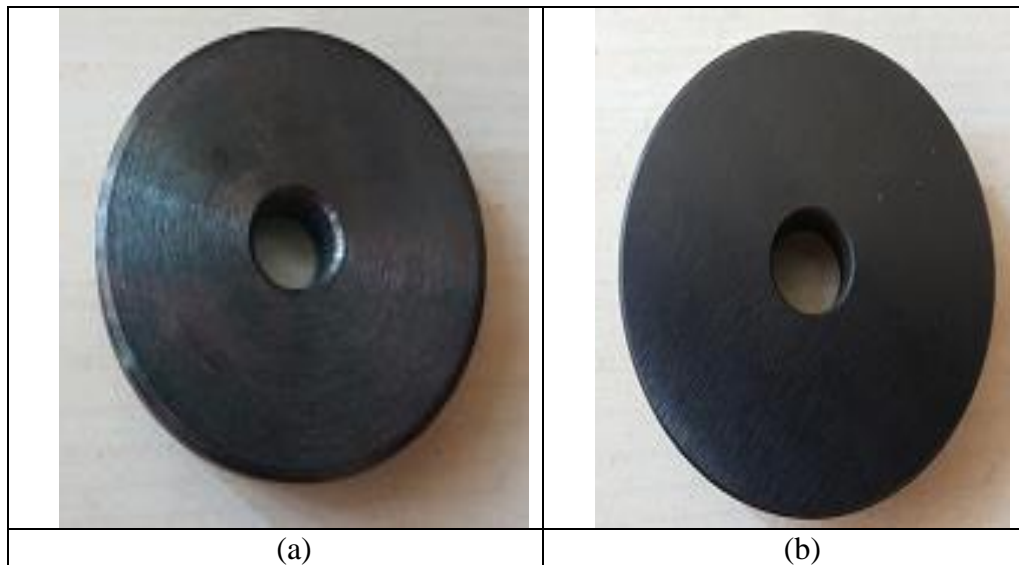
Ses dalgasının sağlam tahta malzemeden geçerken sergilediği zamansal davranışın 3B görüntüsü, fazın süreksiz ve sürekli olduğu durumlar için Şekil 6.13a ve Şekil 6.14a'da sırasıyla gösterilmiştir. Diğer taraftan bu durumlara ait 3B görüntüler çatlak tahta malzeme için çıkartılarak Şekil 6.13b ve Şekil 6.14b'de sırasıyla verilmiştir. Sağlam ve çatlak tahta

malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla çizdirilen 3B görüntüler ise Şekil 6.13c ve Şekil 6.14c’de sırasıyla sunulmuştur.

Cam malzemede olduğu gibi, ses dalgası tahtanın çatlak bölgesinden geçerken, bu dalganın şiddetinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 6.13c ve Şekil 6.14c’deki fark görüntülerine bakıldığında, çatlağın olduğu bölgede bir çıkıntı olduğu göze çarpmaktadır. Bu çıkıntı her iki şekilde de siyah daire içine alınarak gösterilmiştir. Şekil 6.11b’de verilen çatlak tahta görüntüsünde, çatlak bölgenin tahtanın sağ üst tarafında olduğu açıkça görülebilmektedir. Fark görüntülerinde de çatlak bölgenin aynı konumda olduğunu söylemek mümkündür.

Bu çalışmanın geçerliliğini ispatlamak için öncelikle çıplak gözle kolayca görülebilen malzemelere ait mevcut çatlaklar tespit edilmiştir (cam ve tahta malzemeler). Sistemden elde edilen sonuçlar ışığında, önerilen sistemin tahribatsız muayene ile çatlak tespitinde kullanılabileceği söylenebilmektedir.

Bu sistem aracılığıyla malzemeler üzerinde görülemeyen çatlakları da tespit etmenin mümkün olduğu düşünülmüştür. Örneğin, metal malzemelerdeki çatlakları gözle görmek mümkün değildir. Bu nedenle, bu çalışmanın son aşamasında, gözle görülmeyen metal çatlakları tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan sağlam ve çatlak metal malzemeler Şekil 6.15’te sırasıyla sunulmuştur. Sistemde kullanılan çatlatılmış metaldeki çatlaklar, sağlam metalin zamanla yorulması ile oluşmuştur.



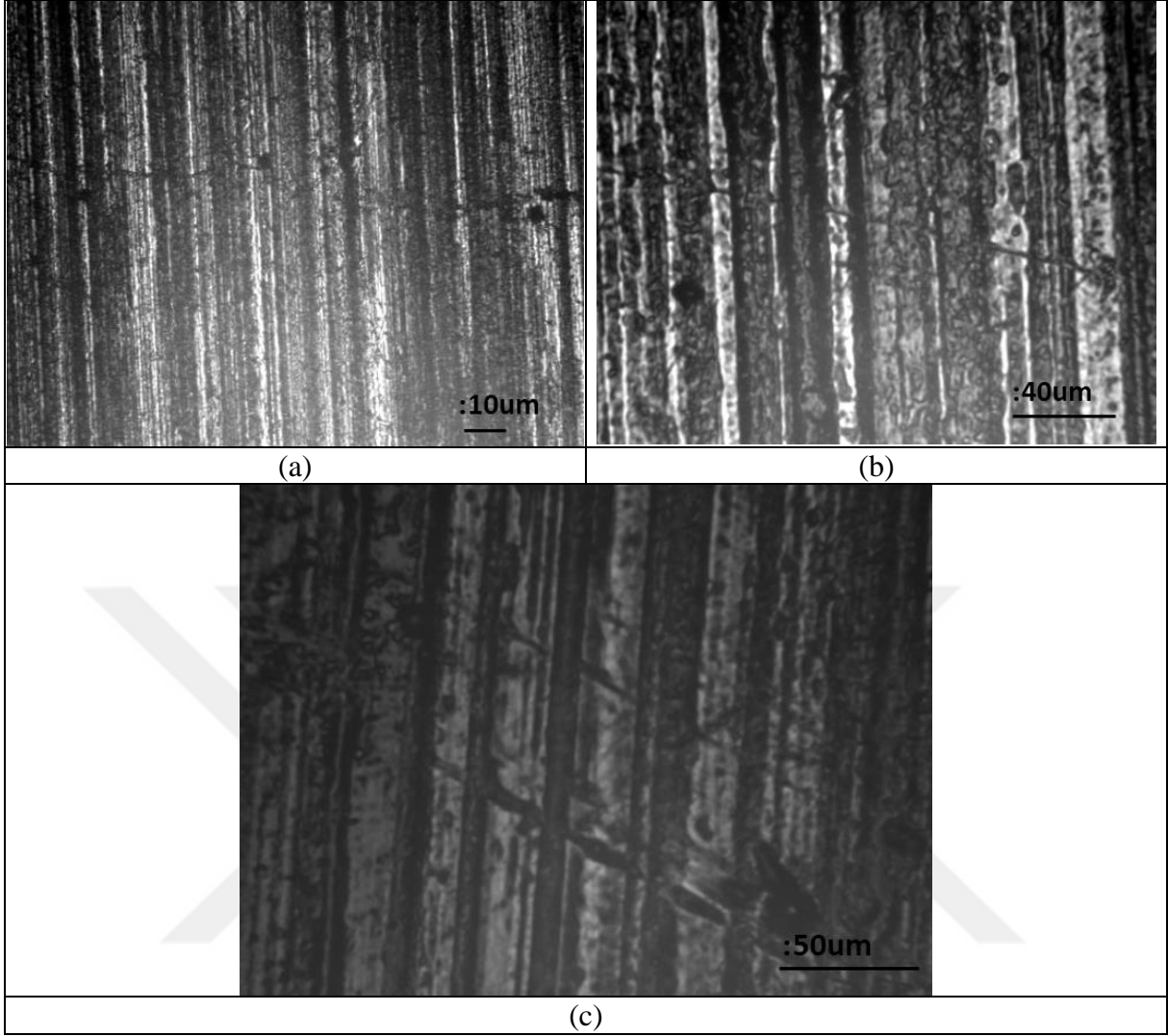
Şekil 6.15 Metal malzemeler a) Sağlam metal b) Çatlatılmış metal.

Şekil 6.15 b’de resmi verilen çatlatılmış metal yüzeye bakılarak bu yüzeyde çatlak olup olmadığı çıplak gözle anlaşılmamaktadır. Bu nedenle önerilen sistemle 3B görüntü çıkartmadan önce ilk olarak tüm yüzeyde bulunan çatlak Multiflux ift 1400 g AC/DC Ultraviyole çatlak kontrol cihazı ile çekilmiş fotoğrafla verilmiştir (Bkz. Şekil 6.16) [88].



