



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BİR HAVA ARACI ÇEKER KANCASININ
HASAR ANALİZİ**

Ömer KURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı

**Mayıs 2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır.**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer KURT tarafından hazırlanan “Bir Hava Aracı Çeker Kancasının Hasar Analizi” adlı tez çalışması 17/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. Mesut UYANER

.....

Üye

Doç. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali GÜVENÇ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Çalışma kapsamında yer alan tüm görüşlerin bireysel görüşlerim olduğunu ve bu görüşlerin Türk Silahlı Kuvvetlerinin görüşlerini yansıtmadığımı bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

I hereby declare that all the opinions contained within the scope of the study are my individual opinions and that these opinions do not reflect the opinions of the Turkish Armed Forces.

Ömer KURT

Tarih: 09/05/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR HAVA ARACI ÇEKER KANCASININ HASAR ANALİZİ

Ömer KURT

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mesut UYANER

2025, 65 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mesut UYANER
Doç. Dr. Mehmet Emin ÇETİN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali GÜVENÇ

Tahribatsız muayene malzemeleri hasara uğratmadan incelemeye olanak veren bir yöntemdir. Bir hava aracı çeker kancasının bazı tahribatsız muayene yöntemleri ile analizi yapılmıştır. Söz konusu malzeme Manyetik Parçacık Testi (MPT), Ultrasonik Test (UT), Sıvı Penetrant Testi (PT), Radyografik Test (RT), Girdap Akımı (Eddy Current) Testi (ECT) olmak üzere toplam 5 (beş) adet teste tabi tutulmuştur. Testlerden alınan sonuçlar ayrı ayrı incelenmiştir. AISI 4130 Alaşımli Çeliğinden üretilen hava aracı çeker kancasının hasar analizine göre en iyi tahribatsız muayene yöntemi seçilmiştir. Çeker kancanın boş ve dolu uçak çekme senaryolarındaki gerilme analizi Sonlu Elemanlar Yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Eş değer gerilme dağılımları sonuçları ile tespit edilen hasar bölgesi uyumlu çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eşdeğer gerilme, Girdap akımı testi, Hava aracı çeker kancası, Manyetik parçacık testi, Radyografik test, Sıvı penetrant testi, Sonlu elemanlar yöntemi, Tahribatsız muayene, Ultrasonik test.

ABSTRACT

MS THESIS

DAMAGE ANALYSIS OF AN AIRCRAFT TOW HOOK

Ömer KURT

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN AERONAUTICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Mesut UYANER

2025, 65 Pages

Jury

Prof. Dr. Mesut UYANER

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Asst. Prof. Dr. Mehmet Ali GÜVENÇ

Non-destructive testing is a method that allows examining materials without damaging them. An aircraft tow hook was analyzed using some non-destructive testing methods. The material in question was subjected to a total of 5 (five) tests, including Magnetic Particle Testing (MPT), Ultrasonic Testing (UT), Liquid Penetrant Testing (PT), Radiographic Testing (RT), Eddy Current Testing (ECT). The results from the tests were examined separately. According to the damage analysis of the aircraft tow hook made of AISI 4130 Alloy Steel, the best non-destructive testing method was selected. The stress analysis of the tow hook in empty and loaded aircraft towing scenarios was performed using the Finite Element Method. The identified damage region was found to be consistent with the equivalent stress distribution results.

Keywords: Aircraft tow hook, Eddy current testing, Equivalent stress, Finite Element Method, Liquid penetrant testing, Magnetic particle testing, Non-destructive testing, Radiographic test, Ultrasonic test.

ÖNSÖZ

Günümüzde pek çok malzeme fabrikasyon olarak üretilip çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Malzemelerin sadece üretilip sonrasında kullanılması neticesinde korozyon, sıcaklık, basınç gibi etkilerden kaynaklı malzeme üzerinde zamana bağlı olarak değişimlerin varlığı bilinmektedir.

