



**HAVACILIKTA KULLANILAN KARBON FİBER KOMPOZİT
MALZEMELERİN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE ULTRASONİK
TEST GÖRÜNTÜLERİNİN YORUMLANMASI**

Hanifi Taygun TALU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hanifi Taygun TALU

04/01/2023

HAVACILIKTA KULLANILAN KARBON FİBER KOMPOZİT MALZEMELERİN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE ULTRASONİK TEST GÖRÜNTÜLERİNİN

YORUMLANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hanifi Taygun TALU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Havacılık, uzay gibi kritik sektörlerde kullanılan malzemelerde bulunabilecek çatlaklar, süreksizlikler ve hatalar kritik olan yapının bozulmasına yol açar. Bu alanların incelenmesi için tahribatsız muayene tekniklerinden birisi olan ultrasonik muayene kullanılmaktadır. Hata tespitinde elde edilen görüntülerin çözünürlük sorunları sebebiyle hata boyutları tam anlamıyla anlaşılamayacak olmasından dolayı manuel inceleme yapılmaktadır. Manuel incelemede süreksizliğin krokisi manuel olarak hazırlanır ve düzensizliklerin durumu not edilir. Manuel yaklaşım tamamen uzmanın bilgi ve deneyimine bağlı olduğundan, nicel analizde nesnellikten yoksundur. Bu nedenle, otomatik görüntü tabanlı süreksizlik tespiti alternatif olarak önerilmektedir. Literatürde, görüntü işleme tekniklerini kullanarak süreksizliklerin tespitine yönelik farklı tekniklerin yer aldığı çalışmalar bulunmaktadır. Malzeme yüzeyinde oluşan çatlak tespitinde geliştirilen uygulamalar da bu teknikler arasındadır. Yapılan literatür araştırmasında, bu tekniklerin havacılıkta kullanılan karbon fiber kompozit malzemelerin ultrasonik test görüntüleri üzerinde çalışılmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışma ile ultrasonik görüntülerde bulunan hataların boyutlandırmasında kullanılabilecek en etkili görüntü işleme tekniğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla süreksizlik tespiti ile ilgili 3 farklı metot ele alınmış ve incelenmiştir. Bu tez kapsamında, görüntü inceleme tekniklerine, bu tekniklerin doğruluk seviyelerine ve görüntü veri setlerine göre sonuç analizleri yapılmıştır.

Bilim Kodu : 92418
Anahtar Kelimeler : Görüntü işleme, tahribatsız muayene, ultrasonik muayene
Sayfa Adedi : 69
Danışman : Doç. Dr. Uğur GÖKMEN
İkinci Danışman : Öğr. Gör. Dr. Murat AKIN

EVALUATION OF ULTRASONIC TEST IMAGES OF CARBON FIBER COMPOSITE MATERIALS USED IN AEROSPACE WITH IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

(M. Sc. Thesis)

Hanifi Taygun TALU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Cracks, discontinuities and errors that can be found in materials used in critical sectors such as aviation and aerospace, cause the deterioration of the critical structure. Ultrasonic inspection, which is one of the non-destructive testing techniques, is used to examine these areas. Due to the resolution problems of the images obtained in error detection, the error dimensions cannot be fully comprehended, and manual examination is performed in order to solve this issue. In manual inspection, the discontinuity is sketched manually and the status of the irregularities is noted. The manual approach lacks objectivity in quantitative analysis, as it depends entirely on the knowledge and experience of the expert. Therefore, automatic image-based discontinuity detection is suggested as an alternative. Various methods for detecting discontinuities using image-processing techniques have been described in the literature. The detection of cracks on the material surface is also one of these techniques. In the literature review, it was determined that these techniques were not studied on the ultrasonic test images of carbon fiber composite materials used in aviation. With this study, it is aimed to identify the most effective image processing technique that can be used for sizing the defects found in ultrasonic images. For this purpose, three different methods of discontinuity detection are discussed and analyzed. In the scope of this thesis, analysis was made according to image analysis techniques, the accuracy levels of these techniques and image data sets.

Science Code : 92418
Key Words : Image processing, nondestructive testing, ultrasonic testing
Page Number : 69
Supervisor : Assoc. Prof. Uğur GÖKMEN
Co-Supervisor : Lect. PhD Murat AKIN

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sürecinde yardım ve desteğini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Uğur GÖKMEN hocama, bu tezin hazırlanması sürecinde her zaman desteğini gördüğüm, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Öğr. Gör. Dr. Murat AKIN hocama sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım. Ayrıca hayatımın her aşamasında bana güç veren ve hep yanımda olan, çalışmalarım boyunca beni sabırla destekleyen değerli eşim İmral TUÇ TALU'ya ve değerli aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TAHRİBATSIZ MUAYENE.....	5
2.1. Görsel kontrol yöntemi.....	6
2.2. Radyografik muayene.....	6
2.3. Girdap akımları ile muayene.....	7
2.4. Ultrasonik muayene yöntemi.....	7
2.5. Tahribatsız Muayene Personeli ve Sertifikasyon Süreci.....	16
2.6. ISO 9712 Standardına Göre Tahribatsız Muayene Personellerinin Eğitim Süreleri.....	17
2.7. Eğitimin Ana Hatları.....	19
2.8. Ultrasonik Muayene İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	19
3. GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ VE GÖRÜNTÜNÜN YORUMLANMASI.....	27
3.1. Görüntü İşleme Teknikleri.....	27
3.1.1. Otsu eşikleme.....	28
3.1.2. Gabor filtresi.....	31
3.1.3. Canny kenar tespit algoritması.....	33

Sayfa

4..MATERYAL VE YÖNTEM.....	37
4.1. Ultrasonik Test Ekipmanı.....	37
4.1.1. TECNATOM çift başlıklı ultrasonik tarama robotu.....	37
4.1.2. Manuel tarama cihazı.....	41
4.2. Veri Seti.....	43
4.3. Uygulama Geliştirme Ortamı.....	45
4.4. Karbon Fiber Test Malzemesinin Taranma Prosedürü.....	46
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	49
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
7. KAYNAKLAR.....	63
8. ÖZGEÇMİŞ.....	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ISO 9712'ye göre tahribatsız muayene yöntemlerinde eğitim süreleri.....	18
Çizelge 4.1. TECNATOM ultrasonik tarama robotu özellikleri (TTU Modu).....	39
Çizelge 4.2. TECNATOM ultrasonik tarama robotu özellikleri (PE Modu).....	40
Çizelge 4.3. Olympus Omniscan SX teknik özellikleri.....	41
Çizelge 4.4. Olympus Omniscan MX teknik özellikleri.....	43
Çizelge 4.5. TECNATOM Çift başlıklı ultrasonik tarama robotu uygulama değerleri..	47
Çizelge 4.6. Manuel tarama cihazı parametreleri.....	48
Çizelge 5.1. Görüntü işleme tekniklerine göre yorumlanan hata boyutları.....	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ultrasonik muayene çalışma prensibi.....	8
Şekil 2.2. Geleneksel UT ve fazlı dizili UT arasındaki karşılaştırma görüntüsü.....	11
Şekil 2.3. Fazlı dizili problemlerin şematik görünümü.....	12
Şekil 2.4. Fazlı dizili dönüştürücü elemanlarının geometri örnekleri.....	13
Şekil 2.5. Örnek C-Scan tarama görüntüsü (Renkli).....	14
Şekil 2.6. Örnek C-Scan tarama görüntüsü (Siyah - beyaz).....	15
Şekil 5.1. 3 farklı görüntü işleme yöntemi ile elde edilen sonuçlarla süreksizliklerin gerçek boyutlarına göre karşılaştırma tablosu.....	57

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Düşük frekanslı fazlı dizi probu ve prob tutucusu.....	13
Resim 3.1. Otsu filtresi uygulanmadan önceki orijinal görüntü.....	31
Resim 3.2. Otsu algoritması eşik görüntüsü.....	31
Resim 3.3. Orijinal görüntü.....	36
Resim 3.4. Canny kenar tespit algoritması görüntüsü.....	36
Resim 4.1. TECNATOM ultrasonik tarama robotu.....	38
Resim 4.2. TECNATOM ultrasonik tarama robotu (TTU Modu).....	39
Resim 4.3. TECNATOM ultrasonik tarama robotu (PE Modu).....	40
Resim 4.4. Olympus Omniscan SX.....	42
Resim 4.5. Olympus Omniscan MX2.....	42
Resim 4.6. Kalibrasyon test plakası.....	44
Resim 4.7. Kalibrasyon test plakası bölge 1 (40 x 40 mm uygunsuzluk alanı).....	44
Resim 4.8. Kalibrasyon test plakası bölge 2.....	45
Resim 4.9. Kalibrasyon test plakası bölge 3.....	45
Resim 5.1. Kalibrasyon test plakasının belirlenen bölgeleri.....	49
Resim 5.2. Gabor filtresi sonrası Bölge 1'in görüntüsü.....	50
Resim 5.3. Otsu filtresi sonrası Bölge 1'in görüntüsü.....	51
Resim 5.4. Canny filtresi sonrası Bölge 1'in görüntüsü.....	52
Resim 5.5. Gabor filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü.....	53
Resim 5.6. Otsu filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü.....	54
Resim 5.7. Canny filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü.....	54
Resim 5.8. Gabor filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü.....	55
Resim 5.9. Otsu filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü.....	55
Resim 5.10. Canny filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

MHz

Megahertz

db

Desibel

hz

Hertz

mm

Milimetre

V

Volt

Kısaltmalar

Açıklamalar

AT

Akustik Emisyon Muayenesi

ET

Eddy Current Test

ISO

International Organization for Standardization

LT

Leak Test

MT

Manyetik Parçacık Muayene

NDT

Nondestructive Testing (Tahribatsız muayene)

OJT

On Job Training (İş üzerinde eğitim)

PE

Pulse Echo

PT

Penetrant Muayenesi

RT

Radyografik Muayene

TT

Through-transmission

UT

Ultrasonik test

VT

Visual testing (Görsel muayene)

1. GİRİŞ

Havacılık ve uzay sektöründe kullanılan fiber kompozit malzemelerin ultrasonik test görüntülerinde tespit edilebilecek hataları ortaya çıkarmak için genellikle manuel ya da tam otomatik tezgâhlardan yararlanılır. Ultrasonik muayene yöntemleri ile yapılan testlerin sonuçlarının elde edilmesi genellikle görüntüyü yorumlama için gereken süre ile doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Yorumlama, diğer deyişle görüntünün değerlendirilmesi genellikle otomatik olmayan bir şekilde, elde edilen verileri dikkatli bir şekilde analiz eden sertifikalı kalite personelleri tarafından yapılır. Bu taramaların yapılabilmesi için personellerin pratik ve teorik sınavları geçmesi, buna ek olarak 800 saati aşkın iş üzerinde eğitim ya da başka bir deyişle OJT (on job training) süresini tamamlaması beklenmektedir (ISO:9712, 2012). Tüm bu süreçlere ek olarak, personelin sertifika alabilmesi için bir uygulama sınavına daha girmesi ve bu sınavda başarıya ulaşması gerekmektedir. Bu süreç sonucunda personel malzemeyi ve görüntüleri yorumlayabilir hale gelebilmektedir. Tüm bu işlemler göstermektedir ki bir kalite personelinin ultrasonik muayene alanında uzmanlığa ulaşabilmesi için takip edeceği yol haritası ve süreci oldukça uzun ve karmaşıktır (Gür, 2013).

Sertifikalı kalite kontrolörün manuel şekilde görüntüleri muayene edebildiği gibi bunun hız, doğruluk ve objektiflik açısından dezavantajları da vardır (Murgatroyd, Worrall ve Crutzen, 1995). Manuel kontrolün yanı sıra ultrasonik görüntüleri ve görüntü içerisinde bulunabilecek hataları otomatik bir şekilde algılama, yorumlama ve inceleme için görüntü işleme tekniklerinden yararlanılabilir. Teknolojinin gelişimiyle birlikte görüntü işleme yöntemlerinde artan yorumlama hızının yanı sıra, geliştirilen uygulamalar ile birlikte yapılan üretimin kalitesi hakkında anında geri bildirim verilerek, üretimi kesintisiz şekilde sürdürmeye ve böylece üretim maliyetlerini düşürmeye yardımcı olunmaktadır.

Tahribatsız muayene görüntülerinde görüntü işleme tekniklerinin kullanılması yeni bir durum değildir. Bu konu hakkındaki literatür göstermektedir ki tahribatsız muayene yöntemlerinde hatanın tespiti, boyutlandırılması ve konumlandırılması için çalışmalar yapılmakta ve yapılmaya da devam etmektedir.

Mohan ve Poobal, malzeme içerisinde ve ya yüzeyinde bulunan çatlakların tespitinde kullanılan görüntü işleme tekniklerini ele alan 50 çalışmanın kıyaslamasını sunmuştur.

Yapılan çalışmaya göre; çatlağın uzunluğu, çatlağın genişliği, çatlağın yayılma yönü gibi hedeflerin dikkate alındığı objektif temelli analizler dikkate alınmıştır. Bu çalışmalarda yer alan metodolojiler için kullanılan veri kümeleri analiz edilmiş ve geliştirilen çalışmaların verimlilik için gerçek veri kümelerini kullanıldığı sonucuna varmışlardır. Her çalışmada kullanılan görüntü işleme tekniklerine dayalı olarak analizlerini gerçekleştirmişlerdir ve sonuç olarak çok sayıda araştırmacının, çatlak tespitleri için eşik tekniği ve yeniden yapılandırılabilir özellik çıkarma tekniği gibi daha iyi segmentasyon algoritması kullanan ve kamera ile desteklenen yöntemleri tercih ettiği sonucuna varmışlardır (Mohan ve Poobal, 2018).

Dong, Taylor ve Cootes, havacılıkta kullanılan parçalar için otomatik algılamaya dayalı bir hata inceleme sistemini incelemiştir. Bu sistem, havacılık ve uzay imalat endüstrisinde çalışan kalite kontrolörlere yardımcı olmak için tasarlanmıştır. Önerilen sistem, bir havacılık bileşeninin X-ışını görüntüsünde bulunan kaynağı, görüntünün geri kalanından ayırarak yapılacak analizi küçültmeye, ardından çıkarılan kaynak içerisinde kusurların bulunup bulunmadığını belirlemek için analiz edilmesine dayanmaktadır. Yapılan çalışmanın sonucunda, tahribatsız muayene görüntülerindeki kaynağın doğru bir şekilde sınıflandırıldığı ve hatalı kaynak görüntülerinden % 83'ünde kusurun doğru bir şekilde tespit edildiği ortaya çıkmıştır. Bu çalışma ile önerilen sistemin kalite kontrolörlerin iş yüklerini azaltmaya teşvik ettiği ve geliştirilecek uygulamaların yararlı olabileceği görülmektedir (Dong ve diğerleri, 2018).

Yukarıda bahsedilen çalışmalara ek olarak, tahribatsız muayeneden bağımsız olarak, uydu görüntülerinin sınıflandırılması, boyutlandırılması için görüntü işleme tekniklerinin uygulandığı çalışmalar da bulunmaktadır (Anders, 2003; Soliman, 2012; Zheng, 2013). Tüm bu çalışmalar göstermektedir ki görüntü işleme yöntemleri farklı sektörlerdeki sorunların çözümünde kullanılabilmektedir.

Bu çalışma ile ultrasonik görüntülerde kullanılabilecek görüntü işleme teknikleri ele alınmış ve bu görüntüler değerlendirilmiştir. Tez çalışması iki ana disiplinin ortak kesişimi ile ortaya çıkmıştır. Bunlar; tahribatsız muayene ve görüntü işleme teknikleridir. Tezin ikinci bölümü tahribatsız muayenenin önemi ve muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik muayenenin havacılık sektöründeki çalışmalarına değinilmiştir ve tez çalışması için ultrasonik muayenede kullanılan test ekipmanlarının tanıtımı ve test metotları aktarılmıştır. Tez

alışmasının üçüncü bölümünde ise görüntü işleme tekniklerinden bahsedilirken dördüncü bölümde materyal ve yöntemlere değinilmiştir. Bu alışmada Jupyter Notebook uygulaması üzerinde Python yazılım geliştirme diliyle geliştirilen uygulama ve bu uygulamanın fiber kompozit parçalarının ultrasonik test görüntülerinin görüntü işleme yöntemleri kullanılarak yorumlanması ve değeriendirilmesi, bunun sonucunda ortaya çıkan sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.





2. TAHRİBATSIZ MUAYENE

“Tahribatsız muayene, bir malzeme ya da sistemin bütünlüğüne zarar vermeden malzemenin kullanılabilirliğini etkileyen herhangi bir süreksizliğin olup olmadığını tespit etmek ya da diğer malzeme özelliklerini değerlendirmek için inceleme yapan tüm test yöntemlerini kapsamaktadır” (Korkmaz, 2010). Bir başka deyişle, tahribatsız muayene, üretim hatası veya yorulma nedeniyle oluşabilecek malzeme hatalarının tespiti için kullanılır. Bu yöntem sadece malzemeleri reddetmek ve hataları bulmak için değil; aynı zamanda sözde iyi, kaliteli malzemenin standartlara uyarak üretildiğinin de bir güvencesidir.

Havacılıkta kullanılan malzemelerin de belirli bir standarda uygun olarak üretildiğinin belgelenmesi gerekmektedir. Bu belgelendirme aşamasında tahribatsız muayene yöntemlerine başvurulmaktadır. “Bu muayenenin geçerliliği ise daha önceden yapılmış olan tahribatlı muayenelerin sonuçlarına dayanmaktadır” (Demir, 2019) .

Malzemeler üretimleri esnasında çeşitli problemler nedeni ile istemeyen kusurlara sahip olabilir. Bunlar malzeme çalışırken problemlere neden olur. İki çeşit kusur vardır. Hatalar ve süreksizlikler. Hata; bir parçanın normal fiziki yapısı ya da konfigürasyonunda meydana gelen kesikliklerdir. Kusur, çalışma şartlarında parçanın performansını etkilemiyorsa "kabul edilebilir" olarak değerlendiriliyorsa buna süreksizlik denir. Süreksizlikler üretim sırasında veya kullanım esnasında oluşabilir” (Korkmaz, 2010).

Malzeme ya da sistemlerde oluşabilecek süreksizliklerin konumlarının, tiplerinin ve boyutlarının belirlenmesi için farklı tahribatsız muayene yöntemleri kullanılmaktadır. Havacılıkta kullanılan fiber kompozit parçaların tahribatsız muayenesinde aşağıdaki yöntemler uygulanabilir.

- Görsel kontrol yöntemi
- Radyografik muayene yöntemi
- Girdap akımları ile muayene yöntemi
- Ultrasonik muayene yöntemi

2.1. Görsel kontrol yöntemi

Görsel Muayene, imalat işletmelerinde ürün kalite ve standartlara uygunluğun belirlenmesinde eğitim almış kişiler tarafından uygulanmaktadır. Tahribatsız Muayene kontrol elemanının becerileri onun veri derleme ve bu verilerin beyinde bilgiye dönüştürülmesine dayanır. İnsanın bilgi işleme sisteminin sınırları olduğundan dolayı, araştırmalar daha hızlı, güvenilir ve düşük maliyetli olan otomasyona dayalı sistemler ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi için devam etmektedir. Diğer taraftan, Görsel Muayene, günümüzde en güvenilir yöntemlerden biri olarak uygulanmaya devam etmektedir. Tahribatsız Muayene kontrol elemanlarının eğitimleri teorik ve pratik olarak verilmektedir ve bu alandaki bilgileri zaman içerisinde gelişmektedir. Çoğu zaman yazılı hale getirilemeyen bu bilgi ve beceriler, diğer kontrol elemanları ile paylaşılamayabilir. Fakat yeni çözümlerin ya da destekleyici teknolojilerin geliştirilebilmesi için zaman içerisinde kazanılan bu bilgiler çok değerlidir (Ege ve Ulutaş, 2022).