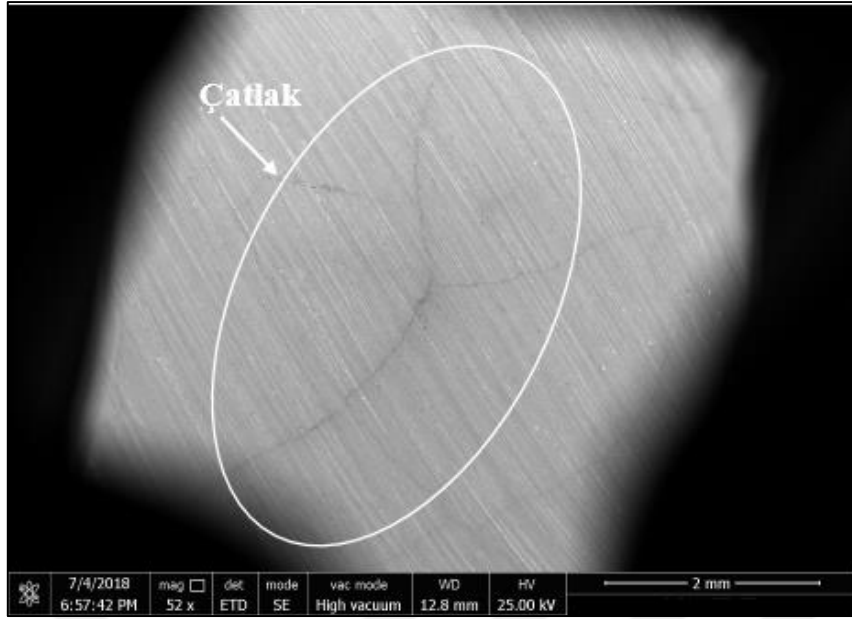
Şekil 6.16 Multiflux ift 1400 g AC/DC Ultraviyole çatlak kontrol cihazı ile çekilmiş fotoğraf.

Şekil 6.16 ‘daki görüntüde metal yüzeyin tamamı bahsi geçen cihazla fotoğraflanmıştır. Burada yüzey üzerinde bulunan tüm çatlakları görmek mümkündür. Fakat en büyük çatlağın olduğu bölge tam olarak anlaşılamamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada ayrıca yüzey taraması yapılarak optik mikroskop ile çatlaklar bölge bölge taranmıştır (Bkz. Şekil 6.17).



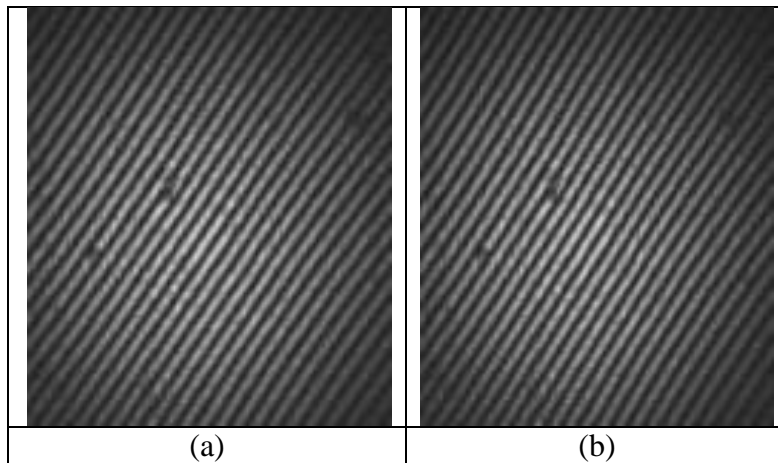
Şekil 6.17 Optik mikroskop ile taranan çatlak metal malzeme a) x100 büyütme oranı ile yapılan tarama sonucu elde edilen görüntü b) x400 büyütme oranı ile yapılan tarama sonucu elde edilen görüntü c) x500 büyütme oranı ile yapılan tarama sonucu elde edilen görüntü.

Ayrıca bu çalışmada taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope (SEM)) ile de çatlak olan bölgelerin taraması yapılmıştır. Bu tarama sonucu çatlakın olduğu herhangi bir bölge seçilerek görüntülenen çatlak Şekil 6.18’de sunulmuştur.



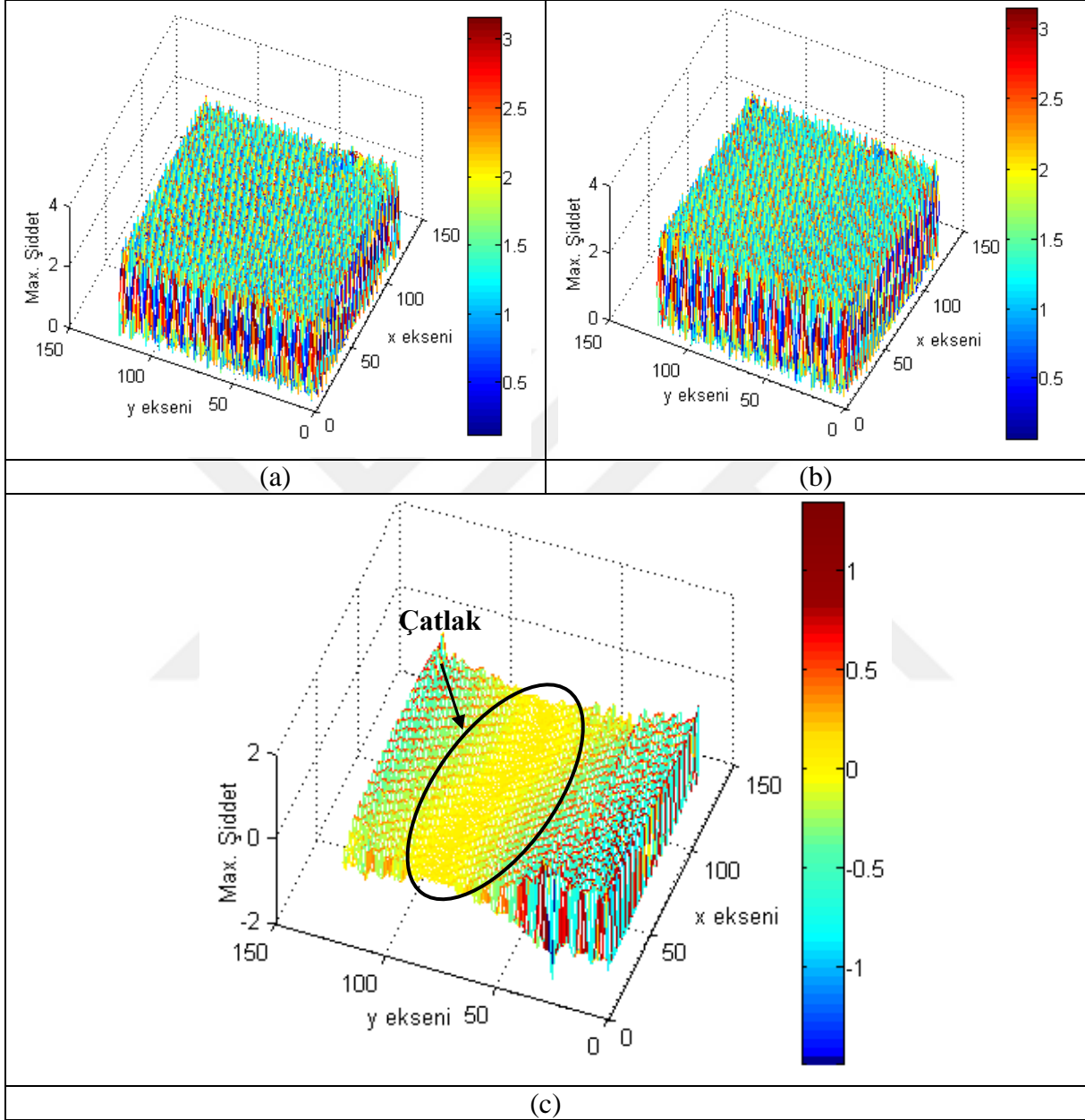
Şekil 6.18 Çatlak metal yüzey üzerindeki çatlakın SEM ile taranarak çıkartılmış görüntüsü.

Şekil 6.18’de verilen SEM görüntüsünde, çatlak bölge beyaz daire içerisine alınarak gösterilmiştir. Bu görüntüde çatlak bölge yaprağın damarlarına benzemektedir. Bu aşamada hologram kaydı yapılacak ses dalgası 2 KHz frekans değerine sahiptir. Hologram kaydı, bu ses dalgası sırasıyla sağlam ve çatlak metalden geçirilerek obje koluna aktarıldıktan sonra yapılmıştır. Sağlam ve çatlak metallere geçirilerek obje koluna aktarılan ses dalgasının kaydedilmiş örnek hologram görüntüleri Şekil 6.19’da gösterilmiştir. Bu hologram desenleri, kaydı yapılan hologram serisinden alınmış örnek 1000. hologram görüntüleridir.