Söz konusu değişimlerin malzeme üzerinde yarattığı stresten ötürü istenmeyen sonuçların oluşmasını önlemek amacıyla ve aynı zamanda ilgili parçaya da zarar vermeden kontrol edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Havacılık anlamında da çok titiz yürütülen tüm faaliyetlerde kontrol aşamaları daha da önem arz etmektedir. Tüm incelikleriyle yürütülen havacılık faaliyetlerinde malzeme kontrolü de önemli bir yer tutmaktadır.

Tez içerisinde ele alınan malzeme ve yapılan incelemeler neticesinde elde edilen sonuçların, bilgi aktarımının gelecek zamanlarda konu ile ilgili yapılacak inceleme ve çalışmalara da ışık tutarak referans oluşturması arzu edilmektedir.

Ömer KURT
KONYA-2025

TEŐEKKÖRLER

Bu çalıőmanın fikir aőamasından son aőamasına kadar yardım, zaman ve desteklerini esirgemeyen, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım, sayın Prof. Dr. Mesut UYANER'e sonsuz teőekkür ederim.

Ayrıca hayat arkadaőım ve motive olma sebebim olarak bu tezin yazımında her zaman yanımda olan, ilham kaynağım, desteğini her daim hissettiğim Aybűke KURT'a teőekkürü borç bilirim.

Öğrenciliğimin ilk yıllarından itibaren beni her zaman destekleyen, kendi ıőıđıyla bana ışık olan, hayat yolunda elimi asla bırakmayan başta annem Havva KURT olmak üzere babam Nazmi KURT ve ailemin diğer üyeleri tez çalıőmam sürecinde sonsuz sevgi ve motivasyonla destek olmuőlardır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
TEŞEKKÜRLER.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER.....	xi
TABLolar.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Hava Aracının Çekilmesi.....	1
1.2. Çeki Kancası.....	1
1.3. Tahribatsız Muayene.....	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. İncelemesi Yapılan ve Havacılık Alanında Yaygın Kullanılan Bazı Tahribatsız Muayene Yöntemleri	4
2.1.1. Manyetik Parçacık Testi	4
2.1.2. Ultrasonik Test (UT).....	6
2.1.3. Sıvı Penetrant Testi (PT).....	7
2.1.4. Radyografik Test (RT).....	9
2.1.5. Girdap Akımı (Eddy Current) Testi (ECT).....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Malzeme ve Özellikleri.....	13
3.1.1. Malzeme Üzerinde Bulunan Pim/Perno	15
3.1.2. Emniyet Katsayısı	16
3.2. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Girdap Akımı (Eddy Current) Testi.....	17
3.3. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Ultrasonik Test	19
3.4. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Radyografik Test	21
3.5. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Sıvı Penetrant Testi.....	22
3.6. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Manyetik Parçacık Testi	27
3.7. Analiz Çalışması	30
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	33
4.1. Girdap Akımı (Eddy Current) Testinin Araştırma Sonucu.....	33

4.2. Ultrasonik Testin Araştırma Sonucu.....	34
4.3. Radyografik Testin Araştırma Sonucu	35
4.4. Sıvı Penetrant Testin Araştırma Sonucu.....	37
4.5. Manyetik Parçacık Testin Araştırma Sonucu	39
4.6. Analiz Sonuçları	40
4.6.1. Hesaplamaya Dayalı Analiz Sonuçları	40
4.6.2. Malzeme Üzerinde Bulunan Pim Kısmının Analiz Sonuçları	43
4.6.3. ANSYS Analiz Programına Dayalı Analiz Sonuçları	44
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
5.1. Sonuçlar	48
5.2. Öneriler	48
6. KAYNAKLAR.....	50



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

kV:	Kilovolt
Hz:	Hertz
MHz:	Megahertz
sn:	Saniye
A:	Amper
mA:	Miliamper
F:	Çekme Kuvveti
μ :	Sürtünme Katsayısı
m:	Kütle
g:	Yerçekimi İvmesi
N:	Newton
kN:	Kilonewton
kg:	Kilogram
s:	Saniye
m/s^2 :	Metre/saniye ²
Cos:	Kosinüs
MPa:	Megapaskal
mm:	Milimetre
mm^2 :	Milimetrekare