Bir başka deyişle görsel kontrol, muayene yapılacak olan parçanın yüzeysel hatalarının tespitinde ve sınıflandırılmasında kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Havacılıkta kullanılan parçalarda yüzeysel çizikler, tasarım dışı hatalar ile oluşan delikler ve ezilmeler hava araçlarının güvenliğini tehdit eder. Bu sebeple görsel kontrol yöntemi ile parçaları inceleyen kalite kontrolörün parçanın tasarım ve üretim yöntemi hakkında yeterli bilgiye ve tecrübeye sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple kalite kontrolörlerin ISO 9712 standardına göre en az seviye 1 belgesinin bulunması gerekmektedir (ISO:9712, 2012). Görsel kontrol yöntemi, diğer tahribatsız muayene yöntemlerinin ön koşulu halindedir. Böylelikle tahribatsız muayene edilecek tüm parçalar öncelikle görsel kontrol istasyonlarında muayenesi yapılır, ardından ilgili tahribatsız muayene istasyonuna iletilir. Görsel kontrol istasyonunda tespit edilen hatalar, hatanın kategorisine göre ya tamiri gerçekleştirilir ya da parçanın kullanım dışı olması kararı alınır.

2.2. Radyografik muayene

“Endüstriyel radyografi, iyonlaştırıcı radyasyonların nüfuz etme özelliğinden yararlanarak, malzemelerin görüntülerinin film üzerine aktarılması tekniği olup tahribatsız muayene alanında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir” (Kaba, 2009).

Radyografik muayene, fiber kompozit malzemelerin iç süreksizliklerin boyutsal ve doğrusal tespitinde iyi sonuç vermesine rağmen radyasyon tehlikesi ve iç süreksizliklerin derinlik, bir başka deyişle konum bilgisini verememesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca test ekipmanlarının kurulumunun zorluğu ve diğer muayene yöntemlerine göre nispeten pahalı bir yöntem olduğu gerekçesiyle kullanım alanı sınırlıdır.

Radyografik muayene görüntülerinin değerlendirilmesi için kalite kontrolörlerin standartlara göre belirlenmiş radyografik muayene eğitimini almış olması ve eğitim sonrası yapılan yazılı ve uygulamalı sınavı başarılı şekilde tamamlaması gerekmektedir. Kalite kontrolörlerin radyografik muayene görüntülerini inceleyip sonuçlandırabilmesi için ISO:9712 (2012) standardına göre en az seviye 2 belgesinin bulunması gerekmektedir (ISO:9712, 2012).

Radyografik muayenede test kayıtları bilgisayarlı ortamlarda saklandığından dolayı kalıcıdır. Havacılıkta bu kayıtların proje isterlerine bağlı olmakla birlikte genelde en az 5 yıl saklanması talep edilir.

2.3. Girdap akımları ile muayene

“Girdap akımları yüzey ve yüzeye yakın süreksizliklerin belirlenmesi için uygun bir yöntem olup, elektrik iletkenliğine sahip bütün metal alaşımlarına uygulanabilir. Ancak ferromagnetik olmayan malzemelerde daha etkindir” (Oflaz ve Karadeniz, 2006).

Girdap akımları yöntemi, iletkenlik ölçümü ve kaplama kalınlığı ölçümü ile yüzey veya yüzey altı kusurlarının tespiti için kullanılır. Yöntem, bir ürünün malzeme iletkenliğine, geçirgenliğine ve boyutlarına duyarlıdır. Girdap akımları, alternatif bir manyetik alana maruz kalan elektriksel olarak iletken herhangi bir malzemede üretilebilir. Malzemedeki herhangi bir değişiklik, bobin tarafından empedanstaki bir değişiklik olarak algılanır.

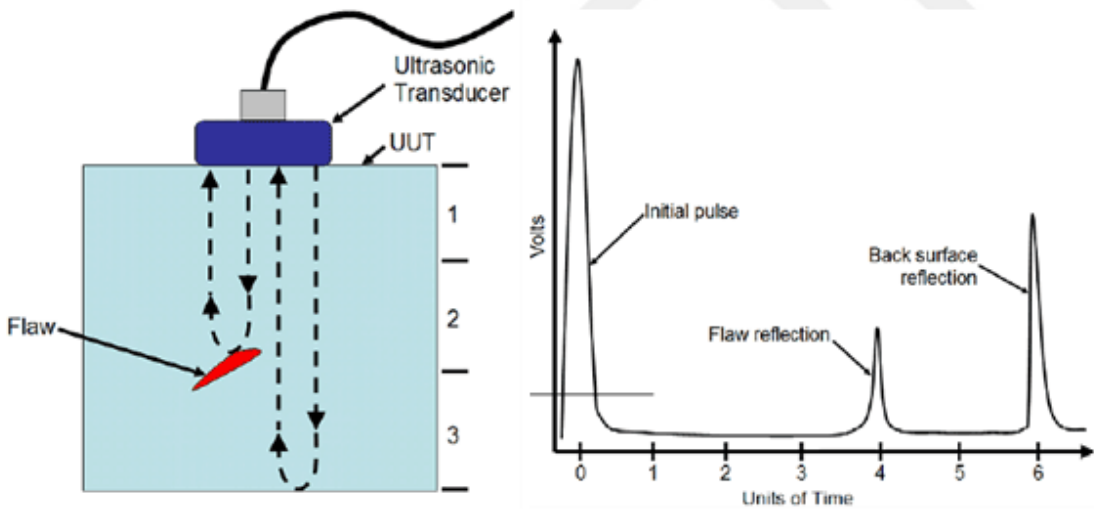
Girdap akımları yöntemi elektrik iletkenliğine bağlı malzemeler üzerinde uygulandığından dolayı havacılıkta kullanılan fiber takviyeli kompozit malzemelerde pek kullanılamaz.

2.4. Ultrasonik muayene yöntemi

Malzemedeki süreksizlikleri tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik muayene yöntemi, muayene probu tarafından üretilen 0,1-20 MHz aralığında yüksek

frekanstaki ses üstü dalgalarının, test malzemesi içinde yayılarak bir hataya çarptıktan sonra tekrar proba yansiyarak prob tarafından algılanması prensibine dayanır. Bu dalgalar prob tarafından algılandıktan sonra piezoelektrik prensibi ile elektrik akımına dönüştür ve katod ışınları tüpü ekranında, malzemenin içini gösteren ekolar şeklinde görülür. Katod ışınları tüpü ekranında gözlenen bu ekoların genlikleri ve konumları hatanın yeri, şekli ve boyutları hakkında bize bilgi verir (Gül, 2019).

Şekil 2.1'in sol bölümünde bulunan görselde mavi ile işaretlenen alan malzemeyi temsil etmektedir (Anshul, 2022). Kırmızı olan bölge parça içerisinde bulunan süreksizliktir. Parçanın üzerindeki probdan ultrasonik ses dalgaları 3 numaralı seviyeye kadar ilerlemekte, ardından malzemenin arka duvarına çarparak tekrar proba dönmektedir. Ultrasonik sesin aldığı bu yolun ikiye bölünmüş hali parçanın kalınlığını vermektedir. Eğer parça içerisinde bir süreksizlik varsa, ultrasonik ses arka duvardan dönmek yerine, süreksizliğe çarpıp geri dönecektir. Böylece muayene yapan kalite kontrolör parça içerisinde süreksizlik olduğunu tespit edebilmektedir.



Şekil 2.1. Ultrasonik muayene çalışma prensibi (Anshul, 2022)

Ultrasonik Test (UT) değerlendirme sistemini bir verici ve alıcı devresi, dönüştürücü aracı ve görüntüleme cihazlarından oluşur. Sinyal tarafından taşınan bilgilere dayanarak, süreksizlik konumu, kusur boyutu, yönü ve diğer özellikleri elde edilebilir (Lu, 2010).

Ultrasonik testin avantajları, tarama hızı ve kusur tespit kabiliyetini içerir. Anında test sonuçlarına ulaşılabilir. Taşınabilir cihazlar sayesinde yöntemin sahada uygulanması

kolaydır. Dezavantajları arasında kurulum zorluğu, bir parçayı doğru bir şekilde taramak için gerekli beceri ve doğru testi sağlamak için test numunesine ihtiyaç vardır. Bu tür testler, aynı parça tasarımının tekrar tekrar test edilmesi gereken bir montaj hattında kullanım için idealdir. Ultrasonik muayenenin genellikle farklı uygulamalarda kullanılan iki yaklaşımı vardır; darbe yankı (pulse echo) ve iletim yaklaşımları yolu (through transmission). Bu yaklaşımların her ikisi de bir malzemedeki dahili kusurları tespit etmek için 1-50 MHz düzeyinde yüksek frekanslı ses dalgalarını kullanır (Garney, 2006).

Pulse echo ultrasonik yöntemi, homojen malzemelerdeki kusurları kolayca bulabilir. Bu yöntemde operatör, dalganın geçiş süresi ve süreksizlikler üzerindeki zayıflama ve dalga saçılımından kaynaklanan enerji kaybıyla ilgilenir. Homojen veya heterojen bir materyaldeki tutarsızlığı tespit etmeye yardımcı olur (Warnemuende, 2006). Through transmission ultrasonik yöntem ise, geleneksel ultrasonik yöntemlerden farklıdır. Bu yöntemde, dönüştürücü ve alıcı parçanın yüzeyinden sabit bir mesafede tutulur. Geleneksel bir dönüştürücünün ve alıcı karmaşık parça yüzeylerinde taramaya izin vermez. Bu yöntemde alıcı ve verici belirli bir açı ve mesafe ile tarama yaptığı için diğer yöntemlere göre daha doğru sonuçları vermektedir.

Ultrasonik muayene, muayene edilmek istenilen malzemeye yüksek frekanslı ses dalgalarının iletim durumlarına göre süreksizliklerin belirlenmesine olanak sağlayan tahribatsız bir muayene türüdür. Ultrasonik muayene, muayene edilen malzemeye nüfus eden ve malzemedeki sesin algılanıp analiz edildiği bir süreçtir. İnsan işitme aralığı yaklaşık 20 Hz ile 20 kHz olup ultrasonik muayenede insan işitme aralığının çok üzerinde olan 0,5 ile 25 MHz arasındaki frekanslar kullanılır. Ultrasonik muayenenin temeli ultrasonik dalgalara ve fiziğe dayanmaktadır. Ultrasonik dalgalar, içinde hareket ettikleri ortamın parçacıklarının mekanik titreşimleridir. Ultrasonik dalgalar yapısal hasara karşı oldukça hassastır, her yöne hızla yayılır ve malzemelere kolaylıkla nüfuz ederler (Hong,2014). Dalgalar, belirli bir genlik, frekans ve hıza sahip sinüzoidal bir dalga denklemi ile temsil edilir.

Genlik, ortamın parçacıklarının ortalama konumlarından yer değiştirmesidir. Frekans, saniyedeki döngü sayısıdır ve bir döngünün uzunluğuna dalga boyu denir. Frekans, dalga boyu ve hız arasındaki ilişki $v = \lambda f$ ile verilir. Bu eşitlikte hız (v), frekans (f) ve dalga boyu (λ) olan bir dalga ile ters orantılı hızdır. Bir ortamda bir dalga yayıldığında, faz ve genlik

malzeme özelliklerine bağlı olarak değişir. Her malzeme için uygun ölçümleme ile dalga hızları hesaplanır.

Ultrasonik testlerde kullanılan ultrasonik dalgaların üretimi kolaydır ve tespiti enerji kaybının hesaplanması temeline dayanır. Ultrasonik dalgalar katılarda, sıvılarda ve gazlarda yayılabilir. Fakat enine yayılan dalgalar sadece katılarda iletilebilir. Bunun nedeni, sıvı ve gaz ortamlarda moleküller veya atomlar arasındaki mesafe katı ortama göre çok daha fazladır. Bu da ortalama serbest yolun büyük olmasına sebep olur. Moleküller ve atomlar arasındaki çekim, birinin diğerini kendi hareketinin bir kısmından daha fazla hareket ettirmesine izin vermek için yeterli değildir ve bu nedenle, dalgalar hızla zayıflar. Ultrasonik dalga sıvı ve gazda hızla kaybolur. Bu kayıp, mesafe arttıkça daha da artacaktır. Karbon fiber kompozit malzemelerde ultrasonik dalgaların yayılma yönü ile parçada bulunan ply'ların yönü dik bir açı yapacak şekilde karşılaşır. Böylelikle parça içerisine nüfus eden ultrasonik dalga ply'lar arası yolculuk eder ve parçanın arka duvarından çıkarak tüm katmanlarda enerji kaybına uğrar. Bu enerji kaybı, parça içerisindeki süreksizliğin hesaplanmasında kullanılır (Krautkrämer ve Krautkrämer, 2013).

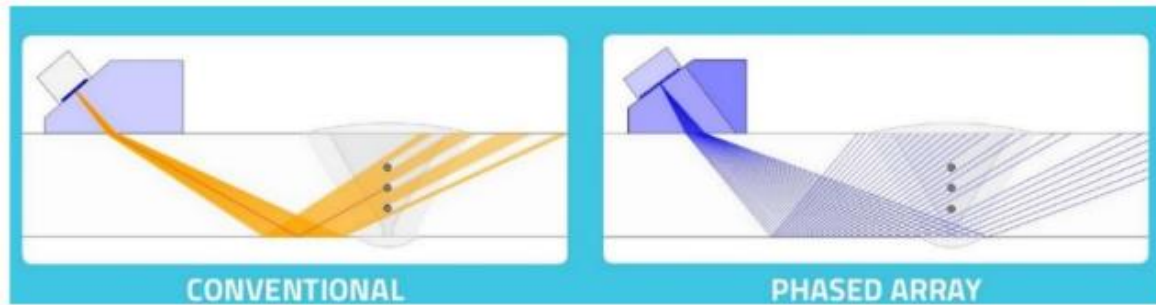
Ultrasonik muayene için kullanılan ultrasonik dönüştürücüler genellikle iki tiptedir. İlki, tek bir prob üzerinden yüksek frekanslı ses dalgalarını üretir ve aynı prob gönderdiği ses dalgalarını toplarlar. Bu pulse echo metodu olarak adlandırılır. İkincisi ise, iki prob ile bu durumu ele alabilir. Elemanlardan biri ultrasonik dalgaları iletmek ve diğer eleman ise ultrasonik dalgaları yakalamak için tasarlanmıştır. Bu ise through transmission metodu olarak adlandırılır.

Yukarda bahsedilen yöntem, gelenekseldir ve tek bir prob ile çalışır. Fazlı dizili problemler ise, tipik olarak, her biri ayrı olarak darbelenebilen 16 ila 256 kadar küçük tekli elemana sahip bir dönüştürücü düzeneğinden oluşur. Fazlı dizili problemler;

- Bir şerit (doğrusal dizi)
- 2D matris
- Bir halka (halka dizilimi)
- Dairesel bir matris (dairesele dizi)
- Karmaşık düzen

sıralamasıyla düzenlenebilir (Poguet ve diğerleri, 2002).

Geleneksel dönüştürücüler ve faz dizili problar iki yol ile malzeme üzerinde test gerçekleştirebilir. İlki, test edilecek malzemeye doğrudan temaslı kullanımıdır. Bu yöntemde problemlardan ultrasonik dalganın ileteceği alana bir ara parça ile birlikte açılı demeti oluşturulur. Açılı demeti malzemeye belirli açılarda temas eder. İkinci yol ise, malzemenin ve fazlı dizili radarın birbirine temas edilmeden test edilmesi prensibine dayanır. Bu prensipte malzeme su içerisine daldırılır. Test için kullanılacak olan fazlı dizili prob da su içerisine daldırıldıktan sonra su yolu üzerinden test işlemlerini gerçekleştirir. Kullanılan dönüştürücünün frekansları en yaygın olarak 1 MHz ila 10 MHz aralığında olur. Fazlı dizi sistemi ultrasonik dalgaları gönderdikten sonra geri dönen yansımaları alıp analog olan bilgileri sayısallaştırabilen ve sayısal bilgileri çeşitli standart formatlarda görselleştirebilen karmaşık bir bilgisayar tabanlı sistem içermektedir. İlgili bilgisayar tabanlı sistem analog dijital dönüştürücü aracılığı ile problemlardan gelen bilgiyi işlemektedir (Acuren, 2022).

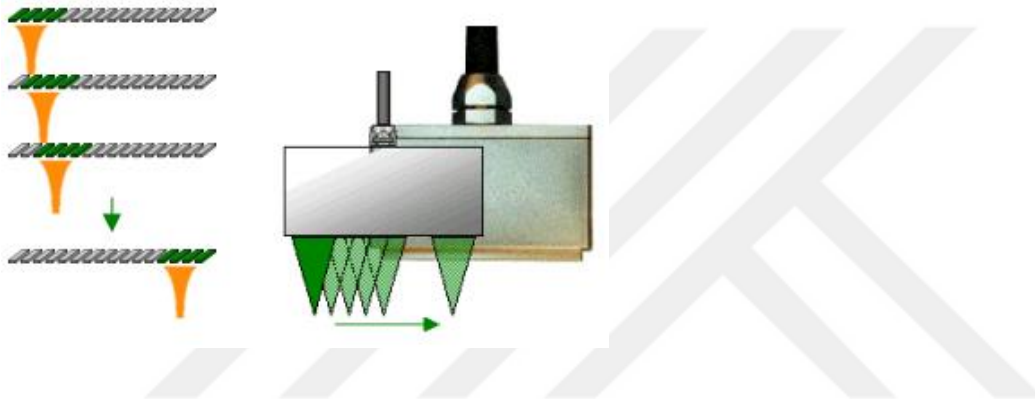


Şekil 2.2. Geleneksel UT ve fazlı dizili UT arasındaki karşılaştırma görüntüsü (Acuren, 2022)

Geleneksel dönüştürücüler tek bir kırılma açısı ile birlikte sabit derinlikteki alanda test yapabilmektedir. Şekil 2.2’de görüleceği gibi, fazlı dizili problar, geleneksel dönüştürücülerden farklı olarak, bir dizi probu farklı bir kırılma açısıyla veya doğrusal yol boyunca test edilmesini sağlayabilir.

Fazlı dizili ultrasonik huzme açılarının şekillendirilmesine ve yönlendirilmesine, daha iyi derinlik odağına ve gelişmiş kapsamaya izin vermektedir. Ayrıca bir dizi prob sabit bir derinliği veya farklı derinliği test edebilir. Fazlı dizili problar ile birlikte esneklik ve yetenek kazanımı sağlanır. Fazlı dizili dönüştürücü içerisinde bulunan problar belirli bir sıklıkla ve sırayla çalıştırılır. Problar genellikle 4 ile 32’lik gruplar halinde çalışması istenir. Bu çalışma

biçimi ışın yayılımını azaltmaya ve ışınların daha efektif bir şekilde odaklanmasına olanak sağlar. Gruplar halinde çalıştırılan problar belirli gecikme süreleri ile tekrar tekrar çalıştırılır. Diğer yandan, ışınlanan sesin geri dönüşünde karşılama cephesi vardır ve belirli sürelerde gönderilen ışınlar dinlenir. Işınlar öncelikle iletim malzemesinde ilerler. Bu malzeme su ve ya jel olabilir. Daha sonra ışınlar malzemenin ön cephesine çarpar, test malzemesi boyunca ilerler, varsa süreksizliklerden geri yansır ya da test malzemesinin arka duvarına kadar ilerler. Yansıma yapacağı alandan sektikten sonra ışınlar fazlı dizili prob üzerine geri döner. Dönen ışının bilgisi dijital dönüştürücü ile çeşitli formatlardan herhangi birinde görüntülenir. Bu tarama saniyenin çok kısa bir bölümünde gerçekleşir (Acuren, 2022).