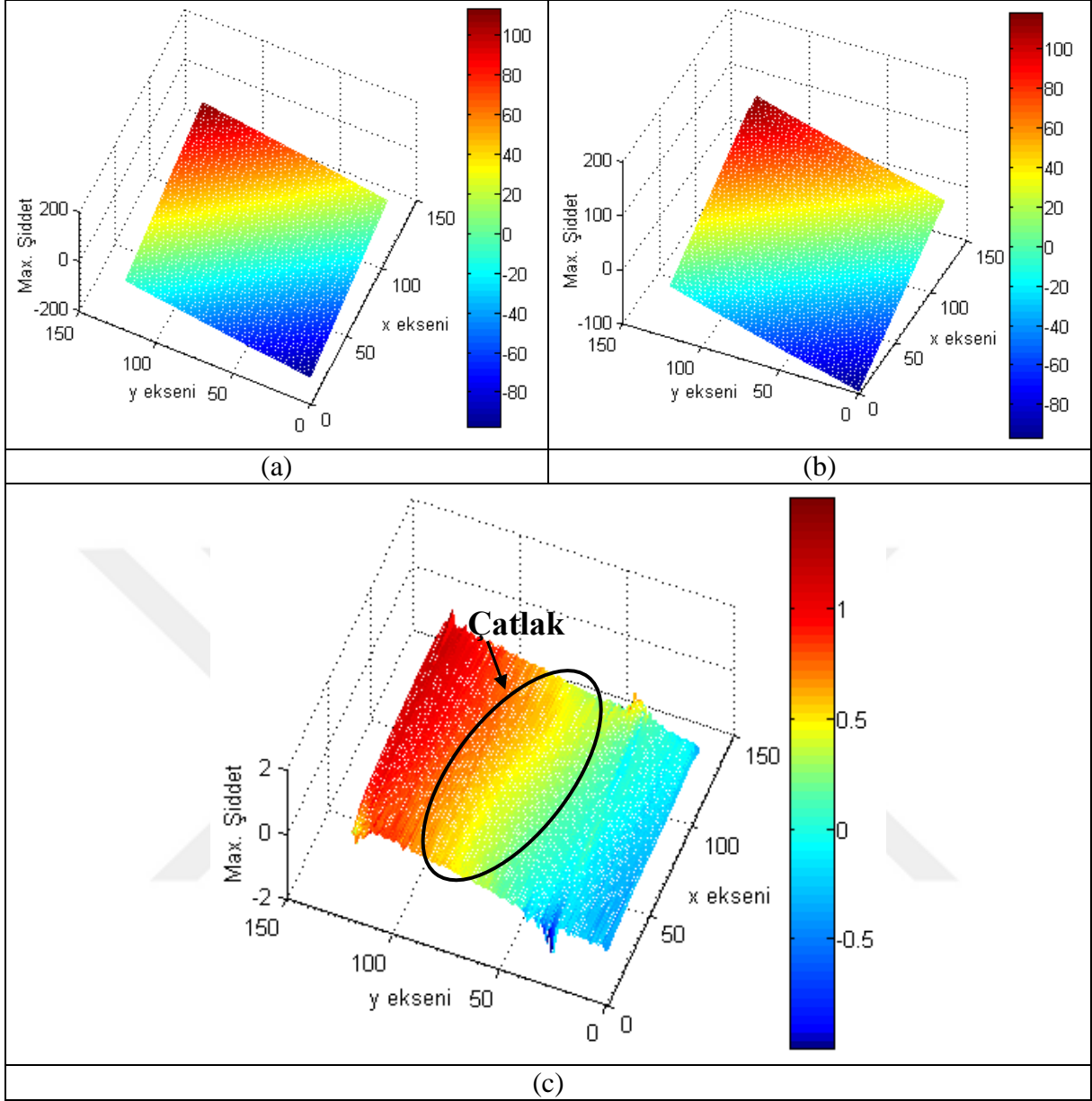


Şekil 6.19 2 KHz sinüs dalgası kullanılarak deneysel sistemde kaydedilen hologram desenleri
a) ses dalgasının sağlam metalden geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni b) ses dalgasının çatlak metalden geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydı yapılan 1000. hologram deseni.

Ses dalgası malzemeden geçerken şiddetinde zamanla değişim olmaktadır. Bu değişimi, metal malzeme için çıkartılmış fazın süreksiz ve sürekli olduğu durumlarda elde edilen 3 boyutlu görüntüler ile görmek mümkündür. (Bkz. Şekil 6.20 ve Şekil 6.21).



Şekil 6.20 Metal malzemeden geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin olduğu durumlar) a) sağlam metal malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak metal malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.



Şekil 6.21 Metal malzemedan geçen ses dalgasının zamansal davranışını gösteren 3B görüntüler (fazda süreksizliğin giderildiği durumlar) a) sağlam metal malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü b) çatlak metal malzeme için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerinin 3B görüntüsü c) sağlam ve çatlak malzemeler için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirlerinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntü.

Şekil 6.20c' ve şekil 6.21c'ye dikkatle bakıldığında, metal malzemedeki çatlak kolayca ayırt edilebilmektedir. Bu şekillerde görülen metal malzemedeki çatlak bölge, siyah bir daire içine alınarak gösterilmiştir. Diğer malzemelerde olduğu gibi ses dalgası çatlak bölgeden geçerken şiddet değerinde düşme olmuştur.

Tüm bu bulgular ışığında, önerilen sistem ile çıplak gözle görülebilen ve görülemeyen yüzey çatlaklarının tespit edilebildiğini söylemek mümkündür [176].





BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Genel olarak üç amaç altında toplanarak gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, eksen dışı (off-axis) sayısal holografi tekniğine dayalı optik ses kaydedici ile yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Ses dalgalarının hologramları yüksek hızda görüntü alma kabiliyetine sahip CMOS kamera ile kaydedildikten sonra bir arayüz vasıtası ile bilgisayara aktarılmıştır. Hologramlardan ses dalgalarının geri elde edilme işlemi MATLAB programında sayısal olarak yapılmıştır. Ses dalgalarını geri elde etmek için, kaydı yapılan ses hologramlarından zamansal faz profili (ses dalgası) ve frekans spektrumları çıkartılmıştır. Ayrıca geri elde edilen tüm ses dalgaları Media dosyası olarak kaydedilmiştir.

Çalışmanın ilk kısmında, sisteme verilen ses dalgaları (500 Hz-1 KHz” arasındaki ses sinyalleri, MP3’e kaydedilmiş çeşitli kelimeler, cümleler, örnek müzik parçası (“Best of Piano”) ve ultrasonik ses dalgaları) önerilen sistem ile kaydedilip, geri elde edilerek dinlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında en fazla 1 saniyelik bir kelimenin dinlendiği görülmüştür. Fakat daha uzun seslerin holografik kaydı ve geri elde edilmesi yapılmamıştır. Hatta bu ses net olarak duyulmadığı gibi geri elde edilen ses dalgalarında var olan gürültünün analizi de bu zamana kadar hiçbir çalışmada yapılmamıştır. Bu doğrultuda bu çalışmada en az 3 saniye olacak şekilde farklı ses dalgalarının sayısal holografik kaydı yapılmıştır. Bu aşamada ses dalgaları Fourier dönüşüm algoritması kullanılarak geri elde edilmiştir. Sonuçta ortama verilen farklı uzunluklardaki ses dalgalarının önerilen sistem ile başarıyla kaydedildiği ve geri elde edilerek net bir şekilde dinlendiği bulunan sonuçlar doğrultusunda açıkça söylenebilmektedir.

Çalışmanın ikinci kısmında, geri elde edilen ses dalgalarındaki gürültünün analizi yapılmıştır. Bu nedenle de geri elde etme sürecinde farklı sinyal işleme algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar sırasıyla Fourier dönüşüm metodu (FDM), Fresnel-dönüşüm metodu (F-DM) ve