Kısaltmalar

YAMAHA:	Yabancı Madde Hasarı
FOD:	Foreign Object Damage
NDI:	Non-Destructive Inspection/Tahribatsız Muayene
NDT:	Non-Destructive Testing/Tahribatsız Muayene Testi
DC:	Direct Current/Doğru Akım
UV:	Ultraviyole Işık
UV-A:	Ultraviyole A Işık
ECT:	Girdap Akımı Testi
UT:	Ultrasonik test
RT:	Radyografik Test
MPT:	Manyetik Parçacık Testi
PT:	Penetrant Test
SF:	Safety Factor
AISI:	American Iron and Steel Institute-Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Hava aracının çekimini yapan araçlar	1
Şekil 1.2. Hava aracı çeker kancası	2
Şekil 2.1. Manyetik kuvvet hatları.....	4
Şekil 2.2. Süreksizliğin tespitinde kullanılan testin çalışma prensibi.....	5
Şekil 2.3. Manyetik parçacık testi yapılan malzemede tespit edilen çatlaklar	5
Şekil 2.4. Ultrasonik test çalışması.....	6
Şekil 2.5. Ultrasonik test çalışma prensibi	7
Şekil 2.6. Sıvı Penetrant sıvısının kullanım şekli ve çatlakların görüntüsü	8
Şekil 2.7. Sabit penetrant test sistem donanımı	8
Şekil 2.8. Elektromanyetik spektrum	9
Şekil 2.9. Radyografik test çalışması.....	10
Şekil 2.10. Girdap akım testi uygulanan bir malzeme örneği	12
Şekil 3.1. Test edilen hava aracı çeker kancası ve AISI 4130 alaşımlı çelik	13
Şekil 3.2. Girdap Akımı (Eddy Current) test cihazı	17
Şekil 3.3. Kalibre bloğu ile kalibresi yapılan Girdap Akımı (Eddy Current) test cihazı	18
Şekil 3.4. Girdap Akımı (Eddy Current) testi yapılan uçak çeker kancası.....	19
Şekil 3.5. Ultrasonik test cihazı	20
Şekil 3.6. Ultrasonik test yapılan uçak çeker kancası.....	20
Şekil 3.7. Radyografik test cihazı	21
Şekil 3.8. Çeker kancasının radyografi test cihazı ile çekimi sonrası film görüntüsü....	22
Şekil 3.9. Sıvı penetrant test için malzemenin süzgeçlenmesi	22
Şekil 3.10. Penetrant sıvısı ve havuzu	23
Şekil 3.11. Sıvı penetrant havuzundan çıkarılan ve süzölmeye bırakılan malzeme.....	23
Şekil 3.12. Sıvı penetrant test donanımına ait emulsifier havuzu.....	24
Şekil 3.13. Yıkama öncesi penetrant sıvısı ile kaplı olan malzeme	24
Şekil 3.14. Yıkama ünitesinde yıkamaması yapılan malzeme	25
Şekil 3.15. Developer sıvı havuzu	25
Şekil 3.16. Kurutma istasyonu.....	26
Şekil 3.17. Sıvı penetrant testi tamamlanan çeker kancası.....	26
Şekil 3.18. Manyetik parçacık test cihazı	27
Şekil 3.19. Malzemenin uygun şekilde yerleştirilmesi ve test sıvısı ile yıkanması.....	28
Şekil 3.20. Manyetik parçacık test sonrası inceleme yapılan ve süreksizliklerin göröldüğü malzeme.....	29
Şekil 3.21. Gaussmetre	30
Şekil 3.22. Çeker kancasının ağ (mesh) yapısı	31
Şekil 3.23. İnceleme konusu yapılan çeki kancasına ait çarpıklık değeri dağılımı	32
Şekil 4.1. Girdap akımı (Eddy current) testi yapılan malzeme	34
Şekil 4.2. Test sırasında cihazda görölen değeri.....	35
Şekil 4.3. Radyografik çekim.....	36
Şekil 4.4. Film görüntüsü	37
Şekil 4.5. Test sonrası takip edilen süreksizlikler	38
Şekil 4.6. Test sonrasında tespit edilen süreksizlik	39
Şekil 4.7. 0 derece açısı ile çekim	41
Şekil 4.8. 10 derece açısı ile çekim	41
Şekil 4.9. 20 derece açısı ile çekim	42
Şekil 4.10. Değişen açısıya bağılı olarak artan kuvvet.....	43