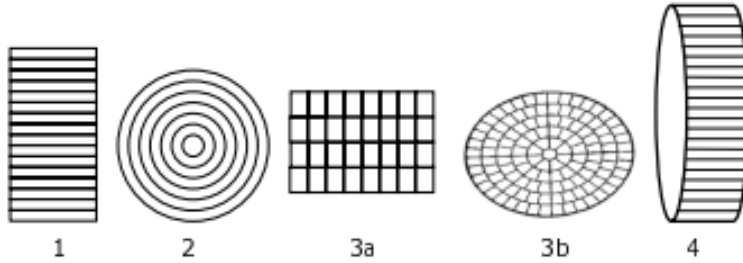


Şekil 2.3. Fazlı dizili probların şematik görünümü (Poguet ve diğerleri, 2002).

Poguet, Marguet, Pichonnet ve Chupin tarafından yayınlanmış makalede paylaşılan fazlı dizili probların şematik görünümü şekil 2.3’de ve farklı fazlı dizili probların örnekleri şekil 2.4’te gösterilmiştir (Poguet ve diğerleri, 2002). Resim 2.1’de ise Lamlara’nın yaptığı çalışmada kullandığı 64 elemanlı bir fazlı dizili prob görülmektedir (Lamlara, 2017).

Figure 4 : Examples of geometries of phased array transducer elements:

1. Linear array
2. Annular array with uniform pitch (non constant surfaces)
3. Matrix arrays (checkerboard and sectored rings)
4. Circular array



Şekil 2.4. Fazlı dizili dönüştürücü elemanlarının geometri örnekleri (Poguet ve diğerleri, 2002)



Resim 2.1. Düşük frekanslı fazlı dizi probu ve prob tutucusu (Lamlara, 2017)

Phased array ile yapılan muayenelerden sonra elde edilen görüntüler belirli formatlarda olmaktadır. Bunlar;

- A-Scan tarama görüntüsü
- B-Scan tarama görüntüsü
- C-Scan tarama görüntüsü
- S-Scan tarama görüntüsü
- Lineer tarama

olarak tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında ele alınan görüntüler C- Scan tarama görüntülerinden oluşmaktadır.

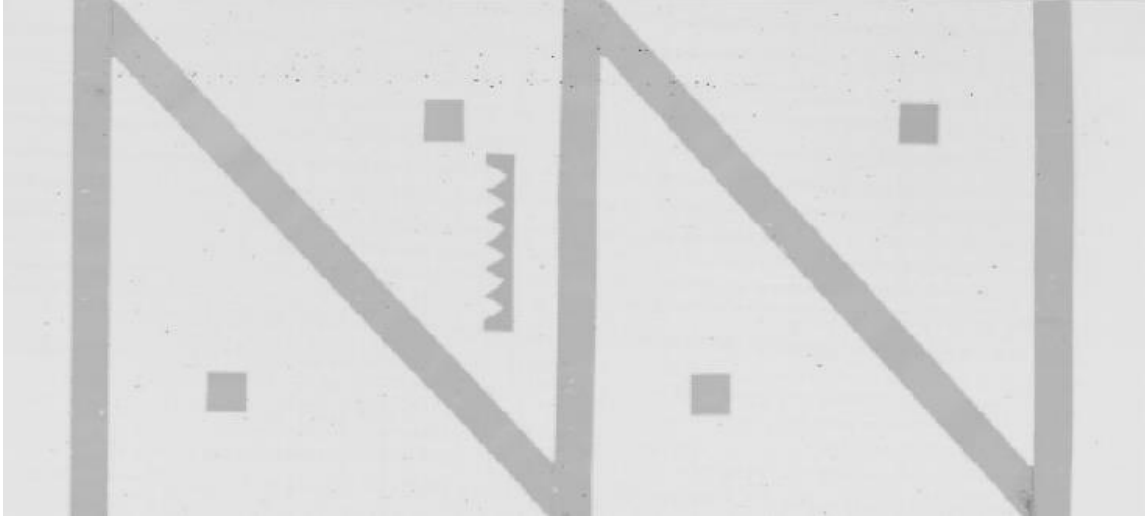
C-Scan tarama görüntüsü, ultrasonik muayene yapılan muayene parçasının tarandığı alana göre iki boyutlu şekilde düzlemsel görünümü olarak görüntülenme yöntemi ile elde edilir. Şekil 2.5'te bir test parçasının C-Scan tarama görüntüsü gösterilmiştir. Bu görselde bulunan renklerin tonları, test parçasının konumuyla eşlenen her bir nokta için (genellikle 2x2 mm'lik alan) sinyal genliğini veya derinliğini temsil etmektedir. Düz parçalar için X-Y konumunda tarama yapılır ve elde edilen görüntü de bu düzlem ile aynı perspektife aittir. Silindirik parçalar için ise eksenel ve açısal konumlar izlenilir. Bu tarama yönüne göre düzlemsel, iki boyutlu bir görüntü oluşturulur. Fazlı dizi sisteminden bir C-scan taraması yukardaki konuda bahsedilen geleneksel pulse echo problemleri ile elde edilen görüntülere çok benzemektedir.

Şekil 2.5'te, sıfır derece kama ile 5 MHz, 128 elemanlı lineer dizi probu kullanan bir karbon fiber kompozit parçanın C-Scan tarama görüntüsü bulunmaktadır. Görüntüyü oluşturan en küçük birim olan index değeri 2 mm x 2mm olarak belirlenmiştir. Görüntüdeki renkler belirli bir eşik değerine göre otomatik olarak belirlenir. Yuvarlak ile belirtilmiş alanlar parça içerisine elle bırakılmış olan ve süreksizliği belirtmeye yarayan bantlardır. Bu bantlar farklı plylar içerisine bırakıldığı için hataların konumları farklı derinliktedir. Bu derinlik farkına bağlı olarak ultrasonik dalganın kaybı ve geri dönüş zamanı da farklı olmaktadır. Bu farklılık parçanın arka duvarından dönen sinyal ile farklı zamanda gelen sinyali belirttiği için süreksizlikler hızlı bir şekilde tespit edilebilir halde olmaktadır.



Şekil 2.5. Örnek C-Scan tarama görüntüsü (Renkli)

Şekil 2.6'da ise bir ölçümleme test plakasının siyah beyaz C-Scan tarama görüntüsü bulunmaktadır. İlgili görüntü siyah beyaz arasında bulunan 0-255 aralığında resmedilir. Burada siyah renk 255, beyaz renk ise 0 ile resmedilmiştir. Plaka, ultrasonik test yapıldıktan sonra elde edilen görüntüde farklı renk kodlarına ait bölgelere sahiptir. Bu bölgelerin konumlandırılması ve boyutlandırılması kalite kontrolör tarafından yapılmaktadır.



Şekil 2.6. Örnek C-Scan tarama görüntüsü (Siyah - beyaz)

Görüntünün çözünürlüğü ne kadar küçük alana etki ederse o kadar detaylı görüntüye sahip olabiliriz. Yukarıdaki örneklerde 2 mm x 2 mm lik bir alan ele alınmaktadır. Çözünürlüğün artması probun tarama yaptığı alanla doğru orantılı artıp, azalmaktadır.

Bütün bunlara ek olarak, X-Y düzleminde 10 cm x 10 cm'lik bir boyuta sahip olan bir parçanın fazlı dizi problemleri ile taranması genellikle birkaç saniye içinde yapılabilirken, geleneksel tarama yöntemleri ile bu işlem birkaç dakika sürebilir.

Havacılık ve uzay sektöründe üretilen karbon fiber kompozit parçalarının muayene yöntemi olarak ultrasonik muayene kullanılmasına karar verildiğinde, bu malzemelerin sertifikasyonunu yapacak olan firma ile ürünü teslim alacak olan müşteri, ultrasonik muayene yönteminin standartlarını belirlemesi gerekmektedir. Ürünlerin teslimleri öncesi bakılması gereken birkaç önemli husus bulunmaktadır. Bu hususlar, sahada çalışan personellerin eğitimi ile niteliklilik uygulamaları, sonuçların güvenilirliği ile tekrarlanabilirliği ve onaylanmış prosedürlerin uygun şekilde uygulanması ile kabul standartlarıdır.

Havacılık ve uzay sektöründeki firmaların birincil muayene yöntemi olarak ultrasonik muayeneyi kullanmak istediği durumlarda, bu testler, müşterinin belirlediği standartlara ya da ISO gibi standartlara bağlı olarak, kalite kontrol sisteminin yeterliliğini doğrulamak için başlangıçta ve periyodik olarak ölçümleme testleriyle desteklenmesi ve tamamlanması gerekmektedir.

2.5. Tahribatsız Muayene Personeli ve Sertifikasyon Süreci

Tahribatsız muayene personeli seviyeleri; seviye 1, seviye 2 ve seviye 3 olmak üzere 3 gruba ayrılır.

Seviye 1 personeller, tüm tahribatsız muayene sertifika seviyeleri arasında en az sorumluluğa sahip personellerdir. Yine de seviye 1 personel olabilmek için belirlenmiş standartlarda gerekli eğitim ve iş deneyimi saatlerini tamamlamış olmaları gerekmektedir. Seviye 1 personel, yukarda bahsedilen tahribatsız muayene süreçlerinden en az birinde belirlenmiş yöntem ve standartlara uyarak, seviye 2 ve seviye 3 personelin gözetiminde muayene yapabilir, muayene sonuçlarını sınıflandırır ve sonuçlarını raporlar. Tüm bu süreçte rağmen seviye 1 personel kullanılacak muayene metodu ve tekniğinin seçiminden, sonuçların değerlendirilmesinden sorumlu değildir (Gür, 2013). 2019 PQNDT anketinin katılımcılarına göre, seviye 1 personellerin yaklaşık %33ü havacılık endüstrisinde istihdam edilmektedir (Serabian, 2019).

Seviye 2 personel olabilmek için istenilen gereksinimlerin çoğu, Seviye 1 gereksinimlerine benzer. Bununla birlikte, Seviye 2 personellerinin genellikle daha fazla eğitim saatini tamamlamaları gerekir ve işte daha fazla sorumluluk alırlar. Seviye 2 ve alt seviye personelin yaptığı işleri kontrol edebilir ve yönlendirebilir. Seviye 1 personel gibi, muayene ekipmanını hazırlayabilir, ekipmanların kalibrasyonunu yapabilir, muayene sonuçlarını analiz eder ve raporlayabilir. Ayrıca, herhangi bir gözetim olmaksızın aldığı sertifikalar sayesinde muayene sonuçlarını onaylayabilir. Buna rağmen bu süreçte seviye 2 personelin aldığı kararların denetimsiz olduğu anlamına gelmemektedir. Düzenli olarak gerçekleştirilen denetimler muayene süreçleri, personel eğitimleri ve sertifikasyon durumları kontrol edilmektedir. 2019 PQNDT anketinin katılımcılarına göre, seviye 2 personellerin yaklaşık %37si havacılık endüstrisinde istihdam edilmektedir (Serabian, 2019). Diğer endüstrilere göre en fazla havacılık alanında çalışma yapıldığı anlaşılmaktadır.

Seviye 3 personel, “muayene tesisinin veya sınav merkezinin ve personelinin sorumluluğunu taşır; muayene talimatlarını/prosedürlerini hazırlar ve onaylar; standart, şartname ve kodları yorumlar; özel muayene metodu, prosedürü ve muayene talimatlarını belirler; seviye 1-2 için belirlenen işleri yönetir” (Gür, 2013). Seviye 3 personellerin sorumluluğu diğer seviyedeki personellere göre çok daha fazladır. Çoklu denetim yöntemleri de dahil olmak üzere tahribatsız muayenenin tüm branşları hakkında geniş bir bilgiye sahip olmaları beklenir.

Hem seviye 1 hem de seviye 2 personelleri eğitebilir, denetleyebilirler ve tahribatsız muayene sertifika sınavları yapabilirler. Seviye 3 personelleri, tahribatsız muayene alanında çok çeşitli endüstrilerde çalışır. 2019 PQNDT anketinin katılımcılarına göre, ankete katılan sertifikalı Seviye 3 personellerin yaklaşık yarısı (%49) havacılık endüstrisinde, %18'si petrokimyada çalışıyor. Diğer popüler endüstriler arasında kamu hizmetleri ve güç ve çelik ve dökümhane bulunur. Aynı anket sonuçlarına göre, seviye 2 personeller, diğer seviye personellere göre haftalık daha fazla çalışma saatine sahipler (Serabian, 2019). Bir diğer değişle, sahada seviye 1 personellerin gözetiminden ve seviye 1 personellerin yaptığı işleri onaylamalarının dışında bir de seviye 2 olarak atanmış işleri yürütmektedirler. Bu fazla çalışma temposu ve sorumluluk fazlalığı bazı şartlar altında seviye 2 personellerin hatalı kararlar almasına sebebiyet vermektedir. Bu süreçte seviye 3 personel sürekli denetim yapamayacağı ve alınan her kararı kontrol edemeyeceği için seviye 2 personelin aldığı kararları destekleyecek yan unsurlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Buna ilave olarak bazı zorlu koşullarda tahribatsız muayene yapan personelin güvenliği ve ekipmanın zarar görmesi açısından içerdiği risk nedeniyle, tahribatsız muayene ölçümlerini klasik yöntemlerle yapmak yerine personeli destekleyici uygulamalara ve otomasyonlara ihtiyaç vardır.

Bu tez çalışmasında, havacılık sektöründe oldukça sık kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik muayene yöntemi ele alınmıştır ve seviye 1, 2 ve 3 personellerin aldığı kararları destekleyecek bir uygulama üzerinde çalışılmıştır.

2.6. ISO 9712 Standardına Göre Tahribatsız Muayene Personellerinin Eğitim Süreleri

Tahribatsız muayene personelleri, her bir tahribatsız muayene yöntemi için belirli bir tecrübeye, eğitime ve sertifikasyona sahip olmalıdır. Bu hususta ISO 9717 bir sistem çerçevesinde eğitilip belgelendirilmelidir.

Aşağıdakiler dahil olmak üzere standart prosedürlerin mevcudiyetinden çeşitli faydalar beklenebilir:

- Geliştirilmiş güvenlik ve kalite güvencesi
- Azaltılmış üretim ve bakım maliyetleri

- Azaltılmış insan hatası riski
- Üretim ve işleme yöntemlerinin optimizasyonu
- Uzun vadeli performansta artırılmış güven

ISO 9712, tahribatsız muayene personelinin çeşitli sektörlerde ve yöntemlerde eğitim, vasıflandırma ve belgelendirme esaslarını belirler. Merkezi sistem ile belgelendirme yapılan bu sistemde belgelendirme işini yapan kuruluşlar, eğitim ile vasıflandırma/belgelendirme faaliyetini ayırmalıdır (Gür, 2013).

ISO 9712'ye göre personellerin seviyelerinin belgelendirme öncesi kazanması gereken en az tecrübe süreleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 ISO 9712 (2012)'ye göre tahribatsız muayene yöntemlerinde eğitim süreleri (ISO 9712:2012, (2012))

Tahribatsız muayene metodu	Seviye 1 (saat)	Seviye 2 (saat)	Seviye 3 (saat)
AT	40	64	48
ET	40	48	48
LT – B – Pressure method	24	32	32
LT – C – Tracer gas method	24	40	40
MT	16	24	32
PT	16	24	24
ST	16	24	20
TT	40	80	40
RT	40	80	40
UT	40	80	40
VT	16	24	24
Radyografik Muayene için belirlenen saatlere radyasyondan korunma eğitim saatleri dahil değildir.			

Personeller, ilgili eğitim sürelerini tamamladıktan sonra standartça belirlenmiş olan sınava girmeli ve sınavdan geçer not almalıdır. Personelin alacağı sertifikasyon, yine standarda göre belirlenmiş süreler boyu geçerli olup, süre bitiminde sertifikasyonun yenilenmesi için personelin tekrar sınava girmesi gerekmektedir.

2.7. Eğitimin Ana Hatları

Tüm eğitim, Sorumlu Seviye 3 tarafından onaylanan ayrıntılı bir kurs planına göre yürütülür. Ana hat, eğitim materyalinin türetildiği bir referans listesini içermektedir. Eğitim asgari olarak aşağıdaki bilgileri içermelidir:

- Temel teori
- NDT yöntemlerinin seçimi, farklı malzemeler ve parça ve test değişkenleriyle alaka düzeyi dahil test ilkeleri.
- Ürün formları ve malzemeleri; kusur oluşumu ve karakterizasyonu
- Ekipman işletimi ve standardizasyon
- Proses kontrollerinin önemi
- Uygun işlem adımlarının ve parametrelerinin önemi
- Emniyet
- Uygulanabilir teknikler ve her birinin avantajları ve dezavantajları
- Her yöntem ve tekniğin sınırlamaları ve yetenekleri
- Uygulanabilir özellikler, kodlar, çalıştırma prosedürleri ve çalışma talimatları
- Varsa, Denetim sonuçlarının değerlendirilmesi, yorumlanması ve belgelenmesi.

İlgili eğitimlerin tamamlanması ve sınavlarının başarı ile tamamlanması zorlayıcı olabilmektedir. Bu sebeple piyasada bu eğitimleri alan ve sertifikasyona sahip olan kişileri bulmak zordur. Bu sebeple bu kişilerin çalışma sürelerinde yapılabilecek her türlü iyileştirme havacılık gibi zamanın çok değerli olduğu kritik sektörlerde büyük önem arz etmektedir.

2.8. Ultrasonik Muayene İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Ultrasonik muayene, kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanılan tahribatsız bir test yöntemidir. Ultrasonik test, test yapılan malzemenin iç hasarın geometrisinin, yüzey alanının ve derinlik konumunun belirlenmesinde kullanılır. Ancak, test edilen malzemenin parametreleri, testin yapılacağı tezgahın kalibrasyonu ve sonuçları, malzemeyi tarama yöntemi gibi muayene parametrelerinin seçimi dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenebilen sonuçları yorumlanırken kalite kontrolörün ölçüm belirsizliğini dikkate alması gerekmektedir. Ayrıca, malzemedeki süreksizliğin boyutunun belirlenmesindeki en önemli etkenler, ultrasonik taramalarda uygulanan sinyallere ve görüntü işleme yöntemlerine

dayanır. Bu parametrelere bir de kullanıcı hatası eklendiği zaman elde edilen veriler hatalı olabilir. Bu başlıkta, ultrasonik muayene yöntemleri kullanılarak yapılan testlerde kullanılan görüntü işleme tekniklerine atıfta bulunarak, literatürde bulunan çalışmalar ele alınacaktır.

Malzemelerde çatlak tespiti için kullanılan görüntü işleme teknikleri hakkında birçok çalışma bulunmaktadır.

Muayene sonuçlarının incelenmesinde kullanılan yöntemlerden birisi otsu eşikleme yöntemidir. Talab, Huang, Xi ve HaiMing 2016 yılında yaptığı çalışmada görüntüdeki çatlakları tespit etmek için görüntü işleme yönteminde yeni bir yaklaşım önermektedir. Bu yöntemde Sobel ve Alan filtresi gibi birden fazla filtre kullanarak küçük alanı arka plana çevirmekte ve Otsu yöntemi ile büyük çatlakları tespit etmektedir. Fakat görüntü işleme tekniği ile filtrelenen çatlak görüntüsü istenilen sonucu veremediği için çözüm olarak bir uygulama geliştirilmiş ve bu uygulama sonuçları ile Otsu yöntemi ile elde edilen görüntü karşılaştırılmıştır. Bu yöntemin deneysel sonuçları, arka plan ve ön plan görüntüsünü başarılı bir şekilde çıkartmaktadır. Bu yöntemin avantajı, görüntülerdeki çatlakların net ve doğru bir şekilde tespitidir (Talab ve diğerleri, 2016).