Bir boyutlu sürekli dalgacık dönüşüm metodudur (1B-SDDM). Bu yöntemler literatürde bulunan ve görüntüleme holografisi alanında kullanılan yaygın metotlar olması nedeniyle bu tez çalışmada kullanılmıştır. Özellikle seçilen yöntemler arasındaki 1B-SDD metodu, daha önce ses dalgalarının geri elde edilmesi için hiçbir çalışmada kullanılmamıştır. Geri elde edilen ses dalgalarında var olan, holografik sistem ve çevresel faktörlerden kaynaklanan gürültünün analizi bu sinyal işleme algoritmaları ile yapılmıştır. Çalışmanın bu aşamasındaki asıl amaç, sinyal işleme algoritmalarının sistemdeki gürültüyü ne kadar bastırabildiğini görmektir. Bu doğrultuda her bir yöntem ile hologramlardan zamansal faz profili (ses dalgası) geri elde edilmiştir ve bu profilin holografik kaydı yapılan ses dalgasına ne kadar yaklaştığı çıkartılmıştır. İki durum arasındaki fark çizdirilmiş, aynı zamanda bu fark, işaret gürültü oranı hesaplanarak sayısal olarak verilmiştir. Elde edilen verilerle FDM ile sistem çıkışında elde edilen İGO değerinin (% 66.90) diğer yöntemlere göre çok daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Yani FDM'in gürültü bastırma kabiliyetinin diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu söylenmiştir. Fresnel dönüşüm metodunda kayıt mesafesinin, geri elde edilme aşamasında da kullanılması ve söz konusu mesafenin doğru olarak alınamadığında istenilen sonucu vermeyeceği bu çalışmada da görülmüştür. Nitekim F-DM ile sistem çıkışında hesaplanan İGO değeri %8.70 olarak bulunmuştur. Bu değer %10'un altında çıkması istenilen sonuca ulaşamadığının göstergesidir. Diğer taraftan cisimlerin geri elde edilmesi için yapılan holografi uygulamalarında pürüzsüz ve hassas sonuçlar veren 1B-SDD metodunun, holografik kaydı yapılan ses dalgasını geri elde ederken bu başarıyı yakalayamadığı görülmüştür. Bu durum İGO değerinin, bu yöntem ile sistem çıkışında %4.78 olarak bulunmasıyla da açıklanabilmektedir. İGO değerinin 1B-SDDM ile çok düşük çıkmasının nedeni, yapısında bulunan filteremenin kusursuz olması nedeniyle hassas sonuçlar vermesidir. Fakat bu yöntem ile hassas sonuçlar elde edilmesi ve geri elde edilen görüntünün pürüzsüz (smooth) olması sayısal holografi ile kaydedilen ses hologramları için yapılan uygulamalar açısından önem arz etmemektedir.

Tez çalışmasının son kısmında ise önerilen sistem ile malzeme üzerinde darbe veya zamanla meydana gelen çatlakların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu aşamada çatlak analizi iki farklı şekilde yapılmıştır. İlk aşamada ses hologramlarından geri elde edilen frekans spektrumu ile çatlak analizi yapılmıştır. Ses dalgasının hologramları, bu dalganın sağlam ve çatlak cam malzemelerden geçirilerek obje koluna aktarılmasıyla kaydedilmiştir. Elde edilen frekans spektrumunda çatlak durumundaki frekans değerinin, sağlam camın sahip olduğu frekans değerine göre ne kadar kaydığı incelenerek, malzemede çatlak olup olmadığı tespit edilmiştir.

Obje koluna aktarılan ses dalgasının sahip olduğu frekans değeri sağlam malzeme için çıkartılan frekans spektrumunda %90 oranında doğru bulunmuştur. %10'luk hata payı ise sistemde var olan gürültüden kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan bu oran çatlak malzeme için hesaplandığında %26 seviyesinde bulunmuştur. Yani ses dalgası çatlak malzemeden geçerken bu dalganın sahip olduğu frekans değeri frekans spektrumunda büyük oranda kaymıştır.

Çatlak analizi için yapılan ikinci aşamada, ses hologramlarından geri elde edilen şiddet dağılımları kullanılmıştır. Ses dalgasının malzemeden geçerken sergilediği davranış, sağlam ve çatlak malzemeler için faz dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum genlik değerlerine ait 3B görüntülerin çıkartılmasıyla incelenmiştir. Bu sistem çatlağın çıplak gözle görülebildiği cam ve tahta malzemelerine ek olarak, çıplak gözle görülemeyen metal malzemeler kullanılarak da denenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda çatlak olan bölgede genlik düşümü olduğu açıkça görülmüştür. Sağlam ve çatlak malzeme için elde edilen maksimum genlik değerlerinin birbirinden çıkartılmasıyla oluşturulan 3B görüntülere bakıldığında, çatlak olan bölgede bir çıkıntı olduğu gözlemlenmiştir. Böylece önerilen sistemin tahribatsız malzeme muayene sistemi olarak kullanılabileceği söylenebilmektedir.