Şekil 4.11. İki yüzey tarafından kesilen pim	43
Şekil 4.12. Toplam deformasyon.....	45
Şekil 4.13. En büyük asal gerilme	46
Şekil 4.14. Eşdeğer von-Mises gerilmesi	47



TABLÖLAR

Tablo 3.1. AISI 4130 alaşımlı çeliğin kimyasal bileşimi.....	14
Tablo 3.2. AISI 4130 alaşımlı çeliğin fiziksel zellikleri	14
Tablo 3.3. AISI 4130 alaşımlı çeliğin mekanik zellikleri	14
Tablo 3.4. AISI 4130 alaşımlı çeliğin termal özelliği.....	14
Tablo 3.5. Pim ve pernoların özellik ve görevleri.....	15
Tablo 3.6. AISI 4330 alaşımlı çeliğin mekanik zellikleri	15
Tablo 3.7. Emniyet katsayısı değerleri ve anlamları.....	16
Tablo 3.8. Parametre değerleri	21
Tablo 4.1. Parametre değerleri	36



1. GİRİŞ

Günümüz havacılığı; faaliyetlerinin son derece arttığı bir zaman dilimini yaşamaktadır. Havacılık anlamında kullanılan pek çok hava aracı vardır. Bunlara örnek olarak; uçaklar, helikopterler, planörler, insansız hava araçları gibi adlandırabiliriz.

Bahse konu bir hava aracının uçuşu aslında sadece aracın havada geçirdiği süre olarak düşünülmemelidir. Hava aracının uçuş öncesindeki bakım faaliyetleri, sistemsel olarak faal edilmesi, hava aracının uçuşa verileceği bölgeye çekilmek suretiyle hazır hale getirilmesi, pilotunun hazırlıkları, pilotun uçuş öncesi kontrolleri, hava aracının kalkış yapacağı piste giderken yerde icra ettiği rulesi başlıca evreleri mevcuttur.

Ayrıca inişe takiben yukarıda bahsedilen evrelerin tam tersi işlem basamakları da yine aynı şekilde yürütülmektedir.

1.1. Hava Aracının Çekilmesi

Bir hava aracının çekim faaliyeti yerde uçuş öncesinde ya da uçuş sonrasında pilotsuz olarak hareket ettirilmesi olanağını sağlayan işlemdir. Şekil 1.1’de görüldüğü üzere hava aracına bir çeki kancası ve çeki demiri ile bağlanan çeker aracı, belirlenen uygun usul ve esaslarca görevini icra eder.



Şekil 1.1. Hava aracının çekimini yapan araçlar

1.2. Çeki Kancası

Hava aracı çekim faaliyetleri sadece herhangi bir araç ile icra edilememektedir. Söz konusu bu araçlar özel üretim ile ortaya çıkarılmış olup uygun motor gücüne, donanımlara sahip olmaktadır. Donanımlar kapsamında ekipman olarak en önemli sayabileceğimiz unsur Şekil 1.2’de görülen çeki kancasıdır. Çeki kancasının

uygun malzeme özelliğinde imal edilmesi, çekilen hava aracının kuvvetine bağlı olarak uygun kapasitede olmalıdır. Aksi takdirde istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Çekilen bir hava aracı esnasında çeker kancasının kopması, kırılması hava aracını kullanılamaz hale getirebilir. Ayrıca ufalanması ve ufalanan küçük malzemelerin uçuş hattı bölgesine düşmesi ise YAMAHA/FOD (Yabancı Madde Hasarı/Foreign Object Damage) meydana getirir. Bu istenmeyen durum da hava aracı ve pilot kaybına kadar gidebilir (Hussin et al., 2016; Masniza et al., 2019).

Kullanılan hava aracı çeker araçları ve çeki malzemeleri de periyodik olarak bakımlara girer. Bakımlarda ise kullanılan elemanların kontrolü yapılmaktadır. Gözle görülen ya da görülmeyen hasarların tespiti uçuş emniyeti açısından büyük önem arz etmektedir (Wenner & Drury, 2000).