Fujita ve Hamamoto gürültülü beton yüzey görüntülerinden otomatik çatlak algılama yöntemini geliştirdikleri uygulamada gri tonlamalı histogramın entegrasyonuna dayalı bir eşik belirlemek için geliştirdikleri yöntemi Otsu yöntemi ile karşılaştırmaktadırlar. Otsu yönteminin uygulanması, tespit edilen çatlakların bağlantısının kaybolmasına ve gürültü oluşumuna neden olmaktadır ve bu sebeple geliştirilen uygulamada Otsu yönteminin dezavantajlarının giderilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Geliştirilen yöntemin Otsu yönteminden daha yüksek doğrulukla çatlakları tespit edebildiği gösterilmiştir (Fujita ve Hamamoto, 2011).

Bu çalışmalara ilave olarak, Shan, Zheng ve Ou, bu çalışma kapsamında incelenen diğer tekniklerden farklı olarak iki kamera kullanarak çatlak analizi yapmaktadırlar. İkili kamera kullanarak elde edilen görüntülerde bulunan çatlakların kenarlarını Canny-Zernike algoritmasını kullanarak görselleştirmiş ve konumlarını belirlemiştir. Önerilen deneysel sonuçlarına göre sürmeli kumpastan alınan ölçüm ile geliştirilen uygulamanın verdiği sonuçların 0.02 subpixel koordinat doğruluğuna sahip olduğu belirlenmiştir (Shan ve diğerleri, 2016).

Bunlara ek olarak, Yang, Yang ve Huang, beton yapılarıdaki küçük çatlakların tespiti için bir görüntü işleme algoritması önerisinde bulunmaktadır. Bu çalışmaya göre görüntüyü elde etmek için 2 adet fotoğraf makinası kullanılmış ve ardından bu fotoğraflara görüntü işleme işlemleri uygulanmıştır. Geliştirdikleri algoritma 6 adımda sonuçları sunmaktadır. Bu adımlar stereo kalibrasyonu, kontrol odaklarının konumu, yüzey denkleminin hesaplanması, metrik ayarlama, görüntünün netlik durumunun incelenmesi ve taramayı içermektedir. İlgili yöntem ile beton yapılarda çıplak gözle görülebilen koyu çatlak çizgileri ortaya çıkmadan önce bile yüzey çatlaklarının tespit edilebildiği gösterilmiştir (Yang ve diğerleri, 2015).

Lins ve Givigi, tahribatsız muayene test sürecindeki kalite kontrolörün yapmış olduğu işlemlerin yerine bir sistem tasarlayarak bu işlemleri otomatikleştirmeyi hedeflemiş ve görüntü işleme temelli bir kavram tasarlamışlardır. Yöntemlerinde, görüntülerdeki süreksizliklerin boyutunun tahmini için tek bir kamera kullanmışlardır. Süreksizliklerin tespiti için görüntülerin sayısal dizilerinin süreksizlik tespit algoritmasına tabi tutulduğu çatlak model algoritması kullanılmıştır. Önerdikleri algoritma, öncelikle test edilecek görüntüleri girdi olarak almakta ve görüntü işleme yöntemlerini kullanarak çatlak tespiti yapmaktadır. Algoritma, görüntüleri inceleyerek tespit edilen çatlak boyunca kırmızı alanlar içeren yeni bir görüntü çıktısı vermektedir. Parçacıkların piksel konumları bir vektörde saklanmaktadır ve bu bilgiler süreksizlik ölçüm algoritmasına iletilmektedir. Algoritma, görüntülerde oluşan süreksizliklerin piksel konumları ile ilgili kesitteki piksel sayısını tahmin etmektedir ve çatlak boyutunu vermektedir (Lins ve Givigi, 2016).

Wang ve Huang, görüntü tabanlı tahribatsız muayene tespiti için çatlak tespiti ve etkinliklerine dayalı olarak süreksizlikleri nitelendirmek için bir sistem tasarlamışlardır. Bu çalışmada mevcut görüntü tabanlı çatlak tespiti dört kategoriye ayrılmıştır. Bunlar; bütünlüşmüş bir algoritma, morfolojik yaklaşım, süzme yaklaşımı ve pratik tekniktir. Çalışma kapsamında entegre algoritma kullanılarak görüntülerde gölgeleme filtresi ile düzenleme yapılmaktadır. Belirsiz çatlak tahmini, süzme (perkolasyon) yöntemi kullanılarak tespit edilmektedir. Son aşamada ise çatlak tespiti için yüksek performanslı özellik çıkarımı sağlayan pratik yöntemle mikro çatlak tespiti için morfolojik yaklaşımı kullanmışlardır (Wang ve Huang, 2010).

Bir başka çalışma olan Gunkel, Stepper, Müller ve Müller, tahribatsız muayene testleri ile elde edilen görüntülerin eşik değerini analiz edebilmek adına Otsu yöntemine değinmiştir.

Bu çalışmada görüntü üzerindeki çatlak sayıları ve çatlak uzunluklarının değişkenliği üzerinden doğruluk için bir algılama algoritması geliştirilmiştir. Mikro çatlak, çatlakların deformasyonlarla çevrili olduğu bir durumda en kısa yol algoritması kullanılarak tespit edilmiştir. Araştırmacılar, başlangıçta bir eşik değeri olan çatlak kümelerini tespit ettikten sonra çatlak yollarını belirlemek için Dijkstra algoritması kullanmışlardır. Tasarlanan metot tüm çatlakların yönün analiz etmeye ek olarak çatlakların lineer kısımlarını da analiz edebilir. Burada lineer parçaların bir çatlağın büyümesinin mi yoksa farklı çatlakların birleşmesinin mi sonucu olduğunu kontrol etmek zorlayıcı olmaktadır. Bu sebeple, bir çatlağın zamansal geçmişi incelenerek araştırmak gerekmektedir (Gunkel ve diğerleri, 2012). İki farklı süreksizliğin tespit edilip, tek bir süreksizlik gibi gözükmesini sağlayacak ve buna göre hesaplama yapacak algoritma tasarlanması kalite kontrolörün değerlendirme aşamasını destekleyici olacaktır.

Fujita ve Hamamoto, gürültülü beton yüzey büyülerinde otomatik çatlak tespiti için bir sistem önermişlerdir. Bu sistem, iki ön işleme adımı ve iki algılama adımı içermektedir. Muayene için elde edilmiş görüntüden gölgeleme gibi hafif farklılıkları gidermek adına görüntü işleme tekniklerinden olan medyan filtresi kullanılmıştır. İkinci ön işleme adımında ise Hessian matrisli çok ölçekli bir çizgi filtresi ile görüntüdeki süreksizlikleri kabaca tespit edilmiştir. Ön işlemlerden sonra, olasılıksak bir yöntem kullanarak gürültüsüz bir görüntü elde edilmiş ve daha hassas ölçüm için uyarlanabilir bir eşikleme değeri kullanılmıştır. (Fujita ve Hamamoto, 2011).

Glud, Dulieu-Barton, Thomsen ve Overgaard, farklı yükleme koşulları altında GFRP laminatların mekanik testinde kullanılmak üzere, ilerleyen matris tünelleme çatlaklarını saymak için otomatik bir yöntem önermişlerdir. Glud ve diğerleri, yaptığı çalışmada, yükleme testi yapılan parçalara beyaz ışık ile desteklenmiş bir görüntü işleme yöntemi ile incelemede bulunmuştur. İletilen ışık, görüntülerdeki çatlakları tespit etmek için kullanılmış ve daha sonra test süresi boyunca çatlaklar geliştikçe ve büyüdükçe bu süreksizlikleri saymak için işlenmiştir. Görüntü işlemenin tekrarlanabilirliği ve doğruluğu, simüle edilmiş enine çatlak yoğunlukları ve desenleri kullanılarak bu çalışmada gösterilmiştir (Glud ve diğerleri, 2017).

Pascale ve Lolli, mermer sanat eserleri üzerindeki yüzey çatlaklarının derinliğini değerlendirmek için ultrasonik incelemelerin etkinliğini değerlendirmek ve bu özel

uygulamaya uygun enstrümantal aparatlar ve deneysel prosedürler geliştirmiştir. İlgili çalışmada, Michelangelo'nun ünlü sanat eseri Davut heykeli incelenmiştir. Heykelde oluşan çatlakların analizinin yapılması için ultrasonik test uygulanmıştır ve mermer eser üzerinde bulunan kavisli yüzeylerdeki çatlakların tespiti amaçlanmıştır. Burada kısıt olarak, mermer sanat eserine zarar vermemek adına coupling olarak adlandırılan ultrasonik testte kullanılan jellerin kullanımın zorluğu da karşılına çıkmıştır. Çok sayıda deneysel belirlemenin yürütülmesi ve verilerin istatistiksel analizi, sonuçların güvenilirliğini artıracak düşünölmüştür. İlgili çalışmada TOFD tekniğı kullanılmıştır ve çatlak bölgesinde ve çatlaksız bölgede ölçölen farklı TOF (dalğaların uçuş süresi) değeriğine bağılı olarak, derinlik yüksekliğı tahmin edilmiştir (Pascale ve Lolli, 2015).

Shirahata, Miki, Yamaguchi, Kinoshita ve Yaginuma, ultrasonik tahribatsız test ile yorulma çatlakları arasında ayırım yapmayı amaçlayan bir yöntem önermişlerdir. Çalışma kapsamında eksik penetrasyonu tespit edebilecek bir tandem dizi ultrasonik test sistemleri geliştirilmiştir. Tandem dizisi için kullanılan dönüştürücünün, eksik penetrasyonda ve düzensizlik yapısının tabanından yansıyan dalgayı algılayabildiğı tespit edilmiştir. Shirahata ve diğeri, çok sentetik açıklık odaklama tekniğı ile görüntüyü yeniden test etme sistemi tasarlayarak, daha uzun çatlaklar için dikkat çekici olan çatlak ucunun kapanmasını ve açılmasını gözlemlemek üzere bir çalışma geliştirilmişlerdir (Shirahata ve diğeri, 2014).

Merazi-Meksen, Boudraa ve Boudraa, ultrasonik muayenelerde süreksizliklerin durumuna karar vermeye yardımcı olan Kırınım Zamanı (Time of Diffraction) tekniğı olarak adlandırılan NDT tekniğini kullanarak ultrasonik görüntü yorumlamasının otomasyonu için bir yöntem önermişlerdir. Araştırmacılar, süreksizliklerin varlığına karşılık gelen matematiksel morfoloji yaklaşımını kullanarak ilgili pikselleri çıkarmış ve daha sonra süreksizlikleri, bir örüntü tanıma tekniğı kullanılarak karakterize etmişlerdir. Elde edilen görüntünün arka planının kaldırmak için bir filtreleme işlemi kullanılmış ve böylece görüntüde bulunan bağlantılı şekillerin algılanması iyileştirilmiştir. Çalışma kapsamında, iskeletleştirme tekniğı, kalan şekilleri eğri olarak azaltmak için uyarlanmış ve eğrilerdeki çatlak tespitlerinin tespiti için randomize Hough dönüşümü kullanılmıştır (Merazi-Meksen ve diğeri, 2014).

Pereira ve Pereira, insansız hava aracı kullanarak malzemelerdeki çatlak tespitini yapabilmek adına bir uygulama geliştirmişlerdir. Seçilen görüntü işleme algoritma

alternatifleri gömülü bir uygulamada çalıştırılmış ve tarama sonuçları insansız hava içerisinde değerlendirilmiştir. Süreksizlik tespiti için iki görüntü işleme algoritması kullanılmıştır. İlk algoritmada, Sobel operatörüne veya Sobel filtresine dayalı kenar algılama kullanılmaktadır. Sobel filtre, ayrı bir farklılaşma operatörüdür. Görüntünün her noktasında, Sobel operatörünün sonucu ya karşılık gelen gradyan vektörü ya da bu vektörün normudur. Seçtikleri ikinci algoritma ise Bayes algoritmasına dayalı parametrik olmayan bir parçacık filtresidir. Parçacık filtresi, piksel yoğunluğuna ve komşuluğundaki piksel sayısına bağlı olarak, bir görüntü segmentinin bir çatlak tarafından karakterize edilip edilmeyeceği olasılığını ilişkilendirmeye çalışmaktadır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre, parçacık filtresi ile algoritma yürütme süresinin Sobel operatörü ile segmentasyon kullanan algoritmaya göre tüm platformlarda önemli ölçüde daha az sürede olduğunu gözlemlemişlerdir (Pereira ve Pereira, 2015).

Heida ve Platenkamp malzemelerin farklı tahribatsız muayene yöntemleri ile analizlerinin yapılmasını ve tahribatsız muayene yöntemlerinin gelişmesi ile elde edilen sonuçların iyileşme süreci üzerine çalışma yapmışlardır. Ultrasonik muayenenin, özellikle kusurların tespiti, boyutlandırılması ve derinlik tahmini için fiber kompozit yapıların muayenesinde birincil tahribatsız muayene yöntemi olduğunu belirtmişlerdir. Ultrasonik muayenenin diğer muayene tiplerine göre nispeten daha hızlı olduğunu da belirtmişlerdir (Heida ve Platenkamp, 2011).

Hasiotis, Badogiannis ve Tsovalis, cam elyaf takviyeli polimer kompozit numunelerin 5 MHz frekansındaki Pulse-Echo yöntemini kullanılarak test edildiği bir çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar bir yazılım kullanarak işlenmiştir. Çalışma kapsamında, cam elyaf takviyeli polimer kompozit numuneleri söz konusu olduğunda ortaya çıkan kusur boyutunun önemli ölçüde fazla tahmin edildiği (%14'ten %73'e kadar) belirlenmiştir. Ayrıca cam elyaf takviyeli polimer kompozit numunelerini daha düşük bir frekansla test etmenin daha iyi sonuçlar vermesi gerektiği sonucuna da varılmıştır. (Hasiotis ve diğerleri, 2011). Bu çalışma da bize göstermektedir ki ultrasonik muayene sonrası elde edilen sonuçlar ile gerçek hata boyutları arasında tutarsızlık bulunmaktadır.

Broughton ve diğerleri, ultrasonik muayene tekniklerinden biri olan çift geçişli iletim tekniği (double-through transmission technique) ve 6 dB düşme kuralını kullanılarak bir polimer matrisli kompozit malzemenin incelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaya

göre, dairesel ve kare şekillerdeki yapay kusurların boyutlarının genellikle fazla tahmin edildiği ve kusurdaki belirsizliğin olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada, 6,35, 12,7 ve 25 mm boyutunda simüle edilmiş delaminasyonlar test edilmiştir. Kusur boyutu azaldıkça kusur boyutundaki belirsizliğin de arttığı gözlenmiştir (Broughton ve diğerleri, 1999). Bu çalışmadaki kusur boyutunun azalması ile belirsizliğin temel nedeni çalışmanın yapıldığı zamanki teknolojik gelişimin günümüze kıyasla geride olmasıdır. Teknolojinin gelişimi ile birlikte gelen yeniliklerle görüntü işlemedeki yenilikler buna benzer sorunların giderilmesinde büyük rol oynamaktadır. Tüm bunlardan bağımsız olarak tahribatsız muayene ile test sonuçlarının değerlendirilmesinde insan faktörü de belirleyici olmaktadır. Tahribatsız muayene yapacak olan personeller daha önce bahsedilen zorlu bir sertifikasyon sürecine tabi olmaktadır.



3. GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ VE GÖRÜNTÜNÜN YORUMLANMASI

Görüntü işleme teknikleri; teknolojinin gelişimi ile birlikte otomotiv, tıp, havacılık, uzay v.b. birçok alanda kullanılmaya başlamıştır. Bu derece çok yaygın bir alanda kullanılması en büyük sebebi problemlerin çözümünde elde ettiği yüksek doğruluktur (Özkan ve Ülker, 2017).

Yazılım alanında veri analizi, büyük hacimli verileri işleme görevinin oldukça zor olması nedeniyle çok kullanışlı ve önemli bir metot olarak kabul edilmektedir ve bu tür analizlerin uygulanmasına olan ilgi günden güne artmaktadır (Mosley,2015). Malzeme muayenesi için de görüntü analizi yöntemleri kullanılmakta fakat tahribatsız muayene tezgâhları tarafından çekilen görüntülerin kalitesi günümüz koşullarında iyi olmadığı durumlarda iyileştirme gerektirmektedir. Ultrasonik muayene sonrası elde edilen bir görüntüyü bozmadan zenginleştirebilecek birçok teknik vardır. Hâlihazırda, literatürde sağlanan iyileştirme yöntemleri, yeni geliştirilen algoritma ve uygulama bazlı olup sıkça kullanılan görüntü işleme tekniklerine göre kıyaslama yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu çalışma ile amaçlanan; bir insan gözünün yanı sıra görüntüler üzerinde farklı algoritmalar kullanarak ölçülebilen veriler ile algoritma sonuçlarını karşılaştırmak ve tahribatsız muayenede elde edilen test görüntülerinin hangi görüntü işleme tekniğine göre başarılı bir sonuç vereceğini ortaya çıkarmaktır. Seçilen algoritmaları tahribatsız muayene test görüntülerine uygulama amacı, belirli bir görüntü tipine en uygun olan bir geliştirme algoritmasına ulaşmaktır.

Görüntü işleme algoritmaları ile görüntü restorasyonu, genel olarak, tüm görüntüleme süreçlerinde meydana gelen görüntü bozulmasının (bulanıklık ve toplama/çarpma gürültüsü) etkilerini iyileştirmeyi amaçlar (Gonzalez ve Woods, 2001). Bulanıklık, tahribatsız muayene sırasında meydana gelen hareket veya görüntüleme fiziği nedeniyle oluşabilir. Literatürde dekonvolüsyon olarak adlandırılan çeşitli yöntemler uygulanarak görüntü bulanıklığının mümkün olduğunca azaltılması amaçlanmaktadır (Campisi ve Egiazarian, 2007).

3.1. Görüntü İşleme Teknikleri

Bu bölümde; görüntü işleme tekniklerinden kullanılan bazı görüntü işleme prosedürleri seçilerek aktarılmıştır. Bu seçim yapılırken görüntü işleme tekniklerinden en yaygın

kullanılan prosedürler seçilmiş, böylelikle yapılan çalışma için tek bir görüntü işleme prosedürü yerine farklı prosedürlerin çalışmaya olan etkisi kıyaslanmıştır. Buna bağlı olarak görüntü işleme prosedürlerinden sonra ortaya çıkan sonuçlar deneysel sonuçlar başlığında aktarılmıştır.