Bu çalışmada çatlak analizi yapılırken malzemenin sahip olduğu kalınlık hesaplanmamıştır. Ayrıca çatlağın boyutu ve derinliği de çıkartılmamıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda malzeme kalınlığı da göz önüne alınarak, çatlağın derinliği ve boyutunun da belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca bu tez çalışması ile elde edilen bulgular doğrultusunda sistemin bir cihaz haline getirilerek, temassız ölçüm uygulanan her alanda kullanılması hedeflenmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Hariharan P** (1996) *Optical Holography Principles, Techniques and Applications*. 2th edition, ISBN: 978-0521439657, Cambridge University Press Publisher, Cambridge, 428 pp.
- [2] **Caulfield H J** (1979) *Handbook of Optical Holography*. 1st edition, ISBN: 9780323138413, Academic Press Publisher, New York, 638 pp.
- [3] **Samui A B** (2008) Holographic Recording Medium. *Recent Patents on Materials Science*, 1 (1): 79-94.
- [4] **Gabor D** (1949) Microscopy by Reconstructed Wave-fronts. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 197 (1051): 454-487.
- [5] **Gabor D** (1948) A New Microscopic Principle. *Nature*, 161 (4098): 777-778.
- [6] **Leith E N and Upatnieks J** (1962) Reconstructed Wavefronts and Communication Theory. *The Journal of the Optical Society of America*, 52 (1): 1123-1130.
- [7] **Goodman J W and Lawrence R W** (1967) Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied Physics Letter*, 11 (1): 77-79.
- [8] **Goodman J W** (2005) *Introduction to Fourier Optics*. 3rd edition, ISBN: 978-0974707723, McGraw-Hill Publisher, New York, 491 pp.
- [9] **Schnars U and Jueptner W** (1994) Digital Recording and Reconstruction of Holograms in Hologram Interferometry and Shearography. *Applied Optics*, 33 (20): 4373-4377.
- [10] **Schnars U and Jueptner W** (2005) *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction And Related Techniques*. 1st edition, ISBN: 978-3-540-26911-3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg Publisher, Berlin, Germany, 164 pp.
- [11] **Kreis T** (2005) *Handbook of Holographic Interferometry, Optical and Digital Methods*. 1st edition, ISBN: 978-3-527-40546-6, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 554 pp.
- [12] **Lai S and Neifeld M** (2000) Digital Wavefront Reconstruction and Its Application to Image Encryption. *Optics Communications*, 178 (1): 283-289.
- [13] **Coufal H J, Psaltis D, Sincerbox G T, Glass A M and Cardillo M J** (2000) *Holographic Data Storage*. 1st edition, ISBN: 978-3642536809, Springer Series in Optical Sciences, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 489 pp.
- [14] **Gang J** (2013) Three-Dimensional display Technologies. *Advances in Optics and Photonics*, 5 (4): 456-535.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [15] **Yaroslavsky L** (2004) *Digital Holography And Digital Image Processing: Principles, Methods, Algorithms*. 1st edition, ISBN: 978-1-4020-7634-3, Springer US Publisher, New York, 584 pp.
- [16] **Osten W, Faridian A, Gao P, Körner K, Naik D, Pedrini G, Singh A K, Takoda M and Wilke M** (2014) Recent Advances in Digital Holography. *Applied Optics*, 53 (27): 44-63.
- [17] **Yu X, Hong J, Liu C and Kim M K** (2014) Review of Digital Holographic Microscopy For Three Dimensional Profiling and Tracking. *Optical Engineering*, 53 (11): 1-21.
- [18] **Owen R B, Zozulya A, Benoit M R and Klaus D M** (2002) Microgravity materials and life sciences research applications of digital holography. *Applied Optics*, 41 (19): 3927-3935.
- [19] **Dolecek R, Kopecky V, Psota P and Ledl V** (2013) Digital Holographic Setup for Measurement of Asymmetric Temperature Field and Tomographic Reconstruction. *EPJ Web of Conferences*, 48 (00003): 1-4.
- [20] **Dolecek R, Psota P, Ledl V, Vit T and Kopecky V** (2014) Comparison of Holographic Setups Used in Heat and Mass Transfer Measurement. *EPJ Web of Conferences*, 67 (02021): 1-6.
- [21] **Frauel Y, Naughton T J, Matoba O, Tajahuerce E and Javidi B** (2006) Three-Dimensional Imaging and Processing Using Computational Holographic, Imaging. *Proceedings of the IEEE*, 94 (3): 636-653.
- [22] **Harvey Palmer C and Green R E** (1977) Optical Detection of Acoustic Emission Waves. *Applied Optics*, 16 (9): 2333-2334.
- [23] **Kim M K** (2010) Principles and Techniques of Digital Holographic Microscopy. *SPIE, Reviews*, 1 (1): 018005(1)- 018005(50).
- [24] **Mizutani K, Ezure T, Nagai K and Yoshioka M** (2001) Optical Measurement of Sound Fields Information Using Mach-Zehnder Interferometer. *Japanese Journal of Applied Physics*, 40 (1): 3617-3620.
- [25] **Nemoto M, Mizutani K, Ezure T and Masuyama H** (2004) Measurement of sound fields using Mach-Zehnder interferometer. *Japanese Journal of Applied Physics*, 43 (1): 6444-6448.
- [26] **Green Jr R E** (2004) Non-Contact Ultrasonic Techniques. *Ultrasonics*, 42 (1-9): 9-16.
- [27] **Murata S, Harada D and Tanaka Y** (2009) Spatial Phase-Shifting Digital Holography for Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry. *Japanese Journal of Applied Physics*, 48 (9S2): 1-40.
- [28] **Kemper B and Von Bally G** (2008) Digital Holographic Microscopy for Live Cell Applications and Technical Inspection. *Applied Optics*, 47 (4): A52-A61.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [29] **Tahara T, Yonesaka R, Yamamoto S, Kakue T, Xia P, Awatsuji Y, Nishio K, Ura S, Kubota T and Matoba O** (2012) High-Speed Three-Dimensional Microscope for Based Dynamically Moving Biological Objects Based on Parallel Phase-Shift Digital Holographic Microscopy. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 18 (4): 1387-1393.
- [30] **Kakue T, Yonesaka R, Tahara T, Awatsuji Y, Nishio K, Ura S, Kubota T and Matoba O** (2011) High-Speed Phase Imaging by Parallel Phase-Shifting Digital Holography. *Optics Letters*, 36 (21): 4131-4133.
- [31] **Matoba O, Inokuchi H, Nitta K and Awatsuji Y** (2014) Optical Voice Recorder by Off-Axis Digital Holography. *Optics Letters*, 39 (22): 6549-6552.
- [32] **Oikawa Y, Hasegawa T, Ouchi Y, Yamasaki Y and Ikeda Y** (2010) Visualization of Sound Field and Sound Source Vibration Using Laser Measurement Method, *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*, 23–27 August 2010, Sydney, Australia, 1-5.
- [33] **Korpel A, Mehrl D and Lin H H** (1987) Schlieren Imaging of Sound Fields, *IEEE 1987 Ultrasonics Symposium*, 14-16 October 1987, Denver, Colorado, USA, 515-518.
- [34] **Kudo N, Yokoyama G, Ikebuchi M, Okada K, Kawahara K and Yamamoto K** (2004) A Study on Premature Ventricular Contractions Caused by Ultrasound Exposure with Micro Bubbles Using Cultured Ventricular Muscle Cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 1 (1): 118-121.
- [35] **Hargather M J, Settles G S and Madalis M J** (2010) Schlieren Imaging of Loud Sounds and Weak Shock Waves in Air Near the Limit of Visibility. *Shock Waves*, 20 (1): 9-17.
- [36] **Chitanont N, Yaginuma K, Yatabe K and Oikawa Y** (2015) Visualization of Sound Field by Means of Schlierenmethod with Spatio-Temporal Filtering. *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 19-24 April 2015, Brisbane, QLD, Australia, 509-513.
- [37] **Bertling K, Perchoux J, Taimre T, Malkin R, Robert D, Rakić A D, and Bosch T** (2014) Imaging of Acoustic Fields Using Optical Feedback Interferometry. *Optics Express*, 22 (24): 30346-30356.
- [38] **Ishikawa K, Yatabe K, Chitanont N, Ikeda Y, Oikawa Y, Onuma T, Niwa H and Yoshii M** (2016) High-Speed Imaging of Sound Using Parallel Phase-Shifting Interferometry. *Optics Express*, 24 (12): 12922-12932.
- [39] **Zipser L, Franke H, Olsson E, Molin N E, and Sjö Dahl M** (2003) Reconstructing Two-Dimensional Acoustic Object Fields by Use of Digital Phase Conjugation of Scanning Laser Vibrometry Recordings. *Applied Optics*, 42 (29): 5831-5838.
- [40] **Niehoff W, Gorelik V and Hibbing M** (1998) *Optisches Mikrofon*, German Patent DE19835947 A1.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [41] **Ishikawa K, Tanigawa R, Yatabe K, Oikawa Y, Onuma T and Niwa H** (2018) Simultaneous Imaging of Flow and Sound Using High-Speed Parallel Phase-Shifting Interferometry. *Optics Letters*, 43 (5): 991-994.
- [42] **Oikawa Y, Yatabe K, Ishikawa K and Ikeda Y** (2016) Optical Sound Field Measurement and Imaging Using Laser and High-Speed Camera, *45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future, INTER-NOISE 2016*, 21-24 August 2016, Hamburg, Germany, 258-266.
- [43] **Kraft S and Zölzer U** (2016) Optical Techniques for Sound Processing, *SPIE Optical Engineering and Applications*, 30 September 2016, San Diego, California, United States, Proceedings SPIE 9948, Novel Optical Systems Design and Optimization XIX, 99480Y, Vol.9948, 9933-9948.
- [44] **Lokberg, O J** (1994) Sound in Flight: Measurement of Sound Fields by Use of TV Holography. *Applied Optics*, 33 (13): 2574-2584.
- [45] **Burton R A** (1949) A Modified Schieleren Apparatus for Large Areas of Field. *Journal of the Optical Society of America*, 39 (11): 907-908.