Şekil 1.2. Hava aracı çeker kancası

1.3. Tahribatsız Muayene

İçinde bulunduğumuz yüzyılda kullanılan makine, teçhizat, araç ve gereçlerin oldukça komplike bir yapıya sahip olmaları bunun yanı sıra üretim ve bakım

maliyetlerinin yüksek düzeylere ulaşması, maksimum emniyet ve güvenilirliği sağlayacak imalat ve test usullerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Tahribatsız muayene (Non-Destructive Inspection/NDI) incelenen bir malzemeye yönelik hasarların tespit edilmesinde en maliyetsiz ve parçaya zarar vermeyen işlem yöntemleridir. Test edilen nesnenin kullanılabilirliğinden veya işlevselliğinden ödün vermeden inceleme ve değerlendirme yapılmasına olanak tanır (Shiotani et al., 2024).



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

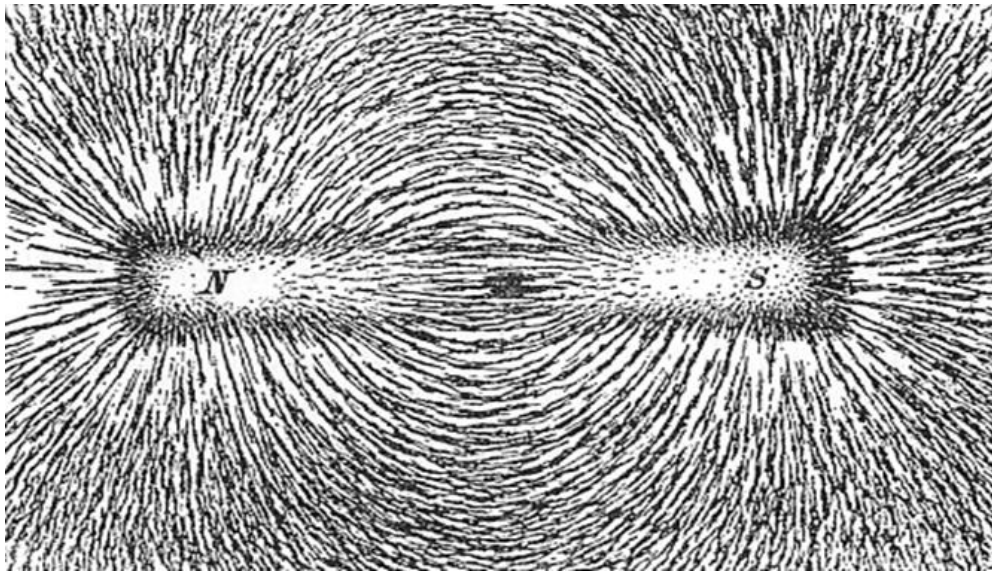
2.1. İncelemesi Yapılan ve Havacılık Alanında Yaygın Kullanılan Bazı Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Bugünün araç ve donanımlarının çok karışık yapıda ve yüksek maliyetli olması üst düzey seviyede güvenilirliği sağlayacak şekilde imalat, üretim ve servis (MRO Maintenance, Repair and Overhaul - Bakım, Onarım ve Revizyon) işlemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir.

Söz konusu araç ve donanımlarda kullanılan ısı ve basınca maruz kalan malzemenin yapısına zarar vermeden test etmek gerekliliği, Tahribatsız Muayene Testlerini (Non-Destructive Testing/NDT) yapmaya sevk eder. Bazı yaygın NDI tekniklerinin uygulandığı Tahribatsız Muayene Testleri (Non-Destructive Testing/NDT) mevcuttur. Bunlar; Manyetik Parçacık Testi (MPT), Ultrasonik Test (UT), Sıvı Penetrant Testi (PT), Radyografik Test (RT), Girdap Akımı (Eddy Current) Testidir (ECT).