3.1.1. Otsu eşikleme

Eşikleme, gri tonlamalı görüntülerden ikili (binary) görüntüler elde etmek için kullanılan bir görüntü bölütleme (segmentasyon) yöntemidir. Bu yöntemde, belli bir eşik değerin altındaki görüntü piksellerine “0”, üzerindeki piksellere “1” değeri atanır (Patil ve Shaikh, 2016). Bu eşik değerini belirlemek problem teşkil etmektedir. Bu yüzden, Otsu (1979) tarafından eşik değerini otomatik olarak belirleyen bir teknik önerilmiş ve literatürde Otsu metodu olarak yerini almıştır (Otsu, 1979). Bu metot, sınıf-arası varyantı maksimize etmesi yönünden ideal bir yöntemdir. Metodun ana düşüncesi, iyi eşikli sınıfların piksel yoğunluk değerlerine göre farklı olması ve yoğunluk değerleri açısından sınıflar arasında en iyi ayrımı sağlayan eşik değerin en iyi eşik olacak olmasıdır. Otsu algoritmasının çalışma prensibini şu şekilde sıralanır (Gonzalez ve Woods, 2018):

Görüntünün histogramı çıkarılır. $p_i = n_i/MN$, histogram bileşenlerini temsil eder. Burada, $M \times N$ sayısal görüntünün piksel boyutlarını, n_i ise, i yoğunluk seviyesine sahip piksel sayısını gösterir. Yoğunluk seviyeleri L ise, $\{0,1,\dots,L-1\}$ ile gösterilmektedir.

$$\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1, p_i \geq 0 \quad (3.1)$$

Kümülatif toplam $P_1(k)$ hesaplanır. $[0,k]$ aralığındaki yoğunluk değerlerine sahip görüntü pikselleri C_1 ve $[k+1,L-1]$ aralığındaki değerler C_2 olmak üzere iki sınıf belirlenir. Aşağıdaki bağıntılar kullanılarak, bir pikselin C_1 ya da C_2 sınıfına atanma olasılıkları kümülatif toplam ile hesaplanır.

$$P_1(k) = \sum_{i=0}^k p_i \quad (3.2)$$

$$P_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i = 1 - P_1(k) \quad (3.3)$$

C_1 sınıfına atanan piksellerin ortalama yoğunluk değeri $m_1(k)$ ve C_2 sınıfına atanan piksellerin ortalama yoğunluk değeri $m_2(k)$ değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$m_1(k) = \sum_{i=0}^k iP(i/C_1) \quad (3.4)$$

$$= \sum_{i=0}^k \frac{iP(C_1/i)P(i)}{P(C_1)} = \frac{1}{P_1(k)} \sum_{i=0}^k ip_i \quad (3.5)$$

Bu çıkarıma göre;

$$m_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} iP(i/C_2) \quad (3.6)$$

$$= \sum_{i=k+1}^{L-1} iP(C_2/i)P(i)/P(C_2) = \frac{1}{P_2(k)} \sum_{i=k+1}^{L-1} ip_i \quad (3.7)$$

$k=0,1,\dots,L-1$ için, kümülatif ortalama $m(k)$ hesaplanır.

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i \quad (3.8)$$

Ortalama global yoğunluk (tüm görüntüdeki ortalama yoğunluk) m_G hesaplanır.

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i \quad (3.9)$$

Sınıf-arası varyantı $\sigma_B^2(k)$ hesaplanır.

$$\sigma_B^2(k) = \frac{[m_G P_1(k) - m(k)]^2}{P_1(k)[1 - P_1(k)]} \quad (3.10)$$

Burada, $P_1(k)$ 'nın $k=0,1,\dots,L-1$ için hesaplandığı bilinmelidir.

$\sigma_B^2(k)$ 'yi maksimum yapan k değeri olarak k^* Otsu eşik seviyesi bulunur. Maksimum tek değilse algılanan değişik maksimumlara karşılık gelen k değerlerinin ortalaması ile k^* bulunur.

$$\sigma_B^2(k^*) = \max_{0 \leq k \leq L-1} \sigma_B^2(k) \quad (3.11)$$

$k = k^*$ için, eşik değerin uygunluğunu değerlendirmek için, η^* ayrılabilirlik ölçümü elde edilir.

$$\eta(k) = \frac{\sigma_B^2(k)}{\sigma_G^2} \quad (3.12)$$

Burada, global varyans (görüntüdeki tüm piksellerin yoğunluk varyansı)

$$\sigma_G^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - m_G)^2 p_i \quad (3.13)$$

dir.

Otsu metodu, histogram iki tepeli (bimodal) dağılım gösterdiğinde ve bu iki tepe arasında keskin çukurlar olduğunda nispeten iyi bir performans gösterir. Fakat ayrımı yapılacak iki bölgenin yoğunluk varyansları ortalama farka göre büyükse ya da görüntüde ciddi bir gürültü varsa, histogramdaki keskin çukurlar bozulacaktır. Bu da, Otsu'nun eşik değeri yanlış belirlmesine sebep olacak ve bu yüzden görüntü bölümlenme yanlış yapılacaktır (Neeraja ve Reddy, 2016).

Otsu metodunun eşik değerinin yanlış belirlenmemesi adına metodu kullanmadan önce işlenecek görüntü Gauss filtresi yardımıyla gürültülerden arındırılabilir. Bu, elde edilecek ikili (binary) görüntünün daha iyi görünmesini sağlayacaktır. İki değişkenli Gauss fonksiyonu,

$$G = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3.14)$$

şeklinde olup, $\sigma=1$ alındığında, 5x5 çekirdek boyutlu bir Gauss filtresi elde etmek mümkündür ve Çizelge 3.1'de ilgili Gauss filtresi sonucu gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 5x5 çekirdek boyutlu Gauss filtresi

0.003	0.013	0.022	0.013	0.003
0.013	0.059	0.097	0.059	0.013
0.022	0.097	0.159	0.097	0.022
0.013	0.059	0.097	0.059	0.013
0.003	0.013	0.022	0.013	0.003

Resim 3.1'de görüntü işleme alanında sıklıkla kullanılan bir resmin orijinal görüntüsü, Resim 3.2'de ise belirli bir eşik değerine göre nesnelerin ayırt edilmesi sağlayan Otsu algoritması ile filtrelenmiş eşik görüntüsü yer almaktadır.



Resim 3.1. Otsu filtresi uygulanmadan önceki orijinal görüntü (Gonzalez ve Woods, 2018)



Resim 3.2. Otsu algoritması eşik görüntüsü

3.1.2. Gabor filtresi

Dennis Gabor tarafından 1946'da tek boyutlu Gabor filtresi, Gauss pencereleriyle kosinüs ve sinüs (çift/tek) dalgaların çarpımı olarak tanımlanmıştır (Gabor, 1946):

$$g_e(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cos(2\pi\omega_0 x) \quad (3.15)$$

$$g_o(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \sin(2\pi\omega_0 x) \quad (3.16)$$

Burada, ω_0 filtrenin en büyük yanıtı verdiği merkez frekans ve σ Gauss fonksiyonunun standart sapmasıdır. Gabor Belirsizlik İlkesi, zaman ve frekanstaki belirsizlik çarpımlarının belirli bir sabit değeri aşması veya bu değere eşit olması gerektiğini söyler.

$$\Delta t \Delta f \geq 1 \quad (3.17)$$

Bunun anlamı, bunlardan birinin ölçülebildiği doğruluğun, diğerinin ölçülebileceği olası en iyi doğruluğu sınırlamasıdır. Böylelikle, Gabor, zaman ve frekans alanlarındaki lokalizasyon arasında ideal bir uzlaşma sağlayan, doku bölütleme (segmentasyon) problemleri için oldukça uygun, karmaşık bir Gabor filtresi ortaya atmıştır. Gabor filtresi, Gauss dalgası tarafından modüle edilen, belirli frekans ve yönelime sahip sinüzoidal bir sinyal olarak düşünülebilir.

$$g(x) = g_e(x) + i g_o(x) \quad (3.18)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} (\cos(2\pi\omega_0 x) + i \sin(2\pi\omega_0 x)) \quad (3.19)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} e^{i(2\pi\omega_0 x)} \quad (3.20)$$

Daugman tarafından yapılan çalışmalarla Gabor filtreleri iki boyutlu hale getirilmiştir (Daugman, 1988):

$$g_e(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)} \cos(2\pi\omega_{x0}x + 2\pi\omega_{y0}y) \quad (3.21)$$

$$g_o(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)} \sin(2\pi\omega_{x0}x + 2\pi\omega_{y0}y) \quad (3.22)$$

Burada, $(\omega_{x0}, \omega_{y0})$ merkez frekanstır.

$x' = x \cos \theta + y \sin \theta$ ve $y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$ olmak üzere, iki boyutlu karmaşık Gabor filtresi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$g_{\omega, \theta}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}\right)} e^{i\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right)} \quad (3.23)$$

Burada, λ , sünozoidal bileşenin dalgaboyudur ve Gabor fonksiyon şeritlerinin genişliğini belirler. Dalgaboyunun artması daha kalın şeritler sağlar. θ , Gabor fonksiyonunun yönelimidir ve Gabor fonksiyonunun yönelimini belirler. 0° dikey, 90° yatay pozisyonun temsil eder. ω , merkez frekanstır. σ , Gauss fonksiyonunun standart sapmasıdır ve Gabor paketinin genel boyutunu kontrol eder. Daha fazla bant genişliği daha çok şerit sağlar. γ , uzamsal en boy oranıdır ve Gabor fonksiyonunun yüksekliğini kontrol eder. Yüksek oranlarda yükseklik çok küçük, küçük değerlerde çok büyük olur. ψ ise, sinüzoidal fonksiyonun faz farkını belirtir.

Gabor filtresi bir görüntüye uygulandığında, dokuların değiştiği kenar ve noktalarda belirgin ayırım görülür (Shah, 2018). Gabor filtresi iyi sonuçlar vermesine rağmen, yukarıda bahsedilen birçok parametreye sahip olduğu için yüksek hesaplama maliyetini beraberinde getirir (Baykara ve Ergen, 2011).

3.1.3. Canny kenar tespit algoritması

Kenar tespit, özellikle öz nitelik algılama ve çıkarımı için kullanılan, görüntüde ani parlaklık değişimlerinin olduğu noktaları bulmayı amaçlayan çeşitli matematiksel yöntemler içerir. Canny kenar tespit algoritması, eski bir algoritma olmasına rağmen, oldukça iyi sonuçlar verdiği için hala en çok kullanılan yöntemlerden biridir (Shapiro ve Stockman, 2001). Bu algoritma, çok adımlı bir algoritmadır ve adımlar aşağıda görüldüğü gibidir (Sahir, 2019): Bu adımlar takip edilmeden önce, algoritmanın gri tonlamalı görüntüler üzerinde çalışmaya izin verdiği bilinmelidir.

Gürültü giderme (Gauss Filtresi)

Görüntüdeki gürültülerden kurtulmak için öncelikle görüntüyü yumuşatmak gerekmektedir. Bu sebeple Gauss filtresi kullanılır ve görüntü bulanıklaştırılır. Bunun için bir Gauss Çekirdeği (3x3, 5x5, 7x7 vb.) ile görüntü evrişim tekniği uygulanır. Çekirdek boyutu,

beklenen bulanıklaştırma etkisine bağlıdır. Temel olarak, çekirdek ne kadar küçük olursa, bulanıklık o kadar az görünür olur (Sahir, 2019).

Kenar tespit algoritmaları görüntülerdeki gürültülere karşı hassastırlar. Bu yüzden, diğer adımlara geçmeden önce görüntü, gürültülerden kısmen kurtulmak için Gauss filtresi kullanılarak yumuşatılmalıdır. $(2k+1) \times (2k+1)$ boyutunda bir Gauss filtre çekirdeği için denklem aşağıdaki bağıntıyla verilir (Sahir, 2019).

$$H_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\left(-\frac{(i-(k+1))^2 + (j-(k+1))^2}{2\sigma^2}\right)}; \quad 1 \leq i, j \leq (2k+1) \quad (3.24)$$

Yatay ve dikey gradyan hesaplama (Sobel Filtresi)

Kenar tespiti için, gerekli olan keskin parlaklık değişimleri Sobel filtresi kullanarak bulunabilir. Yumuşatılmış görüntüye x ve y yönünde Sobel filtresi uygulanarak görüntünün gradyanı hesaplanır, kenar yoğunluğu ve yönü algılanır. Sobel filtreleri aşağıda verilmiştir (Sahir, 2019).

$$K_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad K_y = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Görüntü I ile temsil edilirse, görüntünün x ve y'ye göre türevleri sırasıyla I_x ve I_y hesaplanır. Buradan gradyanın büyüklüğü ve eğimi aşağıdaki matematiksel ifadelerle hesaplanır (Sahir, 2019).

$$|G| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (3.26)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_y}{I_x} \right) \quad (3.27)$$

Gereksiz kenar elemesi (Non-max suppression)

Gradyan hesaplaması yapıldıktan sonra, kenar olarak belirlenen alanları inceltmek adına gereksiz kenar eleme işlemi yapılır.

Çift eşikleme (threshold)

Non-Max Suppression algoritmasının uygulanmasından sonra elde edilen kenar piksellerinin değerleri eşik değerine göre kıyaslanır. Eşik değeri pikselin değerinden yüksek ya da küçük ise, bu sonuca göre işaretlenir.

Kenar izleme (Hysteresis)

Son olarak, çift eşik uygulamasından sonra hysteresis uygulanarak gereksiz kenarlardan kurtulunabilir. Zayıf ve güçlü kenarlara bağlı olmayan diğer tüm kenarlar elenir. Buradaki yaklaşım, işlenen görüntü elemanının çevresinde en az bir tane güçlü piksel varsa işlenen görüntü elemanının güçlü piksellere çevrilmesidir.

Canny kenar tespit algoritması çoğunlukla faydalı sonuçlar vermektedir. Popüler olmasının başlıca sebebi de budur. Ancak hala geliştirilmesi gereken birtakım yönleri mevcuttur.

Resimde bulunan gürültüyü gidermek için bir Gauss filtresi kullanılmakta fakat bu filtre aynı zamanda bariz kenarların da kaybolabilmesine yol açmaktadır. Bu durumda bazı kenarlar gözden kaçabilir veya eksik çıkarım yapılabilir. Eşikleme işlemi yapılırken yalnızca kenarlardan bağı kopan, tek nokta şeklinde belirlenmiş pikseller değil, kenar olarak belirlenmiş bazı bölgeler de filtrelenebilmektedir. Bu işlem esansında farklı yaklaşımlar kullanılarak eşiklenen pikselin gerçekten bağımsız olup olmadığı tespit edilebilir.

Aşağıdaki görsellerde Resim 3.3’de orijinal bir görüntü ile Resim 3.4’de Canny kenar tespit algoritması ile filtrelenmiş bir görüntü bulunmaktadır. Filtre uygulaması sonrası nesnelerin keskin hatlarının çıktığı gözükmemektedir.



Resim 3.3. Orijinal görüntü (Gonzalez ve Woods, 2018)



Resim 3.4. Canny kenar tespit algoritması görüntüsü

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında havacılık sektöründe kullanılan fiber kompozit malzemelerin tahribatsız muayene yöntemleri ile muayenesi sonrası elde edilen görüntülerde bulunabilen süreksizliklerin boyutlandırılmasında kullanılabilecek uygun görüntü işleme tekniklerinin kıyaslaması yapılmıştır. Materyal olarak süreksizliği bulunan fiber kompozit malzemeler, bu malzemelerin görüntüleri ve geliştirilen uygulama kullanılacaktır.

Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada fiber kompozit malzemelerin ultrasonik muayene ile görüntülenmesi sağlanmıştır. Resimler kaliteli bir tezgâh ile ya da taşınabilir elle muayene ekipmanlarından elde edilmiştir. İkinci aşamada elde edilen resimlerin geliştirilen uygulama ile farklı görüntü işleme tekniklerine göre süreksizlik boyutlarını çıkarması sağlanmıştır.

Yapılan çalışmada havacılık firmasında üretilen karbon fiber kompozit parçaları ve test süreçlerinde kullanılan test bloklarının ultrasonik muayenesinde TECNATOM marka ultrasonik test robotu kullanılmıştır. Bu robottan elde edilen görüntüler çalışmanın veri setini oluşturmaktadır.

4.1. Ultrasonik Test Ekipmanı

Yapılan çalışma kapsamında kullanılan ekipmanlar bu bölümde belirtilmiştir. Bu ekipmanlar bir savunma sanayi firmasının tez çalışmasına desteği ile çalışmaya dahil edilmiştir.

4.1.1. TECNATOM çift başlıklı ultrasonik tarama robotu

IFR (2021)'nin yayınlamış olduğu “Executive Summary World Robotics 2021 Industrial Robots” raporuna göre küresel salgın durumuna rağmen sanayide robot çözümleri son yıllarda büyük oranda artış göstermektedir. Gelişmiş ülkelerin büyük bir çoğunluğu üretimi otomatikleştirmek ve uzun vadede maliyetleri düşürmek için endüstriyel robotlara yatırım yapmaktadır. Bu yatırımların bir ayağı da tahribatsız muayene alanında olmaktadır. Tahribatsız muayenede kullanılan robotik sistemler sayesinde test süreleri azalmaktadır. Ayrıca programlama esnekliği ile test yapacak personellerin iş yükünü azaltmaktadır.



Resim 4.1. TECNATOM ultrasonik tarama robotu (Tecnatom, 2022)

Yapılan çalışma kapsamında TECNATOM firmasının Taurus ürün ailesinde bulunan TWIN Multi-Technique Systems robotları kullanılmıştır (Resim 4.1). TECNATOM Çift başlıklı ultrasonik tarama robotu ile karmaşık geometrilere sahip geniş bir ürün yelpazesinin taranması sağlanmıştır. Robot, iki tip tarama imkânı vermektedir. İlki; iki robotun aynı anda hareketlenerek su iletim yolu ile TTU tarama yapmasına olanak vermektedir. İkincisi ise daldırma yöntemi ile bu sürecin ele alınmasıdır. Tek bir robot diğerinden bağımsız olarak pulse echo metodu ile tarama yapabilmektedir. Her iki yöntemde de parçanın geometrisini öğrenme, tarama yollarını oluşturma, tarama öncesi benzetim ile kontrol yapma, tarama sonrası kontrol verileri kontrol etme ve raporlama için ayrı uygulamalar bulunmaktadır. TECNATOM Çift başlıklı ultrasonik tarama robotunun özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

Resim 4.2’de TTU ile tarama yapılan robotun görseli bulunmaktadır. 2 robot birbiri ile senkronize bir şekilde çalışmaktadır (Tecnatom, 2022).



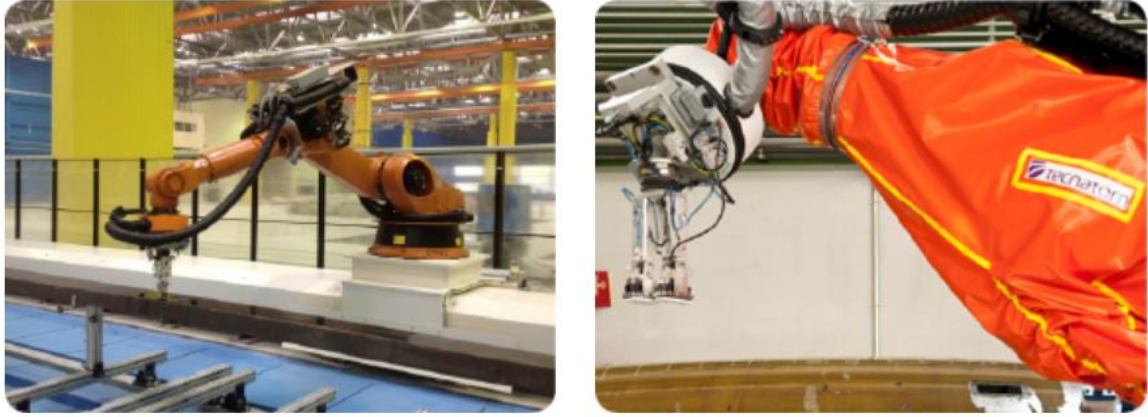
Resim 4.2. TECNATOM ultrasonik tarama robotu (TTU Modu) (Tecnatom, 2022)

Aşağıdaki Çizelge 4.1’de ilgili robotik tezgâhın özellikleri bulunmaktadır. Robotun teknik isterleri genellikle projenin isterleri ile ilişkili şekilde belirlenir.