- [46] **T Ezure, K Mizutani and H Masuyama** (2004) Optical Measurement of Sound Fields Estimated From Multiple Interference Images Using Mach-Zehnder Interferometer. *Electronics and Communications in Japan*, 87 (11): 20-27.
- [47] **Suzuki Y and Kido K** (2011) A New Method for Airborne Sound Detection Using Total Internal Reflection and Its Application to Microphone. *Advances in Optical Technologies*, 2011 (Article ID 547597): 1-9.
- [48] **Harvey Palmer C and Green Jr R E** (1978) Optical Detection of Acoustic Emission Signals. 5th New Techniques and Phenomena. *Proceedings of the ARPA/AFML Review of Progress in Quantitative NDE*, September 1976–June 1977, Ithaca, NY, 161-165.
- [49] **Takei H, Hasegawa T, Nakamura K and Ueha S** (2007) Measurements of Intense Ultrasound Field in Air Using a Fiber Optic Probe. *Japanese Journal of Applied Physics*, 46 (7): 4555-4557.
- [50] **Høgmoen K and Løkberg O J** (1977) Detection and Measurement of Small Vibrations Using Electronic Speckle Pattern Interferometry. *Applied Optics*, 16 (7): 1869-1875.
- [51] **Li B, Smith J B L and Fujinaga I** (2009) Optical Audio Reconstruction for Stereo Phonograph Records Using White Light Interferometry. *Proceedings of the 10th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2009*, 26-30 October 2009, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, 627–632.
- [52] **Vehgdan J T** (2000) *Laser Microphone*. US Patent 6147787 A.
- [53] **Wang C C, Trivedi S, Jin F, Swaminathan V, Rodriguez P and Prasad N S** (2009) High Sensitivity Pulsed Laser Vibrometer and Its Application as A Laser Microphone. *Applied Physics Letters*, 94 (5): 051112.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [54] **Davis A, Rubinstein M, Wadhwa N, Mysore G J, Durand F and Freeman W T** (2014) The Visual Microphone: Passive Recovery of Sound From Video. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33 (4): 79-88.
- [55] **Matoba O, Quan X, Xia P, Awatsuji Y and Nomura T** (2017) Multimodal Imaging Based on Digital Holography. *Proceedings of the IEEE*, 105 (5): 906-923.
- [56] **Tahara T, Quan X, Otani R, Takaki Y and Matoba O** (2018) Digital Holography and Its Multidimensional Imaging Applications: A Review. *Microscopy*, 67 (2): 55-67.
- [57] **Graydon O** (2015) Optical Voice Recorder. *Nature Photonics*, 9 (2): 75.
- [58] **Rajput S K and Matoba O** (2017) Optical Voice Encryption Based on Digital Holography. *Optics Letters*, 42 (22): 4619-4622.
- [59] **Refregier P and Javidi B** (1995) Optical Image Encryption Based on Input Plane and Fourier Plane Random Encoding. *Optics Letters*, 20 (7): 767-769.
- [60] **Fukuda T, Wang Y, Xia P, Awatsuji Y, Kakue T, Nishio K and Matoba O** (2017) Three-Dimensional Imaging of Distribution of Refractive Index by Parallel Phase-Shifting Digital Holography Using Abel-Inversion. *Optics Express*, 25 (15): 18066-18071.
- [61] **Rajput S K and Matoba O** (2018) Holographic Sound Propagation Imaging. *SPIE/COS Photonics Asia*, 7 November 2018, Beijing, China, Proceedings SPIE, Holography, Diffractive Optics, and Applications VIII; 108180R, Vol. 10818, 1-7.
- [62] **Rajput S K and Matoba O** (2018) Digital Holographic Sound Imaging for Frequency Estimation of Piezoelectric Vibrator. *SPIE Commercial and Scientific Sensing and Imaging, 2018*, 16 May 2018, Orlando, Florida, United States, Proceedings SPIE, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2018; 1066617, Vol. 10666, 1-6.
- [63] **Quan X, Rajput S, Nitta K, Matoba O, Awatsuji Y** (2017) Optical Sound Wave Recording by Digital Holography With Heterodyne Technique. *SPIE Digital Optical Technologies, 2017*, 26 June 2017, Munich, Germany, Proceedings SPIE, Digital Optical Technologies 2017; 103351G, Vol. 10335, 1-6.
- [64] **Rajput S K, Matoba O and Awatsuji Y** (2018) Characteristics of Vibration Frequency Measurement Based on Sound Field Imaging by Digital Holography. *OSA Continuum*, 1 (1): 200-212.
- [65] **Oikawa Y, Ishikawa K, Yatabe K, Onuma T and Niwa H** (2018) Seeing the Sound We Hear: Optical Technologies for Visualizing Sound Wave. *SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2018*, 16 May 2018, Orlando, Florida, United States, Proceedings SPIE, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2018; 106660C, Vol. 10666, 1-8.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [66] **Fukuda T, Shinomura M, Xia P, Awatsuji Y, Nishio K and Matoba O** (2017) Three-Dimensional Motion-Picture Imaging of Dynamic Object by Parallel-Phase-Shifting Digital Holographic Microscopy Using an Inverted Magnification Optical System. *Optical Review*, 24 (1): 206-211.
- [67] **Takeda M and Mutoh K** (1983) Fourier Transform Profilometry For The Automatic of 3D Object Shapes. *Applied Optics*, 22 (24): 3977-3982.
- [68] **Kelly D P** (2014) Numerical Calculation of The Fresnel Transform. *Journal of the Optical Society of America A*, 31 (4): 755-764.
- [69] **Liebling M, Bernhard T F, Bachman A H, Froehly L, Lasser T and Unser M** (2005) Continuous Wavelet Transform Ridge Extraction For Spectral Interferometry Imaging. *Proceedings SPIE 5690, Coherence Domain Optical Methods and Optical Coherence Tomography in Biomedicine IX*, 5960 (1): 397-402.
- [70] **Grossman A and Morlet J** (1985) *Decomposition of Functions Into Wavelets of Constant Shape and Related Transforms*, 11th edition, Mathematics and Physics, Lectures on Recent Results, Ed.: L. Streit, World Scientific Publishing, Singapore, 135-165.
- [71] **Li S, Su X and Chen W** (2011) A New Wavelet Transform for Reliability-Guided Phase Unwrapping of Optical Fringe Patterns. *Optics Communications*, 284 (20): 4879-4883.
- [72] **Li S, Su X and Chen W** (2012) Hilbert Assisted Wavelet Transform Method of Optical Fringe Pattern Phase Reconstruction for Optical Profilometry and Interferometry. *Optik*, 123 (1): 6-10.
- [73] **Onal Tayyar D, Saraç Z and Ecevit F N** (2011) Real-Time Optical Reconstruction of the Diffused 3D Object Using Phase Information Calculated by Continuous Wavelet Transform. *Optics Communications*, 284 (23): 5460-5465.
- [74] **Acharya I and Upadhyay D** (2015) Comparative Study of Digital Holography Reconstruction Methods. *Procedia Computer Science*, 58 (2015): 649-658.
- [75] **Boscaro A, Jacquir S, Sanchez K, Perdu P and Binczak S** (2015) Improvement of Signal to Noise Ratio in Electro Optical Probing Technique by Wavelets Filtering. *Microelectronics Reliability*, 55 (1): 1585-1591.
- [76] **Gonzalez R C and Woods R E** (2002) *Digital Image Processing*. 2nd edition, ISBN: 978-0201180756, Prentice Hall Publisher, New Jersey, 954 pp.
- [77] **Zou Y, Tong L and Steven G** (2000) Vibration Based Model Dependent Damage (Delamination) Identification and Health Monitoring for Composite Structures- A Review. *Journal of Sound and Vibration*, 230 (2): 357-378.
- [78] **Mamalis A G, Petrossian G L and Manolakos D E** (1999) Effect of Porosity and Micro-Defects on Plastically Deformed Porous Materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 96 (1-3): 117-123.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [79] **Jiang T, Kong Q, Patil D, Luo Z, Huo L and Song G** (2017) Detection of Debonding Between FRP Rebar and Concrete Structure Using Piezoceramic Transducers and Wavelet Packet Analysis, *IEEE Sensors Journal*, 17 (7): 1992–1998.
- [80] **Zhimin X, Xueling F, Weixu Z and Wang T J** (2015) Numerical Analysis of Anisotropic Elasto-Plastic Deformation of Porous Materials With Arbitrarily Shaped Pores. *International Journal of Mechanical Sciences*, 96-97 (1): 121-131.
- [81] **Liu P, Groves R M and Benedictus R** (2014) 3D Monitoring of Delamination Growth in A Wind Turbine Blade Composite Using Optical Coherence Tomography. *NDT & E International*, 64 (1): 52-58.
- [82] **Ghadermazi K, Khozeimeh M A, Taheri-Behrooz F and Safizadeh M S** (2015) Delamination Detection in Glass–Epoxy Composites Using Step-Phase Thermography (SPT). *Infrared Physics & Technology*, 72 (1): 204-209.
- [83] **Karabutov A A and Podymova N B** (2014a) Quantitative Analysis of The Influence of Voids and Delaminations on Acoustic Attenuation in CFRP Composites by The Laser-Ultrasonic Spectroscopy Method. *Composites Part B: Engineering*, 56 (1): 238-244.
- [84] **Albishi A M and Ramahi O M** (2016) Surface Crack Detection in Metallic Materials Using Sensitive Microwave-Based Sensors. *2016 IEEE 17th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 11-13 April 2016, Clearwater, FL, USA, 1-3.
- [85] **Yamaguchi I, Ida T, Yokota M and Yamashita K** (2006) Surface Shape Measurement By Phase-Shifting Digital Holography With a Wavelength Shift. *Applied Optics*, 45 (29): 7610-7616.
- [86] **Mohan A and Poobal S** (2018) Crack Detection using Image Processing: A Critical Review and Analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57 (1): 787-798.
- [87] **Tai K** (2017) The Application of Digital Image Processing Technology in Glass Bottle Crack Detection System. *Acta Technica*, 62 (1A): 381-390.