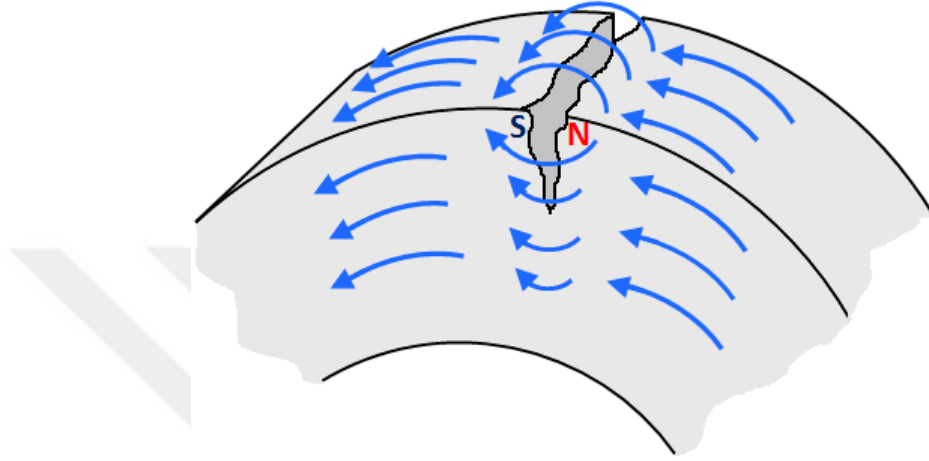
2.1.1. Manyetik Parçacık Testi

Ferromanyetik (mıknatıslanma özelliği olan) malzemelerdeki manyetik alan etkisine bakılarak süreksizliğin tespit edilmesi hedeflenmektedir. Demir, Nikel, Kobalt ve bunların alaşımları ferromanyetik malzemelere örnek teşkil eder.



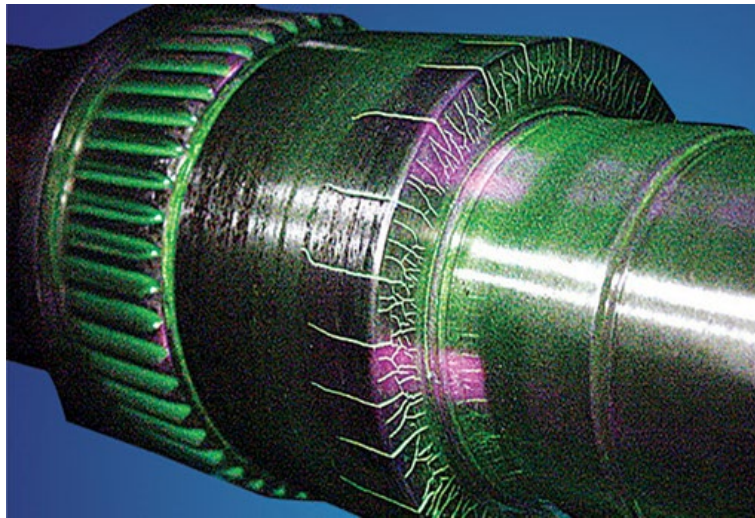
Şekil 2.1. Manyetik kuvvet hatları

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi bir parçada oluşan süreksizlik manyetik alan etkisiyle süreksizliğin olduğu bölgede de farklı bir kutuplanma (kaçak akı) oluşturur. Fakat bu kontrol için yeterli değildir. Test malzemesi manyetik doyum noktasına ulaştırılmalı ve verilecek amper oranı test parçasının geometrik şekline göre verilir. Bu şekilde süreksizlik tespit edilir.



Şekil 2.2. Süreksizliğin tespitinde kullanılan testin çalışma prensibi

Şekil 2.3’te görüldüğü gibi yüzey veya yüzeeye yakın kusurları (çatlaklar, korozyon gibi süreksizlikler) tanımlamak için manyetik alanlardan ve demir (gözle yada UV ışık altında görülebilen) parçacıklarından yararlanır (Wu et al., 2024).



Şekil 2.3. Manyetik parçacık testi yapılan malzemede tespit edilen çatlaklar

2.1.2. Ultrasonik Test (UT)

1960'lı yıllardan bu yana ultrasonik muayene yöntemi yüzey kırılmalarının ve iç hataların bulunmasında geniş bir kullanıma sahiptir. Ultrasonik muayenenin genel prensipleri TS EN ISO 16810 standardın ele alınmıştır. Bunun dışında tahribatsız muayeneler ilgili mamul standartlarına ve/veya teknik şartnamelere göre gerçekleştirilebilir (Sevim, M. A., Çelt, A. C., Kabar, S., & Akgünlü, 2020).