Çizelge 4.1 TECNATOM ultrasonik tarama robotu özellikleri (TTU Modu) (Tecnatom, 2022)

Tarama metodu	TTU
Sistemin yön sınırları	X: 12 000 mm Y: 2 500 mm Z: 3 000 mm
Aks sayısı	14
Kanal sayısı	2 (1 MHz ve 5 MHz)
Yorumlama yapılan uygulama	Tecnatom Inspectview
Ana robottaki ultrasonik dönüştürücü	Imasonic Bifrecuencia
Karşılıyıcı robottaki ultrasonik dönüştürücü	Imasonic Bifrecuencia
UT ekipman	Tecnatom Sonia FPR8A Modülü
Couplant	Su
Nozzle boyutları	5,0 mm çap

Resim 4.3’de PE modu ile tarama yapılan robotun görseli bulunmaktadır. Tek bir robot PE başlığı ile tarama işlemi yapmaktadır. Aşağıdaki tabloda ilgili robotik tezgâhın özellikleri bulunmaktadır.



Resim 4.3. TECNATOM ultrasonik tarama robotu (PE Modu) (Tecnatom, 2022)

Aşağıdaki Çizelge 4.2’de ilgili robotik tezgâhın özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.2. TECNATOM ultrasonik tarama robotu özellikleri (PE Modu) (Tecnatom, 2022)

Tarama metodu	Fazlı dizili prob
Sistemin yön sınırları	X: 12 000 mm Y: 2 500 mm Z: 3 000 mm
Aks sayısı	14
Kanal sayısı	1
Yorumlama yapılan uygulama	Tecnatom Inspectview
UT ekipman	FPA128M Module
Couplant	Su
Frekans	5 MHz
Kanal sayısı	32
Element boyutu	1 mm x 6 mm
Nozzle boyutları	5,0 mm çap

4.1.2. Manuel tarama cihazı

Ultrasonik muayene işlemleri yukarda belirtilen endüstriyel ultrasonik tarama tezgâhlarıyla yapılabileceği gibi manuel tarama cihazları da kullanılmaktadır. Buradaki amaç, tarama yapılacak bazı parçaların geometrik şekillerinin tezgâh taramasına uygun olmamasıdır. Ayrıca bazı durumlarda parça tezgâha gönderilecek durumda olmayabilir. Bu durumda aşağıda belirtilen manuel tarama cihazları kullanılabilir. Bunlara ilave olarak, tezgâhta tarama yapılan parçada bulunan süreksizliğin boyutunun ve konumunun belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında havacılıkta kullanılan fiber kompozit test parçalarının tezgâh yardımıyla yapılan taramalarda tespit edilen süreksizliklerin boyutlarının daha hassas şekilde tespit edilmesi için Olympus Omniscan SX ve Olympus Omniscan MX2 cihazları kullanılmıştır. Bunlara rağmen, manuel cihazlar ile tarama yapılması, süreksizliklerin tespiti endüstriyel ultrasonik tarama tezgâhlarının hızı ve kabiliyetlerine oranla daha zordur. Bu çalışmada manuel tarama cihazları hataların boyutlarının doğrulanması için kullanılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 4.3'te Olympus Omniscan SX'in teknik özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.3. Olympus Omniscan SX teknik özellikleri (Olympus, 2021)

Tarama metodu	Fazlı dizili prob ve tekli prob
Prob	1 Fazlı dizili prob: Olympus PA connector 2 UT connectors: LEMO 00
Yorumlama yapılan uygulama	OmniScan
Frekans	Fazlı dizili için; 0,5 MHz değerinden 18 MHz değerine kadar bant genişliği. UT problemleri için 0,25 MHz değerinden 28 MHz (–3 dB) değerine kadar bant genişliği.
Kanal sayısı	64
Kodlayıcı	2 eksenli kodlayıcı hattı (dörtlü, yukarı, aşağı veya saat/yön)
Sayısal giriş	4 sayısal TTL girişi, 5 V beslemeli
Sayısal çıkış	3 sayısal çıkış, TTL, 5 V, 15 mA
Veri görseli	A-scan: 60 Hz; S-scan: 60 Hz

Yapılan çalışmada kullanılan Olympus Omniscan SX'in görseli Resim 4.4'de gösterilmiştir.



Resim 4.4. Olympus Omniscan SX (Olympus, 2021)

Çalışmada kullanılan diğer manuel tarama ekipmanı olan Olympus Omniscan MX'in teknik özellikleri Çizelge 4.4'de, ekipmanın görseli ise Resim 4.5'te gösterilmiştir.



Resim 4.5. Olympus Omniscan MX2 (Olympus, 2021)

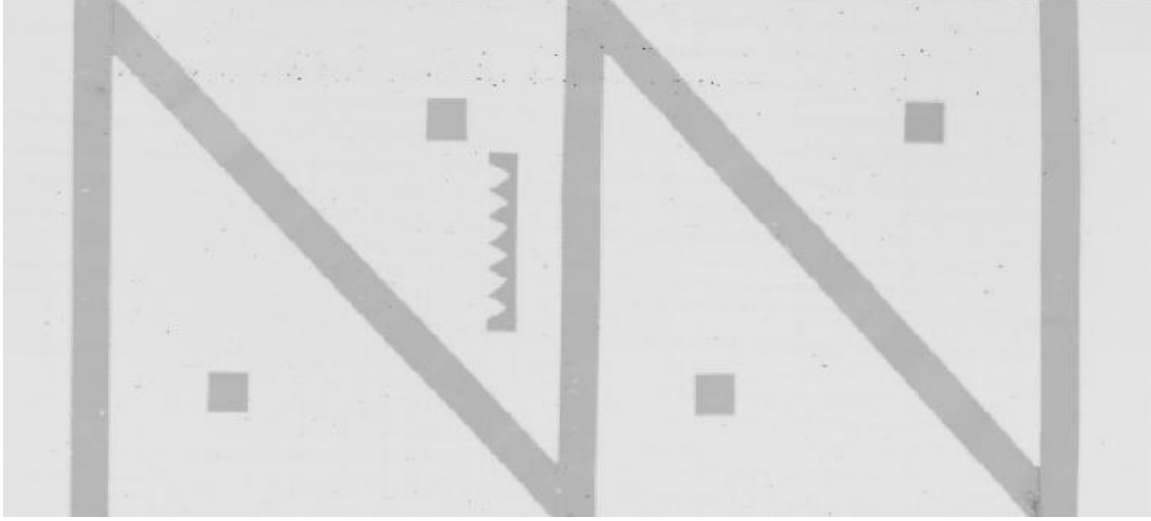
Çizelge 4.4. Olympus Omniscan MX teknik özellikleri (Olympus, 2021)

Tarama metodu	Fazlı dizili prob ve tekli prob
Prob	1 Fazlı dizili prob: Olympus PA connector 2 UT connectors: LEMO 00
Yorumlama yapılan uygulama	OmniScan
Couplant	Su
Frekans	Fazlı dizili için; 0,5 MHz değerinden 18 MHz değerine kadar bant genişliği. UT problemleri için 0,25 MHz değerinden 28 MHz (–3 dB) değerine kadar bant genişliği.
Kanal sayısı	192ye kadar
Kodlayıcı	2 eksenli kodlayıcı hattı (dörtlü, yukarı, aşağı veya saat/yön)
Sayısal giriş	4 sayısal TTL girişi, 5 V beslemeli
Sayısal çıkış	4 sayısal çıkış, TTL, 5 V, 15 mA
Veri görseli	A-scan: 60 Hz

4.2. Veri Seti

Veri seti, havacılık ve savunma sanayide hizmet vermekte olan bir firma ile iş birliği içinde oluşturulmuştur ve veri seti farklı fiber kompozit parçalarından toplam 300 ultrasonik test görüntüsünü içermektedir. Bu görüntüler proje gizliliği içermesinden dolayı tez kapsamında paylaşılamamıştır fakat ilgili şirketten tasnif dışı veri seti kapsamında ultrasonik muayene yapan tezgahların kalibrasyon test blok görüntüleri kullanılarak tez çalışmasını destekleyici veri seti oluşturulmuştur.

TECNATOM çift başlık ultrasonik tarama robotu belirli periyotlarda kalibrasyon testlerine tabi olmak zorundadır. Bu test sırasında hata boyutu belli olan plaklardan yararlanılmaktadır. Aşağıda ultrasonik kalibrasyon test plakasına ait bir görüntü bulunmaktadır (Resim 4.6). Geliştirilen uygulama ile ultrasonik test plakasının görüntüsünün süreksizlik alanları kıyaslanmıştır.



Resim 4.6. Örnek bir kalibrasyon test plakası

Kalibrasyon test plakası üzerindeki koyu gri alanlar hatalı bölgeleri, açık gri bölgeler ise hatasız bölgeleri temsil etmektedir. Uygulama kalibrasyon test plakasındaki kare bölge için test edilmiştir. Bu bölge Resim 4.7’de gösterilmektedir.



Resim 4.7. Kalibrasyon test plakası bölge-1 (40 x 40 mm uygunsuzluk alanı)

Kalibrasyon test plakası üzerinde formu daha karmaşık olan alanlar da çalışmaya dahil edilmiştir. Bu işlem için ayrılan diğer iki bölge Resim 4.8 ve Resim 4.9’da gösterilmiştir.



Resim 4.8. Kalibrasyon test plakası bölge-2



Resim 4.9. Kalibrasyon test plakası bölge-3

4.3. Uygulama Geliştirme Ortamı

Uygulama geliştirme için Jupyter Notebook ortamında Python kodlama dili seçilmiştir. Project Jupyter, tüm programlama dillerinde etkileşimli veri bilimini ve bilimsel hesaplamayı desteklemek üzere geliştirilen 2014 yılında IPython Projesi'nden doğan, kar amacı gütmeyen, açık kaynaklı bir projedir. Projenin açık kaynaklı olmasından dolayı kullanması ücretsiz ve herkes tarafından erişilebilir bir uygulamadır (Jupyter, 2022). Bu uygulamanın seçilmesinin sebebi herhangi bir lisans ücreti ödenmesine gerek olmaksızın istenilen her ortamda geliştirilen uygulamanın erişilebilir olmasının amaçlanmasıdır. Jupyter, GitHub ile bütünleşmiş bir şekilde çalıştığı için istenirse yapılan çalışmanın dünya genelinde ücretsiz şekilde yayınlanma olasılığı da bulunmaktadır.

Jupyter Notebook ise, kolaylıkla python dosyaları oluşturmaya ve yönetmeye olanak sağlayan web tabanlı etkileşimli bir çalışma ortamıdır. Jupyter Notebook; IPython, Tornado, jQuery ve MathJax gibi çeşitli açık kaynaklı kütüphaneleri desteklemektedir. Geliştirilen uygulamada Numpy, Matplotlib, Skimage, Scipy, Convolve, Ndimage ve Cv2 kütüphaneleri ile üç farklı görüntü işleme prosedürü kullanılmıştır. Bu prosedürler belirlenirken literatür taraması yapılmış ve en yaygın kullanımı olan prosedürler seçilmiştir.

Gabor filtresi uygulanan görsellere eşik değeri de uygulanmıştır. Bunun sebebi, Gabor filtresi sonrası oluşan histogramdaki yoğunluğu dengeli hale getirmek istenmesindendir. Böylece alan tespiti çalışmasında kolaylık sağlanmıştır. Otsu yöntemi uygulanırken önce Gaussian filtresi uygulanıp ardından Otsu filtresi uygulanmıştır. Ardından hatalı bölgenin alanları ile Canny algoritmasında da kenar tespiti yapılarak kenarlar arasında kalan bölgenin alanı hesaplanmıştır.

4.4. Karbon Fiber Test Malzemesinin Tarama Prosedürü

Karbon fiber test malzemesinin TECNATOM çift başlıklı ultrasonik tarama robotu ile taranması için aşağıdaki prosedür izlenmiştir.

1. TECNATOM çift başlıklı ultrasonik tarama robotuna, kontrolcüye ve bilgisayarlara enerji verilir.
2. INSPECTION uygulaması açılır.
3. Robotlar başlangıç konumuna çekilir. Robotların sıfırlama ve fren testleri koşulur.
4. Tarama tipine göre prob seçimi yapılır.
5. Robotlar güvenli durumda iken, referans paneli ve parça tarama bölgesine yerleştirilir.
6. Tarama öncesinde su basıncının ve dengesi kontrol edilir.
7. Referans paneli ve parça taramaya hazır hale getirmek için temizlenir.
8. Parçanın referans noktalarının belirlenmesi adına lazer ile tarama yapılır ve parçanın X-Y-Z konumu belirlenir. Bu referans noktaları, parçanın taramasını yapacak robotların konumlarını sağlayacak uygulamaya girilir. Referans numaralarının hata payı 0 ile 4 mm arasında olmalıdır.
9. INSPECTION uygulamasında tarama yapılacak parçaya uygun daha önce hazırlanmış olan tarama programı çalıştırılır.

Çizelge 4.5’de tarama yapılmadan önce belirlenen TECNATOM Çift başlıklı ultrasonik tarama robotu uygulama değerleri gösterilmiştir. Ardından tarama işlemine geçilmesi için aşağıdaki adımlar takip edilir.

Çizelge 4.5. TECNATOM Çift başlıklı ultrasonik tarama robotu uygulama değerleri

Gain	3.9 dB
Coor. gain	0.6 dB
Voltage	25 V
Velocity	2812 m/sec
P.Width	100 ns
P. Frequency	5 MHz
HW Gate	U/D
SW Gate	Tüm tarama alanları için %10 eşik değeri

1. Tarama başlar ve tarama bilgileri canlı olarak izleme ekranına düşer.
2. Tarama işlemi bittikten sonra su kesilir.
3. Robotlar güvenli alana çekilir.
4. Referans panelindeki alanların eşleştiği alanlar ile taranan parçanın bölgeleri değerlendirilir. Standartlara göre belirlenmiş olan ses kayıplarına bağlı bir eşik değeri ile parça incelenir.
5. (Varsa) süreksizliklerin boyutu tespit edilir ve raporlanır.

Eğer manuel tarama cihazı ile tarama işlemi yapılacaksa, aşağıdaki prosedür izlenir.

1. Manuel tarama cihazına güç verilir ve ON butonuna basılır.
2. Referans blokları ile birlikte parçaya tanımlı olan ölçümleme işlemi yapılır.
3. Parça üzerinden derinliği bilinen 2 nokta seçilir.
4. Manuel tarama cihazından “Wizad” -> “Calibration” seçimi yapılır.
5. Ultrasound and Velocity & WD seçimi takip edilir.
6. 3 numaralı maddede belirlenen iki derinliğin değeri girilir.
7. İlgili derinliklere ait alanlara “kapı pozisyonları” belirlenir.
8. Her iki derinlik için ölçüm yapılır ve ölçümleme tamamlanır. Eğer ölçümleme sonrası ölçüm noktalarının derinliği farklı çıkarsa, yukardaki işlemler tekrarlanır.

9. Referans panelinin arka duvarından gelen sinyalin yüzde 80'e eşitlenmesi sağlanana kadar db değişikliği yapılır.
10. Karbon fiber test parçası ile prob arasına sesin geçişini sağlayacak olan malzeme seçilir. (Su, Ultragell II ve ya Sonotrace 30)
11. Çizelge 4.6'da belirtilen parametrelerin manuel tarama cihazı parametre giriş ekranında belirtilmesi gerekmektedir.

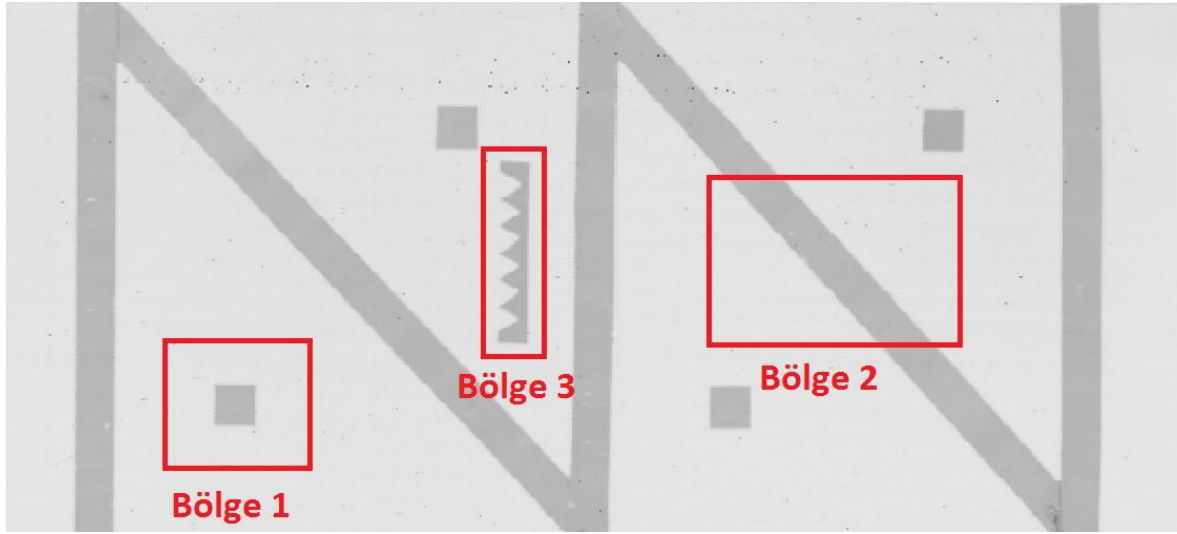
Çizelge 4.6. Manuel tarama cihazı parametreleri

Gain	Arka duvar sinyal seviyesi %80 olana kadar gain db değişikliği yapılır.
Range	Taranacak parçanın en kalın bölgesinin 1.2 katı olması gerekmektedir.
Wedge Delay	Probun önünde bulunan takozun uzunluğu yazılır.
Energy	200V
Velocity	Yaklaşık 2800 ile 3000 m/sec olmalıdır. Bu değer kalibrasyon sırasında otomatik belirlenir.
TX/RX	PE (Pulse Echo)
Frequency	5 MHz
Filtre	Yok
Angle	0

1. Referans paneli ve parça taramaya hazır hale getirmek için temizlenir.
2. Tarama yapılacak parçanın yüzeyi belirli bir doğrultuda taranır. Tarama esnasında arka duvarda oluşacak her yarılanma 6db'lik bir kayba denk gelmektedir.
3. Tarama yapılan parçanın standardında belirlenen kayıp değerlerine göre tarama işlemi sonuçlandırılır.