- [88] **Uçar metal Home Page**. (13.06.2018) Adres: <http://www.ucarmetal.com/catlak-kontrol-cihaz.asp>
- [89] **Sudatham W, Matsumoto H, Takahashi S and Takamasu K** (2016) Non-Contact Measurement Technique For Dimensional Metrology Using Optical Comb. *Measurement*, 78 (1): 381-387.
- [90] **Gholizadeh S** (2016) A Review of Non-Destructive Testing Methods of Composite Materials. *Procedia Structural Integrity*, 1 (1): 50–57
- [91] **Katunin A, Dragan K and Dziendzikowski M** (2015) Damage Identification in Aircraft Composite Structures: A Case Study Using Various Nondestructive Testing Techniques. *Composite structures*, 127 (1): 1-9.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [92] **Broberg P** (2013) Surface Crack Detection in Welds Using Thermography. *NDT & E International*, 57 (1): 69-73.
- [93] **Keshtgar A and Modarres M** (2013) Detecting Crack Initiation Based on Acoustic Emission. *Chemical Engineering Transactions*, 33 (1): 547-552.
- [94] **Bossi R H and Giurgiutiu V** (2015) Nondestructive Testing of Damage in Aerospace Composites. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, Irving P E and Soutis C (Ed.), 1st edition, ISBN: 978-0-85709-523-7, Woodhead Publishing, e-book, 413-448.
- [95] **Aoyagi M, Hiraguri T and Ueno T** (2014) Nondestructive Detection of Cracks Near the Surface of Wooden Boards by Dynamic Heat Dissipation. *Wood Science and Technology*, 48 (4): 773-786.
- [96] **Vavilov V P, Budadin O N and Kulkov A A** (2015) Infrared Thermographic Evaluation of Large Composite Grid Parts Subjected to Axial Loading. *Polymer Testing*, 41 (0): 55-62.
- [97] **Vavilov V P, Plesovskikh A V, Chulkov A O and Nesteruk D A** (2015) A Complex Approach to the Development of the Method And Equipment for Thermal Nondestructive Testing of CFRP Cylindrical Parts. *Composites Part B: Engineering*, 68 (1): 375-384.
- [98] **Kersemans M, Baere I D, Degrieck J, Abeele K V D, Pyl L, Zastavnik F, Sol H and Paepegem W V** (2014) Nondestructive Damage Assessment in Fiber Reinforced Composites With the Pulsed Ultrasonic Polar Scan. *Polymer Testing*, 34 (1): 85-96.
- [99] **Yu D, Wenbin S, Hong Y and Yan Y** (2013) Measurements of the Characteristics of Transparent Material Using Digital Holography. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013 (598737): 1-7.
- [100] **Doyle P A and Scala C M** (1978) Crack Depth Measurement by Ultrasonics: A Review. *Ultrasonics*, 16 (4): 164-170.
- [101] **Rodríguez-Martín M, Lagüela S, González-Aguilera D and Martínez J** (2016) Thermographic Test for The Geometric Characterization of Cracks in Welding Using IR Image Rectification. *Automation in Construction*, 61 (1): 58-65.
- [102] **Dorafshan S, Maguire M and Collins W** (2018) Infrared Thermography for Weld Inspection: Feasibility and Application. *Infrastructures*, 3 (4): 45-62.
- [103] **Prasanna P, Dana K, Gucunski N and Basily B** (2012) Computer-Vision Based Crack Detection And Analysis. *SPIE Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 6 April 2012, San Diego, California, United States, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, 834542, Vol. 8345, 1-6.
- [104] **Shi Z, Xu X, Ma J, Zhen D and Zhang H** (2018) Quantitative Detection of Cracks In Steel Using Eddy Current Pulsed Thermography. *Sensors*, 18 (4): 1070.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [105] **Seebacher S, Osten W, Werner P and Jueptner O** (1998) Measuring Shape And Deformation of Small Objects Using Digital Holography. *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, 1998*, 6 July 1998, San Diego, CA, United States, Laser Interferometry IX: Applications, Vol. 3479, 104-115.
- [106] **Takahashi I, Nomura T, Morimoto Y, Yoneyama S and Fujigaki M** (2003) Deformation Measurement by Digital Holographic Interferometry. *Photonics Technologies for Robotics, Automation, and Manufacturing*, 30 September 2003, Providence, RI, United States, Optomechatronic Systems IV, Vol. 5264, 1-8.
- [107] **Lédl V, Kaván F, Matousek O, Dolecek R and Psota P** (2017) Large Displacement And Deformation Measurement by Frequency Sweeping Digital Holography. *Photonics Prague (2017)*, 1 December 2017, Prague, Czech Republic, Photonics, Devices, and Systems VII; 106030C, Vol. 10603, 1-7.
- [108] **Lédl V, Psota P, Kaván F, Matoušek O and Mokřý P** (2017) Surface Topography Measurement by Frequency Sweeping Digital Holography. *Applied Optics*, 56 (28): 7808-7814.
- [109] **Morimoto Y, Nomura T, Fujigaki M, Yoneyama S and Takahashi I** (2005) Deformation Measurement by Phase-shifting Digital Holographic Interferometry. *Experimental Mechanics*, 45 (1): 65-70.
- [110] **Zhou W, Peng J and Yu Y-J** (2005) Deformation Measurement Via Digital Holography. *Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering*, 13 (1): 46-51.
- [111] **Aguayo D D, Mendoza Santoyo F, De la Torre-I M H, Salas-Araiza M D, Caloca-Mendez C and Gutierrez Hernandez D A** (2010) Insect Wing Deformation Measurements Using High Speed Digital Holographic Interferometry. *Optics Express*, 18 (6): 5661-5667.
- [112] **Claus D** (2010) High Resolution Digital Holographic Synthetic Aperture Applied to Deformation Measurement And Extended Depth of Field Method. *Applied Optics*, 49 (16): 3187-3198.
- [113] **Yamaguchi I** (2005) Image Formation and Measurement of Surface Shape and Deformation by Phase-Shifting Digital Holography. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5642 (1): 66-77.
- [114] **Dekiff M, Berssenbrügge P, Kemper B, Denz C and Dirksen D** (2015) Simultaneous Acquisition of 3D Shape And Deformation by Combination of Interferometric And Correlation-Based Laser Speckle Metrology. *Biomedical Optics Express*, 6 (12): 4825-4840.
- [115] **Şan U, Ustabaş Kaya G and Saraç Z** (2016) Non-Contact Performance Analysis of The Core Materials by Digital Holographic Interferometry. *IET Science, Measurement & Technology*, 10 (1): 38-43.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [116] **Maaboud N F A, El-Bahrawi M S and Abdel-Aziz F** (2010) Digital Holography in Flatness and Crack Investigation. *Metrology and Measurement Systems*, 17 (4): 583-588.
- [117] **Tankam P and Picart P** (2011) Use of Digital Color Holography For Crack Investigation in Electronic Components. *Optics Lasers Engineering*, 49 (1): 1335-1342.
- [118] **Wu X, Gao W and He Y** (2016) Estimation of Parameters for Evaluating Subsurface Microcracks in Glass With In-Line Digital Holographic Microscopy. *Applied Optics*, 55 (3): A32-A42.
- [119] **Yatabe K, Ishikawa K and Oikawa Y** (2017) Signal Processing For Optical Sound Field Measurement And Visualization. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 29 (1): 1-8.
- [120] **Ustabaş Kaya G and Saraç Z** (2018) The Determination of Crack on Glass Surface by Optical Voice Detector Based on Digital Holography. *1st International Conference on Optics, Photonics and Lasers (OPAL' 2018)*, (9-11 May 2018), Castelldefels Barcelona, Spain, *Optics, Photonics and Lasers OPAL' 2018 Conference Proceedings*, ISBN: 978-84-09-01758-4, IFSA Publishing, S. L., Barcelona, Spain, 171-175.
- [121] **Metin Ö** (2014) *Optik*, Üçüncü Basım, ISBN: 978-605-355-220-8. Palme Yayıncılık, Ankara, 640 s.
- [122] **Armağan N (Ed.) ve Can N (Ed.)** (2005) *Hecth & Optik*, İkinci Basım, ISBN: 975-6885-02-5. Akademi Yayın Hizmetleri, Kavaklıdere, Ankara, 965 s.
- [123] **Bateman H** (1955) *The Mathematical Analysis of Electrical And Optical Wave Motion on The Basis of Maxwell's Equations*. Dover Publications, New York, USA, 159 pp.
- [124] **Cooley J W, Lewis P A W and Welch P D** (1970) The Fast Fourier Transform Algorithm: Programming Considerations in the Calculation of Sine, Cosine and Laplace Transforms, *Journal of Sound Vibration*, 12 (3): 315-337.
- [125] **Okur İ (Ed.)** (2000) *Optoelektronik*, Birinci Basım, ISBN: 975-828-910-1. Değişim Yayınları, Adapazarı, Sakarya, 518 s.
- [126] **Nahin P J** (2006) Dr.Euler's Formula. Cures Many Mathematical IIIs, 1st edition, ISBN: 978-0691118222, Princeton University Press; Princeton, N J., 416 pp.
- [127] **Born M and Wolf E** (1999) Principles of Optics, 7th edition, ISBN: 9781139644181, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 986 pp.
- [128] **URL-1**<<https://www.scientificamerican.com/article/what-is-an-optical-interf/>>, Ziyaret tarihi: 24.10.2018.
- [129] **URL-2**< <https://www.britannica.com/technology/optical-interferometer>>, Ziyaret tarihi: 24.10.2018.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [130] **Mantravadi M V and Malacara D** (2006) Newton, Fizeau, and Haidinger Interferometers. *Optical Shop Testing*, Malacara D (Ed.) 3rd edition, ISBN: 9780471484042, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1-45.
- [131] **URL-3** < http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/michelson.html >, Ziyaret tarihi: 12.02.2019.
- [132] **Klein M V and Furtak T E** (1988) *Optik*, 1st edition, ISBN: 978-3-642-73409-0, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin (e-book), 514 pp.