Dahili kusurları tespit etmek için yüksek frekanslı ses dalgalarını kullanır. İnsan kulağının duyamadığı 20000 Hz. üzeri ses dalgaları ultrasonik ses (titreşim) olarak adlandırılır. Malzemeye verilen ultrasonik titreşimler gönderilir. Ses titreşimlerinin geri yansımalarına göre malzeme yapısına yönelik tanımlanma ve yorumlanma yapılır.

Malzemelerin kalınlığı ölçmek, yoğunluk ve esneklik gibi malzeme özelliklerini değerlendirerek hasar tespit edilmeye çalışılır (Jodhani et al., 2023). Normal problarda ses dalgaları muayene parçası yüzeyine dik olarak gelirler. Muayene sırasında sesin muayene edilecek parçaya daha iyi iletimini sağlamak amacıyla prob ile muayene yüzeyi arasında bir temas sıvısı kullanılır (Kılıc, 2019).

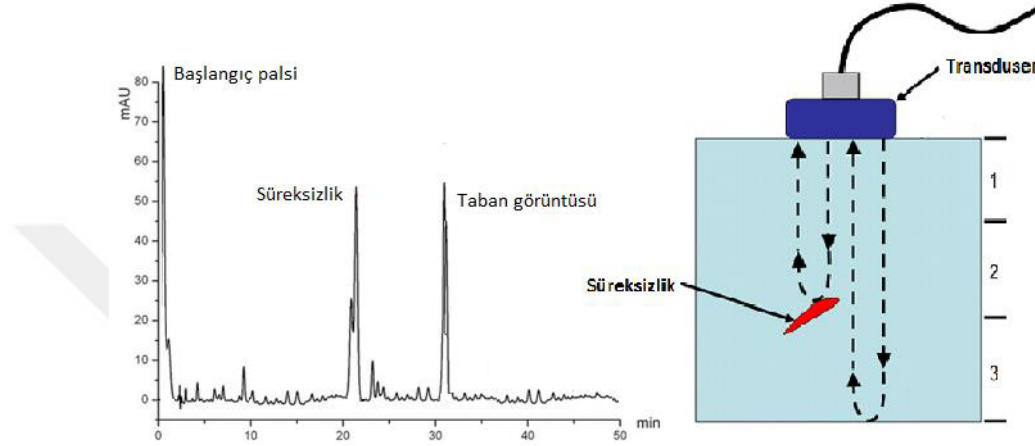
Şekil 2.4'te de gösterildiği şekilde test edilecek malzemenin üzerine transdüserin kolay hareket ettirilmesi ve doğru bir sonuç alınması için kuplaj sıvısı (gliserin vb.) kullanılır. Kuplaj sıvısının kullanım amacı ise ultrasonik sesin havada yayılmamasından dolayı transdüser ile test parçası arasındaki havayı elimine etmeyi amaçlar. Takiben malzeme üzerinde transdüser gezdirilerek test işlemi yapılır.



Şekil 2.4. Ultrasonik test çalışması

Başka bir deyişle ultrasonik test ölçümleri gözeneklilik ve çatlama gibi mikro yapı ve fiziksel kusurlar hakkında bilgi edindirme yeteneğine sahiptir (Smoqi et al., 2023).

Süreksizlik tespit edilme yönteminde etkilidir. Malzeme yüzeyinin pürüzsüzlüğü de ayrıca önemlidir. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi süreksizlikte yansıma özelliği ile tespit işlemi sağlanmalıdır. Testi icra eden operatörün sonuçları iyi yorumlaması da ayrıca önemlidir.