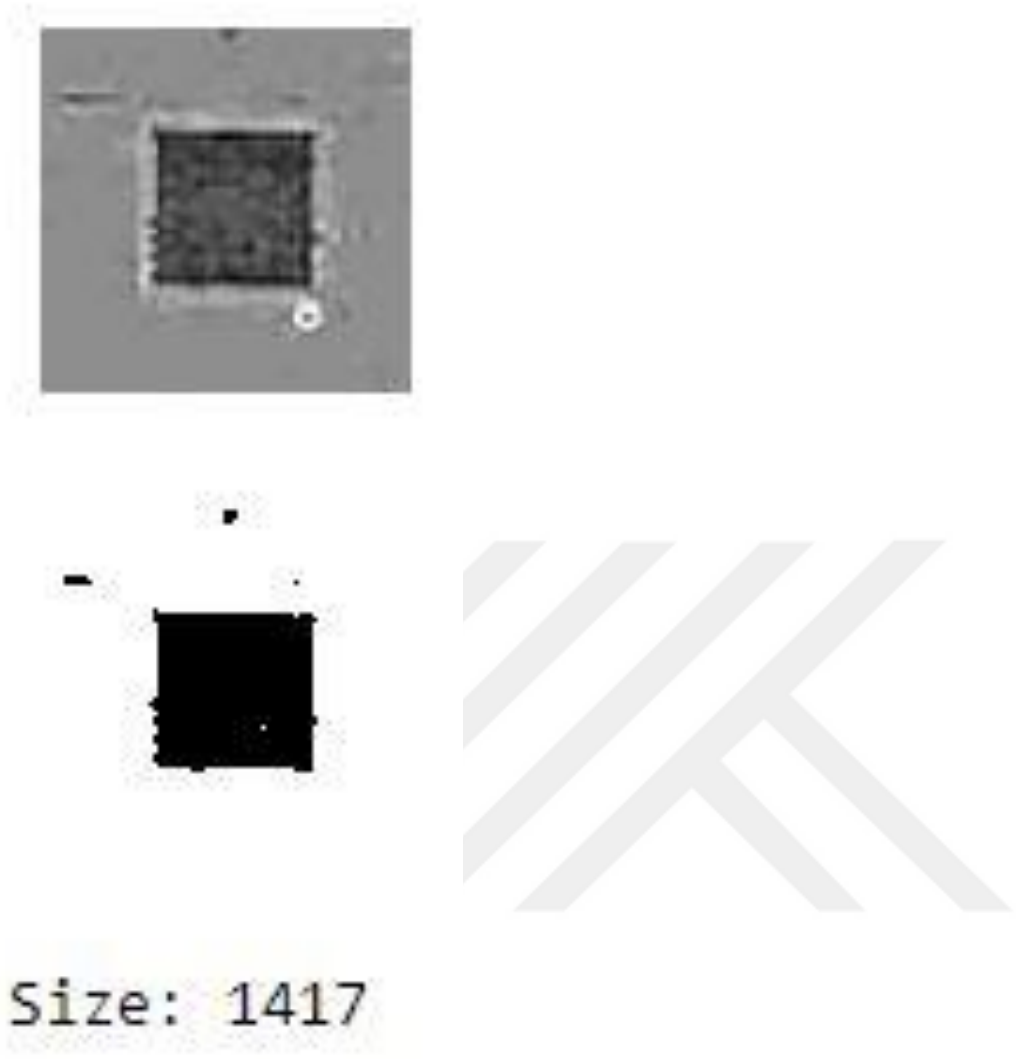
5. DENEYSEL SONUÇLAR

Kalibrasyon test plakası; gerçek boyutları bilinen hataları içermektedir. Bu hatalar, malzeme içerisinde yerleştirilebileceği gibi, malzeme üzerinde de konumlandırılabilir. Boyutu bilinen hatalar ile ultrasonik tarama yapan robotik tezgâhların tarama görüntüleri arasındaki tutarlılık önemlidir. Bu çalışma kapsamında; kalibrasyon test plakası üzerindeki boyutu bilinen alanlar ile geliştirilen uygulama sonrası hesaplanan alanlar kıyaslanmıştır. İlgili görüntü 3 bölgeye ayrılmıştır. Bölgeler Resim 5.1’de gösterilmiştir.



Resim 5.1. Kalibrasyon test plakasının belirlenen bölgeleri

Bölge 1’e Gabor filtresi uygulandığında oluşan çıktı Resim 5.2’de gösterilmiştir. Uygunsuz bölgenin alanı 1417 mm^2 olarak hesaplanmıştır. Hatanın gerçek boyutlarıyla Gabor filtresi ile elde edilmiş görüntü boyutlandırmasının oranı %88,5625 olarak hesaplanmıştır.



Resim 5.2. Gabor filtresi sonrası Bölge 1'in görüntüsü

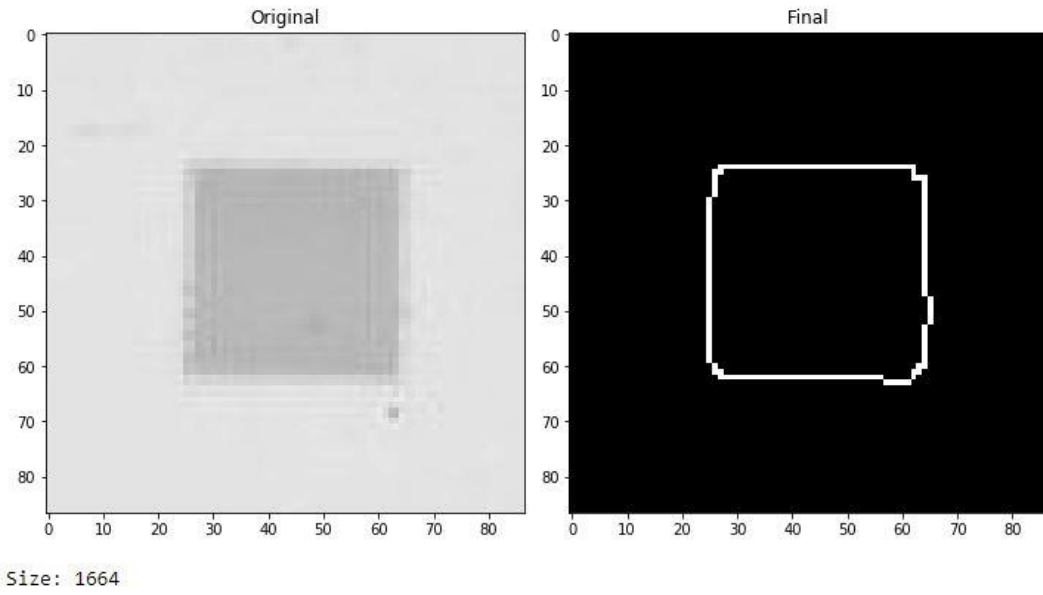
Bölge 1'e Otsu filtresi uygulandığında oluşan çıktı Resim 5.3'de gösterilmiştir. Uygunsuz bölgenin alanı 1501 mm^2 olarak hesaplanmıştır. Hatanın gerçek boyutlarıyla Otsu filtresi ile elde edilmiş görüntü boyutlandırmasının oranı %93,8125 olarak hesaplanmıştır.

Fujita ve Hamamoto; otomatik çatlak algılama yöntemini, gri tonlamalı görüntülerin histogram bilgisine dayalı olarak elde edilen eşik değerine göre tasarladılar ve eşik değerini belirlemek için Otsu yöntemini kullandılar Otsu yönteminin görüntüde gürültü yaratması ve çatlakların bağlantılarının kaybolmasına yol açan sorunları yüzünden başka bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada göstermektedir ki Otsu yöntemi ile elde edilen boyut bilgisi, eşik değerinin optimizasyonuna bağlı olarak istenilen değerlere yaklaşamamaktadır (Fujita ve Hamamoto, 2011).



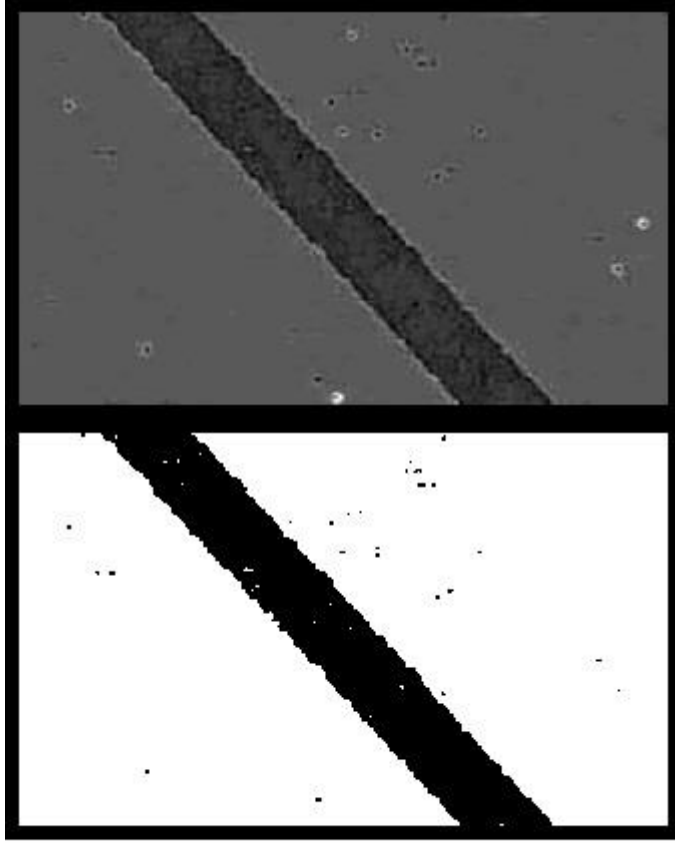
Resim 5.3. Otsu filtresi sonrası Bölge 1'in görüntüsü

Bölge 1'e Canny filtresi uygulandığında oluşan çıktı Resim 5.4'de gösterilmiştir. Uygunsuz bölgenin alanı 1664 mm^2 olarak hesaplanmıştır. Hatanın gerçek boyutlarıyla Canny filtresi ile elde edilmiş görüntü boyutlandırmasının oranı %104 olarak hesaplanmıştır.



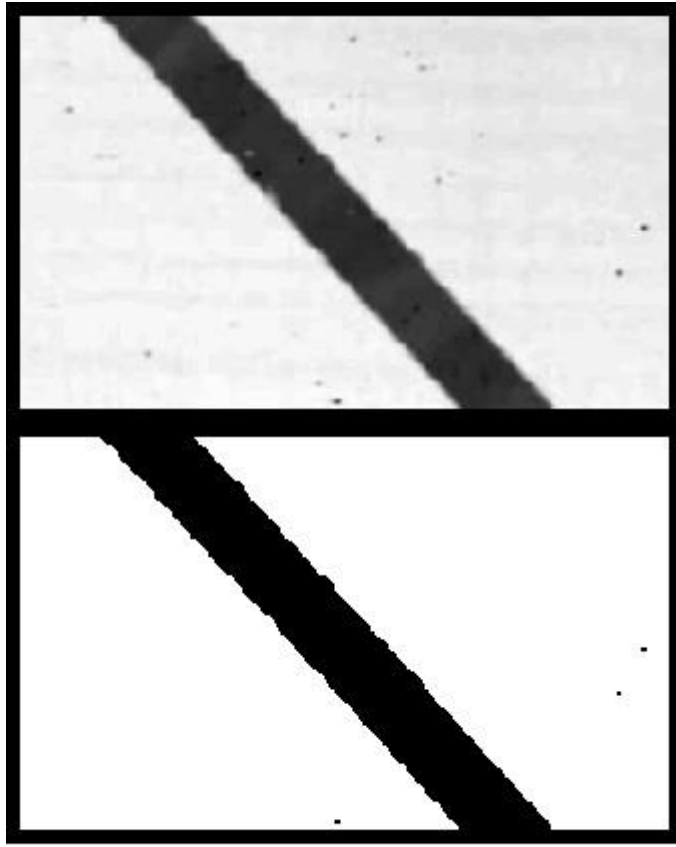
Resim 5.4. Canny filtresi sonrası Bölge 1'in görüntüsü

Bölge 2 ise Resim 5.5, Resim 5.6 ve Resim 5.7'de gösterildiği gibi 3 ayrı yöntem ile filtrelendikten sonra hesaplanan süreksizlik alanları görsellerin altında belirtilmiştir. Süreksizliğin olduğu alanın boyutu 11925 mm^2 'dir. Bölge 1'de yapılan çalışmaya benzer bir şekilde Canny kenar tespit algoritması ile gerçekleştirilen filtre sonrası yapılan ölçümler süreksizliğin gerçek boyutuna göre en yakın olan sonuçları vermiştir.



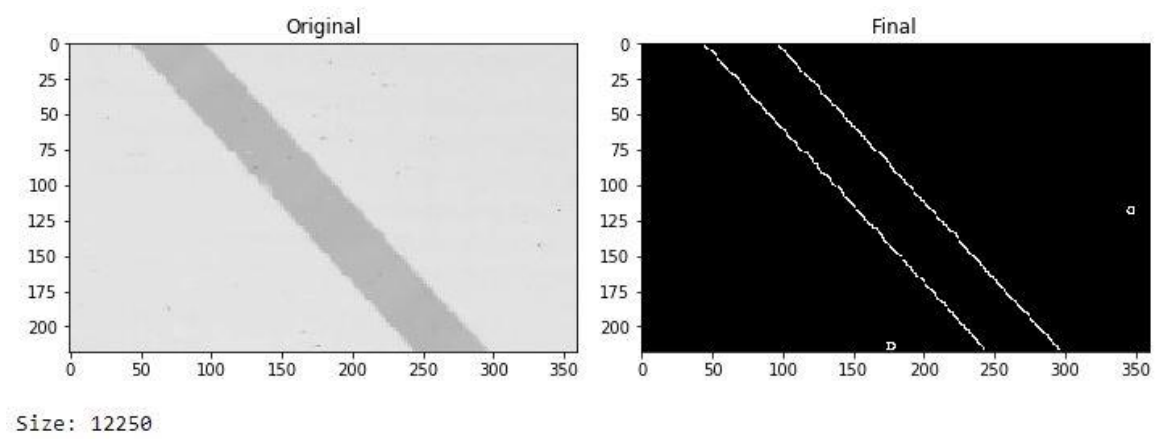
Size: 11285

Resim 5.5. Gabor filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü



Size: 11364

Resim 5.6. Otsu filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü

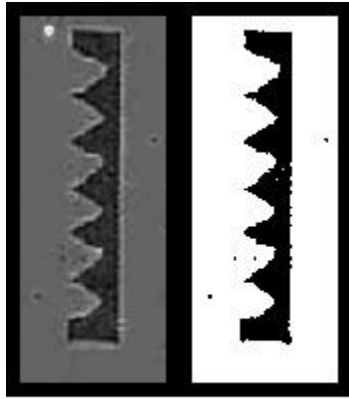


Size: 12250

Resim 5.7. Canny filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü

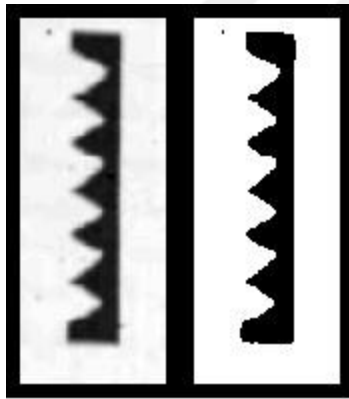
Bölge 3'te ise bölge 1 ve 2'ye kıyasla daha karmaşık bir alan seçilmiştir. Resim 5.8, Resim 5.9 ve Resim 5.19'da sırasıyla Gabor filtresi, Otsu filtresi ve Canny kenar tespit filtresi ile elde edilen görüntünün alan hesaplaması bulunmaktadır. Süreksizliğin alanı 3640 mm^2

olarak hesaplanmıştır fakat sahada karmaşık olan süreksizliğin alanı bölgesel hesaplama yerine hatayı içerecek bir dörtgen ile tanımlanmaktadır. Fakat yine de görüntü işleme yöntemleri ile birlikte karmaşık şekilli süreksizliklerin tam boyutunun verilmesi, görüntü üzerinden yorumlama yapacak olan kalite kontrol personeline yardımcı olacaktır.



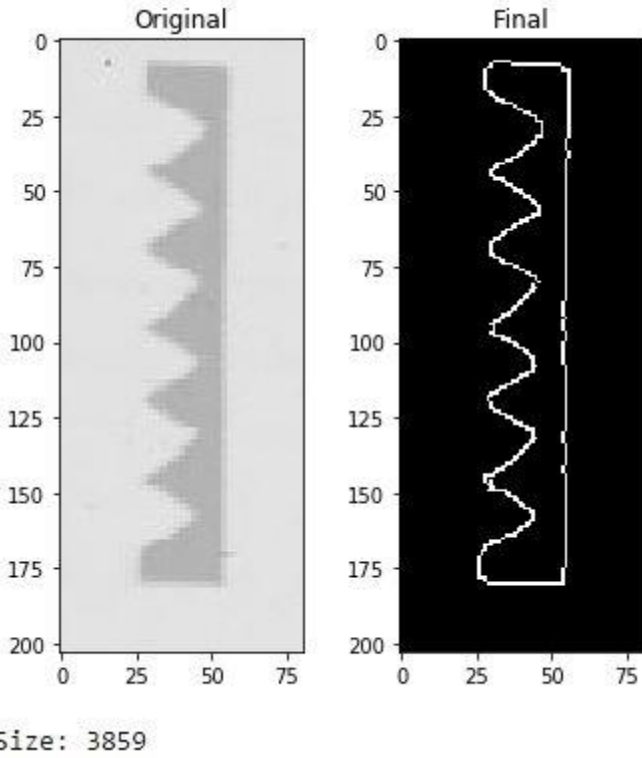
Size: 2917

Resim 5.8. Gabor filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü



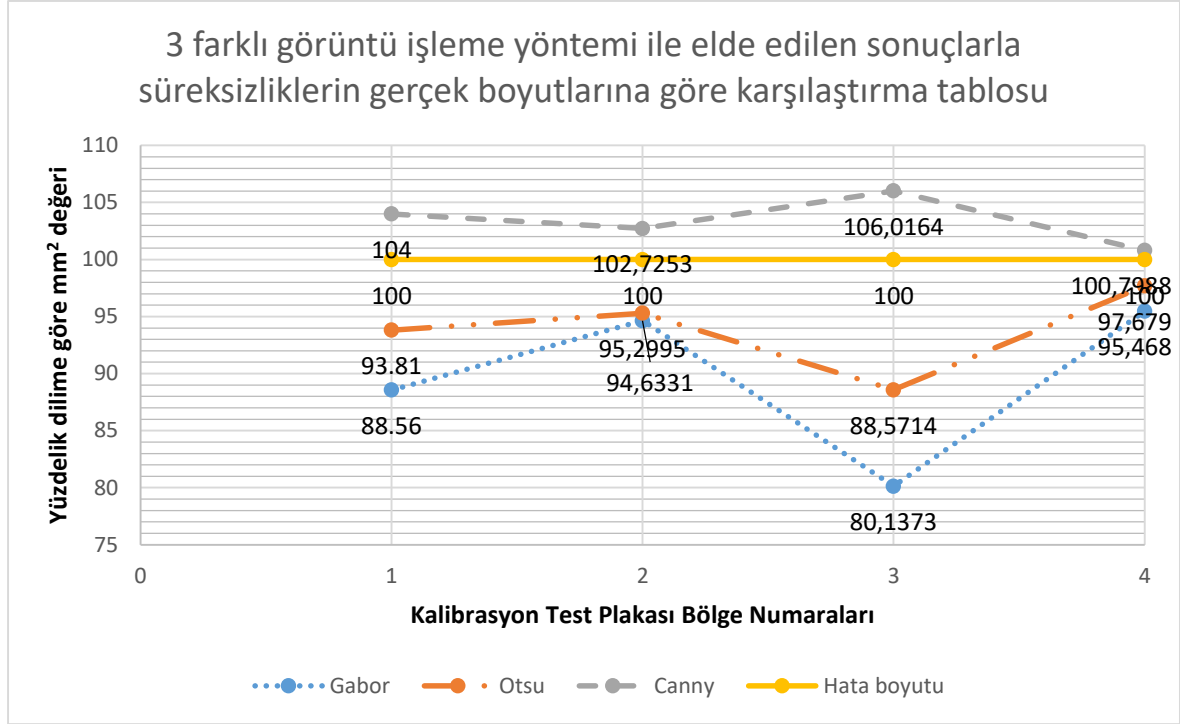
Size: 3224

Resim 5.9. Otsu filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü



Resim 5.10. Canny filtresi sonrası Bölge 2'nin görüntüsü

Şekil 5.1'de 3 farklı görüntü işleme yöntemi ile elde edilen sonuçlarla süreksizliklerin gerçek boyutlarına göre karşılaştırma görseli hazırlanmıştır. Bu görsele göre süreksizliğin boyutsal karmaşıklığı arttıkça geliştirilen uygulamanın doğruluk hassasiyeti düşmektedir. Fakat hem doğrusal hem de karmaşık hataların birlikte olduğu test görüntülerde, geliştirilen uygulama ile elde edilen toplam süreksizlik alanı ile gerçek hata boyutlarının kıyaslamasında Canny kenar tespit algoritması ile tespit edilen alan bilgisi en yakın sonuçları vermektedir. Çizelge 5.1'de 3 farklı görüntü işleme tekniğine göre yorumlanan hata boyutlarının yüzdesel yaklaşımları paylaşılmıştır.