- [133] **Latta J N** (1971) Computer-Based Analysis of Hologram Imagery and Aberration. I. Hologram Types and Their Nonchromatic Aberrations. *Applied Optics*, 10 (3): 599-608.
- [134] **Abramson N** (1982) *The Making and Evaluation of Holograms*. 1st edition, ISBN: 978-0120428205, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, ABD, 326 pp.
- [135] **Denisyuk Y N** (1962) Photographic Recosntruction of The Optical Properties of an Object in Its Own Scattered Radiation Field. *Soviet Physics Doklady*, 7 (6): 543-545.
- [136] **Wyant J C** (1977) Image Blur For Rainbow Holograms. *Optics Letters*, 1 (4): 130-132.
- [137] **URL-4** < <http://www.mthologram.com/uretimi.htm> >, Ziyaret tarihi: 24.10.2018.
- [138] **Kronrod M A, Merzlyakov N S and Yaroslavsky L P** (1972) Reconstruction of a Hologram With a Computer. *Soviet Physics-Technical Pyhsics*, 17 (2): 419-420.
- [139] **Sutkowski M and Kujawinska M** (2000) Application of Liquid Crystal (LC) Devices For Optoelectronic Reconstruction of Digitally Stored Holograms. *Optics and Lasers in Engineering*, 33 (3): 191-201.
- [140] **Ripoll O, Kettunen V and Herzig H P** (2004) Review of Iterative Fourier-Transform Algorithms For Beam Shaping Applications. *Optical Engineering*, 43 (11): 2549–2556.
- [141] **Abookasis D and Rosen J** (2006) Three Types of Computer-Generated Hologram Synthesized From Multiple Angular Viewpoints of Three-Dimesional Scene. *Applied Optics*, 45 (25): 6533-6538.
- [142] **Zheng H, Yu Y and Dai C** (2009) A Novel Three-Dimensional Holographic Display System Based on LC-R2500 Spatial Light Modulator. *Optik*, 120 (9): 431-436.
- [143] **Hao Qiang T** (2011) Numerical Reconstruction of Digital Hologram. *Final Year Project*, UTAR Universiti Tunku Abdul Rahman, Institutional Repository, Faculty of Engineering and Science, 64 pp.
- [144] **Quan X, Matoba O and Awatsuji Y** (2017) Image Recovery From Defocused 2D Fluorescent Images in Multimodal Digital Holographic Microscopy. *Optics Letters*, 42 (9): 1796-1799.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [145] **Quan X, Matoba O and Awatsuji Y** (2017) Single-Shot Incoherent Digital Holography Using a Dual-Focusing Lens With Diffraction Gratings. *Optics Letters*, 42 (3): 383-386.
- [146] **Gray R M and Goodman J W** (1995) *Fourier Transforms: An Introduction For Engineers*. 1st edition, ISBN: 978-0-7923-9585-0, Springer US, Kluwer Academic Publishers, Boston, 361 pp.
- [147] **Pitts T A and Greenleaf J F** (2003) Fresnel Transform Phase Retrieval from Magnitude. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 50 (8): 1035- 1045.
- [148] **James D F V and Agarwal G S** (1996) The Generalized Fresnel Transform and Its Application to Optics. *Optics Communications*, 126 (4-6): 207-212.
- [149] **Taylor L H and Brandt G B** (1972) An Error Analysis of Holographic Strains Determined by Cubic Splines. *Experimental Mechanics*, 12 (12): 543-548.
- [150] **Goswami J C and Chan A K** (2011) *Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications*. 2nd edition, ISBN: 978-0-470-48413-5, Wiley Publishing, Hoboken, N J, 359 pp.
- [151] **Polikar R** (1999) *The Story of Wavelets, in Physics and Modern Topics in Mechanical and Electrical Engineering*. Mastorakis N edition, Physics and Modern Topics in Mechanical and Electrical Engineering. World Scientific and Engineering Society Press, Athens, 192-197.
- [152] **HALIDONMUSIC** “The Best Of Piano”. (27.04.2018), Adres: <https://www.youtube.com/watch?v=uYaPF5wZNEo>
- [153] **URL-5** <<https://fizikdersi.gen.tr/ses-dalgalari-temel-ozellikleri/>>, Ziyaret tarihi: 24.10.2018.
- [154] **URL-6** <<https://rasyonalist.org/yazi/elektromanyetik-dalgalar-gorunur-bolge/>>, Ziyaret tarihi: 10.02.2019.
- [155] **Ertürk S** (2009) *Sayısal İşaret İşleme*. 2. Basım, ISBN: 978-975-511-309-6, Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul, 346 s.
- [156] **Alasaarela G, Tervola K, Ylitalo J and Koivukanges J** (1982) UHB Imaging. *Acoustical Imaging*, 1st edition, Vol. 12, ISBN: 978-1-4613-9782-3, Plenum press, New York, 687-696.
- [157] **Tsuyoshi Y, Mashiki I, Satoshi F and Yoshinao A** (1984) Ultrasound Holographic B-Scan Imaging System Using Wideband Chirp Signal. *Bulletin of the Faculty of Engineering, Hokkaido University*, 119 (1): 85-94.
- [158] **Han Z, Peng H, Zhao X and Chen X** (2017) 3D Ultrasound Imaging in Frequency Domain Based on Concepts of Array Beam and Synthetic Aperture. *Ultrasonics*, 84 (1): 254–263.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [159] **Del Castillo H, De La Fuente B, Barcenilla V, López P and Fernández F** (2016) Check Valve Diagnosis By Sectorial Scanning Phased Array Ultrasonic Technique. *19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)*, 13-17 June 2016, Munich, Germany, Vol. 1-6, ISBN: 978-1-5108-2949-7, 4629-4638.
- [160] **Bulavinov A, Joneit D, Kröning M, Bernus L, Dalichow M H and Reddy K M** (2007) Sampling Phased Array a New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 48 (9): 1-13.
- [161] **Meyer A, Gspan S J, Bernet S and Ritsch-Marte M** (2003) Tailoring Ultrasonic Beams With Optoacoustic Holography. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4969 (1): 105-114.
- [162] **Yamamoto K** (2005) Optical Visualization of Ultrasonic Waves Propagating in A Fluid Waveguide. *Acoustical Letter*, 26 (4): 378-380.
- [163] **Zhang R, Zhang W, He C, Zhang Y, Song J and Xue C** (2016) Underwater Imaging Using a 1×16 CMUT Linear Array. *Sensors*, 16 (3): 312-321.
- [164] **Wang X, Zhang G. M, Ma H, Zhang Y and Wang D** (2018) Measurement of a 3D Ultrasonic Wavefield Using Pulsed Laser Holographic Microscopy for Ultrasonic Nondestructive Evaluation. *Sensors*, 18 (2): 573-590.
- [165] **Bianco V, Memmolo P, Leo M, Montresor S, Distante C, Paturzo M, Picart P, Javidi B and Ferraro P** (2018) Strategies For Reducing Speckle Noise in Digital Holography. *Light: Science & Applications*, 7 (48): 1-16.
- [166] **Sarode M V and Deshmukh P R** (2011) Reduction of Speckle Noise and Image Enhancement of Images Using Filtering Technique. *International Journal of Advancements in Technology*, 2 (1): 30-38.
- [167] **Leo M, Piccolo R, Distante C, Memmolo P, Paturzo M and Ferraro P** (2014) Multilevel Bidimensional Empirical Mode Decomposition: A new Speckle Reduction Method in Digital Holography. *Optical Engineering*, 53 (11): 112314-112324.
- [168] **Montresor S and Picart P** (2016) Quantitative Appraisal for Noise Reduction in Digital Holographic Phase Imaging. *Optics Express*, 24 (13): 14322-14343.
- [169] **Pan F, Xiao W, Liu S and Rong L** (2013) Coherent Noise Reduction in Digital Holographic Microscopy by Laterally Shifting Camera. *Optics Communications*, 292 (1): 68-72.
- [170] **Haouat M, Garcia-Sucerquia J, Kellou A and Picart P** (2017) Reduction of Speckle Noise in Holographic Images Using Spatial Jittering in Numerical Reconstructions. *Optics Letters*, 42 (6): 1047-1050.
- [171] **Cai X** (2010) Reduction of Speckle Noise in The Reconstructed Image of Digital Holography. *Optik*, 121 (4): 394-399.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [172] **Cai X and Wang H** (2008) The Influence of Hologram Aperture on Speckle Noise in The Reconstructed Image of Digital Holography and Its Reduction. *Optics Communication*, 281 (2): 232-237.
- [173] **Kaur S** (2015) Noise Types and Various Removal Techniques. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering*, 4 (2): 226-230.
- [174] **Abdelsalam D G and Kim D** (2011) Coherent Noise Suppression in Digital Holography Based on Flat Fielding With Apodized Apertures. *Optics Express*, 19 (19): 17951-17959.
- [175] **Kaisar S, Rijwan S, Al Mahmud J and Rahman M M** (2008) Salt and Pepper Noise Detection and Removal by Tolerance Based Selective Arithmetic Mean Filtering Technique for Image Restoration. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 8 (6): 271-278.
- [176] **Ustabaş Kaya G and Saraç Z** (baskıda) Crack Detection by Optical Voice Recorder Based on Digital Holography. *Photonic Sensors*.

ÖZGEÇMİŞ

Gülhan USTABAŞ KAYA 1986’da Eskişehir’de doğdu; lise öğrenimi Sinop Anadolu Lisesinde tamamladı. 2005 yılında girdiği Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden 2010 yılında mezun oldu. 2008-2009 yılları arasında Universidade Nova De Lisboa (Lizbon-Portekiz) üniversitesinde Erasmus kapsamında eğitim aldı. 2009 yılında Aachen Continental (Almanya) fabrikasında stajyer mühendis olarak çalıştı. 2010-2011 (6 ay) yılları arasında Mina Elektrik Limited Şirketinde Proje mühendisi olarak görev yaptı. 2011 (Ocak) yılında Bülent Ecevit Üniversitesi (Zonguldak Karaelmas Üniversitesi) Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başladı ve 2013 yılında mezun oldu. Halen BEÜ Elektrik –Elektronik Mühendisliği Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Anabilim Dalı’nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Zonguldak B.E.Ü. Elektrik-Elektronik Mühendisliği

İncivez – ZONGULDAK

Tel : 0372 291 1552

E-posta : gulhan.ustabas@beun.edu.tr