Şekil 5.1. 3 farklı görüntü işleme yöntemi ile elde edilen sonuçlarla süreksizliklerin gerçek boyutlarına göre karşılaştırma tablosu

Çizelge 5.1. Görüntü işleme tekniklerine göre yorumlanan hata boyutlarının yüzdesel yaklaşımı

	Gabor filtresi	Otsu Eşikleme	Canny Kenar Tespit Algoritması	Hata boyutu
Bölge 1	88,56	93,81	104	100
Bölge 2	94,63312	95,2956	102,7254	100
Bölge 3	80,13736	88,57143	106,0165	100
Bölgelerin tamamı	95,46807	97,679	100,7989	100

Görüntü işleme yöntemlerinin, tahribatsız muayene alanında daha hızlı ve tutarlı sonuç alınmasına yardımcı olduğu bilinmektedir. (Fujita ve Hamamoto, 2011; Shan ve diğerleri, 2016). Bu tez kapsamında literatürde de sıkça kullanılmış olan Otsu eşikleme yöntemi, Gabor filtresi ve Canny kenar tespit algoritması karşılaştırılmıştır. Fujita ve Hamamoto, gürültülü beton yüzey görüntülerinden otomatik çatlak algılama amacıyla geliştirdikleri yöntem ile Otsu yöntemini karşılaştırmışlardır. Geliştirdikleri yöntemin Otsu yönteminden daha yüksek doğrulukla çatlakları tespit edebildiğini göstermişlerdir (Fujita ve Hamamoto, 2011). Bir başka çalışmada ise; Shan, Zheng ve Ou, malzeme üzerindeki çatlak görüntülerini Canny-Zernike algoritmasını kullanarak görselleştirmiştir ve konumlarını belirlemişlerdir. Önerdikleri deneysel sonuçlara göre kumpas yardımıyla alınan çatlak

boyutları ile geliştirilen uygulamanın verdiği sonuçların 0.02 subpixel koordinat doğruluğuna sahip olduğu belirlenmiştir (Shan ve diğerleri, 2016). Canny kenar tespit algoritması ile elde edilen görüntünün süreksizlik boyutlandırması için kullanılabileceği farklı çalışmalarda görülmüştür. Shapiro ve Stockman'ın 2001 yılında yaptığı çalışmaya paralel olarak, bu çalışma kapsamında da gösterilmektedir ki, “Canny kenar tespit algoritması, eski bir algoritma olmasına rağmen, oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu algoritmanın günümüzde hala en çok kullanılan yöntemlerden biri olduğu görülmektedir” (Shapiro ve Stockman, 2001).



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Görüntü işleme teknikleri ve tahribatsız muayene tekniklerinin birlikte çalıştığı uygulamaların gün geçtikçe daha fazla kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların hem görüntü işleme tekniklerindeki gelişmeler, hem de tahribatsız muayene teknolojisinin gelişmesi ile birlikte havacılık sektöründe yer edinmiş sorunlara çözüm olabileceği görülmüştür.

Havacılık sektöründe tahribatsız muayene süreçleri, yüksek teknolojiye tezgahlar ve robotların devreye girmesi ile birlikte hızlanmıştır. Fakat teknolojinin ilerleyişine bağlı olarak elde edilen süreç ve hız kazanç, beraberinde risk de getirmektedir. Risklerin kaynağı ise, yüksek teknolojiye tezgah ve robotların tahribatsız muayene sonrası elde ettiği sonuçlar ile kalite kontrolörün manuel olarak elde ettiği süreksizlik boyutlarının tutarsız olma olasılığıdır. Diğer yandan, kalite kontrolör her ne kadar standartlarla belirlenmiş sınavları başarı ile geçerek elde ettikleri sertifika ile birlikte süreksizlik tespitinde karar vermeye yetkili olsalar dahi, karar verme aşamasında bilgi, eğitim ve tecrübe eksikliğine veya insani hataların getireceği sonuçlarla bağlı olarak yanlış kararlar alabilmektedir. Bunun önüne geçilmesi adına kalite kontrolörü destekleyici uygulamaların geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Bu kapsamda, Lins ve Givigi, tahribatsız muayene yöntemleri ile elde edilen görüntüleri, görüntü işleme yöntemlerini kullanarak süreksizlik boyutlarının daha hızlı şekilde belirlenmesini sağlamışlardır. Aynı zamanda elde edilen süreksizlik boyutlarının belirlenmesi için kalite kontrolörlerin ilave bir iş yapmasına gerek olmaksızın sonucu alabilmeleri sağlanmıştır (Lins ve Givigi, 2016). Pereira ve Pereira ise tahribatsız muayene ile elde edilen görüntülerin geliştirdikleri algoritma ile birlikte yapılan analiz sonuçları için geçen sürenin önemli derecede daha az olduğunu tespit etmişlerdir (Pereira ve Pereira, 2015). Dong, Taylor ve Cootes, tahribatsız muayene görüntülerindeki kaynağın doğru bir şekilde sınıflandırıldığını ve hatalı kaynak görüntülerinden % 83'ünde kusurun doğru bir şekilde tespit edildiğini ortaya çıkarmıştır. Bu çalışma ile önerilen sistemin, kalite kontrolörlerin iş yüklerini azalttığı görülmektedir (Dong ve diğerleri, 2018).

Bu tezde, havacılıkta kullanılan karbon fiber test malzemelerin görüntü işleme teknikleri aracılığı ile geliştirilen uygulamayla birlikte tahribatsız muayene yapacak olan personele

destekleyici bir çalışma olması hedeflenmiştir. Tahribatsız muayene yapan personel tezgâh aracılığı ile muayene yaptığında tespit ettiği hatanın boyutlandırması için tezgahın verdiği görüntü üzerinden boyutlandırma yapmakta zorluk yaşamaktadır ve parça üzerinde manuel boyutlandırma yapmak zorundadır. Bu çalışma ile birlikte süreksizliklerin boyutlandırması hesaplamak istenen görüntü, uygulamaya girdi olarak sağlanmaktadır. Geliştirilen uygulamanın malzeme içerisindeki süreksizliklerin boyutlandırılması için harcadığı zaman, kalite kontrolörün yorumlama yapma süresine göre önemli derecede kısa olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kalibrasyon test plakası üzerindeki boyutu bilinen alanlar ile geliştirilen uygulama sonrası üç farklı görüntü işleme yöntemine göre hesaplanan alanlar kıyaslanmış, gerçek hata boyutları sabit olarak belirlenmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçların gerçek hata boyutlarına oransal yakınlığı ile karşılaştırıldığında Canny kenar tespit algoritması ile geliştirilen uygulamanın hata boyutlarına en yakın sonuçları verdiği gözlenmiştir.

Geliştirilen uygulama; görüntü işleme yöntemlerinin desteği ve tahribatsız muayene alanındaki teknolojinin gelişimi ile birlikte, parça muayene ve yorumlama hızını arttırdığı gibi kalite kontrolörü desteklemektedir. Bununla birlikte ileri teknoloji tezgahlarının elde ettiği görüntülerin, Canny kenar tespit algoritması ile destekli süreksizlik boyut hesaplaması yapan uygulama ile kalite kontrolöre hızlı bir geri bildirim verilmesi sağlanmıştır. Bu kazanç ile birlikte, havacılık sektöründe hizmet veren firmaların üretimi kesintisiz şekilde sürebilmektedir. Buna bağlı olarak, üretim maliyetleri düşmekte ve kalite hedeflerinin karşılanması sağlanmaktadır.

Bu çalışmaya ilave olarak gelecekte belirtilen üç görüntü işleme tekniği dışında daha farklı algoritmalar ile yapılan süreçler değerlendirilebilir ve bu uygulamaların kullanımı sonucu ortaya çıkacak bilimsel verilerin tahribatsız muayene sektörü için faydalı olabileceği önerilmektedir.

Yapılan çalışma göz önünde bulundurularak görüntü işleme tekniklerinin yapay zeka karar yapısı ile destekli uygulamalar geliştirilerek tahribatsız muayene görüntülerinin süreksizliklerinin belirlenmesinde, kategorize edilmesinde ve test yapan personelin muayenesinde destekleyici bir unsur oluşturabilir. Bu çalışmanın amaç ve hedeflerine paralel

olarak görüntü işleme kütüphanelerindeki gelişimler tahribatsız muayene dışında havacılıkta kullanılan testlerde kullanılabilir bir hale gelecektir.





KAYNAKLAR

1. Murgatroyd, R. A., Worrall, G. M., and Crutzen, S. (1995). Lessons learned from the PISC III study of the influence on human factors on inspection reliability. *International working group on life management of nuclear power plants*, 2, 65-69.
2. Mohan, A., and Poobal, S. (2018). Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 787-798.
3. X. Dong, C. J. Taylor and T. F. Cootes (2018), "Automatic Inspection of Aerospace Welds Using X-Ray Images," 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Beijing, China, 2002-2007.
4. İnternet: Anders Karlsson, (2003). "Classification of high resolution satellite images". Web: http://infoscience.epfl.ch/record/63248/files/TPD_Karlsson.pdf Erişim Tarihi: 12 Kasım 2021.
5. Soliman, O. S., and Mahmoud, A. S. (2012). A classification system for remote sensing satellite images using support vector machine with non-linear kernel functions. *In 2012 8th International Conference on Informatics and Systems*, 181-187.
6. Patil, A. B., and Shaikh, J. A. (2016). OTSU thresholding method for flower image segmentation. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, 6(5), 1-6.
7. Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1), 62-66.
8. Gonzalez, R. C., and Woods, R. E. (2018). *Digital image processing*. New York: Pearson.
9. Neeraja, C., and Reddy, D. G. (2016). A New iterative otsu thresholding technique in image segmentation and performance analysis. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research* , 5(5), 944-948.
10. İnternet: Derpanis, K. G. (2007). Gabor filter. York University. Web: http://www.cse.yorku.ca/~kosta/CompVis_Notes/gabor_filters.pdf Erişim Tarihi: 11 Ocak 2022.
11. Olisa, O., Iloanusi, O., Chijindu, V., and Ahaneku, M. (2018). Edge detection in images using Haar wavelets, Sobel, Gabor and Laplacian filters. *International Journal of Science Research*, 7, 46-49.
12. İnternet: Shah, A. (2018). Through The Eyes of Gabor Filter. Web: https://medium.com/@anuj_shah/through-the-eyes-of-gabor-filter-17d1fdb3ac97 Erişim Tarihi: 18 Ocak 2021.

13. Baykara, M., ve Ergen, B. (2011). Medikal görüntüler için sinyal işleme metotlarını kullanan içerik tabanlı bir görüntü erişim sistemi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 87-91.
14. Shapiro, L. G., and Stockman, G. C. (2001). *Computer Vision* (Vol 3). New Jersey: Prentice Hall, 326.
15. İnternet: Sahir, S. (2019). Canny edge detection step by step in Python. *Computer Vision*. Web: <https://towardsdatascience.com/canny-edge-detection-step-by-step-in-python-computervision-b49c3a2d8123> Erişim Tarihi: 13 Ekim 2022.
16. Ege, U., ve Ulutaş, B. H. (2022). Görsel muayenede arama ve karar verme sürecini değerlendirmeye yönelik yeni bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(3), 1535-1552.
17. Lu, Y. (2010). *Non-Destructive Evaluation On Concrete Materials And Structures Using Cement-Based Piezoelectric Sensor*. Hong Kong University of Science and Technology: Hong Kong, China.
18. Garney, G. (2006). *Defects Found Through Non-Destructive Testing Methods Of Fiber Reinforced Polymeric Composites*. California State University: Long Beach, CA, USA.
19. Warnemuende, K. (2006). *Amplitude modulated acousto-ultrasonic non-destructive testing: Damage evaluation in concrete*. Doktora Tezi, Wayne State University, Michigan.
20. İnternet: Gür, H. (2013). Tahribatsız Muayene Personelinin Eğitimi ve Belgelendirilmesi, *TURK-NDT Bilgi Dokümanı*. Web: http://ndt.wtndt.metu.edu.tr/system/files/duyuru/turkndt-bd001_ekim_2013_rev03.pdf Erişim Tarihi: 20.11.2022.
21. İnternet: Mosley, R. (2005). The use of predictive modeling in the insurance industry, *Pinnacle Actuarial Resources*. Web: <http://www.pinnacleactuaries.com/files/publications/mon-pinnaclejan2005predictivemodeling.pdf> Erişim Tarihi: 11.10.2018.
22. Gonzalez, R. C., and R. E. Woods. (2001). *Digital image processing*. (Vol 2). New Jersey: Prentice Hall.
23. Campisi, P., and Egiazarian, K. (Eds.). (2017). *Blind Image Deconvolution: Theory And Applications*. CRC press.
24. Talab, A. M. A., Huang, Z., Xi, F., and HaiMing, L. (2016). Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques. *Optik*, 127(3), 1030-1033.

25. Gunkel, C., Stepper, A., Müller, A. C., and Müller, C. H. (2012). Micro crack detection with Dijkstra's shortest path algorithm. *Machine Vision and Applications*, 23(3), 589-601.
26. Fujita, Y., and Hamamoto, Y. (2011). A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces. *Machine Vision and Applications*, 22(2), 245-254.
27. Shan, B., Zheng, S., and Ou, J. (2016). A stereovision-based crack width detection approach for concrete surface assessment. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(2), 803-812.
28. Yang, Y. S., Yang, C. M., and Huang, C. W. (2015). Thin crack observation in a reinforced concrete bridge pier test using image processing and analysis. *Advances in Engineering Software*, 83, 99-108.
29. Lins, R. G., and Givigi, S. N. (2016). Automatic crack detection and measurement based on image analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(3), 583-590.
30. Wang, P., and Huang, H. (2010). Comparison analysis on present image-based crack detection methods in concrete structures. *In 3rd International Congress On Image And Signal Processing* (5) 2530-2533.
31. Gunkel, C., Stepper, A., Müller, A. C., and Müller, C. H. (2012). Micro crack detection with Dijkstra's shortest path algorithm. *Machine Vision and Applications*, 23(3), 589-601.
32. Pascale, G., and Lolli, A. (2015). Crack assessment in marble sculptures using ultrasonic measurements: Laboratory tests and application on the statue of David by Michelangelo. *Journal of Cultural Heritage*, 16(6), 813-821.
33. Shirahata, H., Miki, C., Yamaguchi, R., Kinoshita, K., and Yaginuma, Y. (2014). Fatigue crack detection by the use of ultrasonic echo height change with crack tip opening. *Welding in the World*, 58(5), 681-690.
34. Merazi-Meksen, T., Boudraa, M., and Boudraa, B. (2014). Mathematical morphology for TOFD image analysis and automatic crack detection. *Ultrasonics*, 54(6), 1642-1648.
35. Pereira, F. C., and Pereira, C. E. (2015). Embedded image processing systems for automatic recognition of cracks using UAVs. *Ifac-PapersOnline*, 48(10), 16-21.
36. Heida, Jaap H., and Derk J. Platenkamp (2011). "Evaluation of non-destructive inspection methods for composite aerospace structures." *International Workshop of NDT Experts*. (10). 1-12

37. Broughton, W. R., Lodeiro, M. J., Sims, G. D., Zeqiri, B., Hodnett, M., Smith, R. A., and Jones, L. D. (1999). *Standardised procedures for ultrasonic inspection of polymer matrix composites*. In ICCM 12th Conf. Composite Mater. CD-ROM.
38. Hasiotis, T., Badogiannis, E., and Tsouvalis, N. G. (2011). Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials. *Strojniški vestnik- Journal of Mechanical Engineering*, 57(3), 192-203.
39. Hong, M., Su, Z., Wang, Q., Cheng, L., and Qing, X. (2014). Modeling nonlinearities of ultrasonic waves for fatigue damage characterization: Theory, simulation, and experimental validation. *Ultrasonics*, 54(3), 770-778.
40. Poguët, J., Marguet, J., Pichonnat, F., and Chupin, L. (2002). Phased array technology: Concepts, probes and applications. *Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, 7(5), 1-6.
41. İnternet: IFR, (2021). Executive Summary World Robotics 2021 Industrial Robots. Web: https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf Erişim Tarihi: 01.06.2022.
42. İnternet: Tecnatom, (2022). Web: <http://tecnatom-ndt.com/> Erişim Tarihi: 2 Mayıs 2022.
43. İnternet: Olympus, (2021). Web: <https://www.olympus-ims.com/en/> Erişim Tarihi: 21 Aralık 2021.
44. İnternet: Anshul, T. (2022). An EE World Online Resource - Engineers Garage. Web: <https://www.engineersgarage.com/ultrasonic-uv-sensors-or-ultrasound-sensors/> Erişim Tarihi: 15 Haziran 2022.
45. Oflaz, İ., ve Karadeniz, E. (2006). Tahribatsız muayene yöntemleri ile çelik boru kaynak hatlarının incelenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 5(2), 82-92
46. Glud, J. A., Dulieu-Barton, J. M., Thomsen, O. T., and Overgaard, L. C. T. (2017). Fatigue damage evolution in GFRP laminates with constrained off-axis plies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 359-369.
47. Lamarre, A. (2017). Improved inspection of composite wind turbine blades with accessible advanced ultrasonic phased array technology. *15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT2017)*, 1-8.
48. İnternet: Serabian, M. (2019). PQNDT Salary Survey 2019. Web: <https://www.pqndt.com/wp-content/uploads/2020/06/PQNDT-Salary-Survey-Results-2019-Final.pdf> Erişim Tarihi: 15 Kasım 2020.

49. İnternet: ISO 9712: 2012, (2012). Non-destructive testing – Qualification and certification of personnel. Web: <https://www.iso.org/standard/57037.html> Erişim Tarihi: 19 Ocak 2019.
50. Daugman, J. G. (1988). Complete discrete 2-D Gabor transforms by neural networks for image analysis and compression. *IEEE Transactions On Acoustics, Speech, And Signal Processing*, 36(7), 1169-1179.
51. Gabor, D. (1946). Theory of communication. Part 1: The analysis of information. *Journal Of The Institution Of Electrical Engineers-Part III: Radio And Communication Engineering*, 93(26), 429-441.
52. Korkmaz, Ö. E. (2010). *Uçaklarda Kullanılan Alüminyum Malzemelerdeki Korozyonun İncelenmesi, Önlenmesi Ve Tahribatsız Muayene İle Tespiti*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
53. Demir, F. Z. (2019). *Uçak Bakım Merkezi Atık Yönetimi*, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
54. Kaba, S. (2009). *Doğalgaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Birleştirmelerin Radyografik muayenesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
55. İnternet: Acuren, (2022). Phased Array Services. Web: <https://www.acuren.com/inspection/advanced-nde-ndt/phased-array/> Erişim Tarihi: 21 Kasım 2022.
56. Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6), 679-698.
57. İnternet: Jupyter. Web: <https://jupyter.org/about> Erişim Tarihi: 22 Kasım 2022.
58. Özkan, İ., ve Ülker, E. (2017). Derin öğrenme ve görüntü analizinde kullanılan derin öğrenme modelleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6(3), 85-104.
59. Krautkrämer, J., and Krautkrämer, H. (2013). *Ultrasonic testing of materials*. Springer Science & Business Media.





Gazili olmak ayrıcalıktır