Şekil 2.5. Ultrasonik test çalışma prensibi

2.1.3. Sıvı Penetrant Testi (PT)

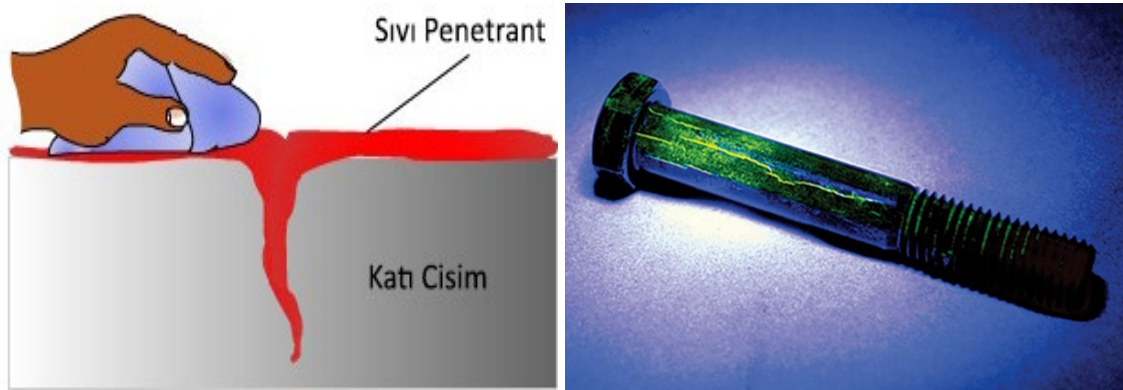
Bu Metot 1800'lü yıllarda demir yollarında oluşan süreksizlikleri tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir. Dönemin görevlileri ve çalışanları, bunu yağ ve tebeşir tozu kullanarak uygulamaya başlamıştır. Günümüzde ise iki farklı penetrant kontrolü mevcuttur. Bunlar;

- Floresan Penetrant Testi
- Görülür Penetrant Testi

Bunların testlerin arasındaki en büyük ve önemli fark hassasiyetleridir. Havacılık ise yüksek hassasiyet gerektiren bir faaliyet alanı olmasından dolayı çalışmaların çok büyük bir bölümünde floresan penetrant test kullanılarak UV ışık altında kontrol gerçekleşir.

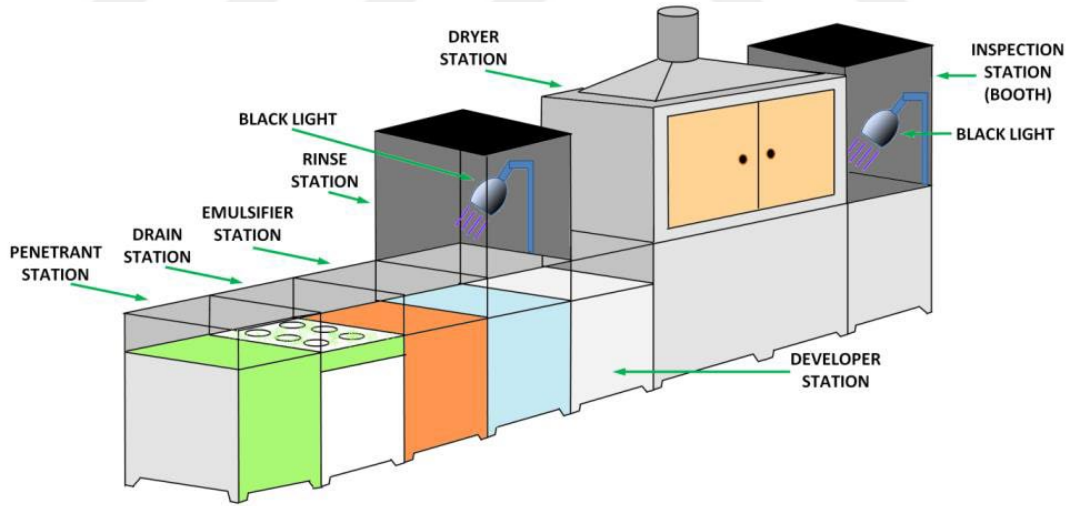
Gözeneksiz malzemelerdeki yüzey kırılma kusurlarını tespit etmek için sıvı boyalardan veya floresan penetrantlardan yararlanır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi sıvı penetrant yüzeye uygulanır. Sonrasında fazla penetrant malzeme yüzeyi üzerinden

kaldırılır. Eğer malzemede çatlak, kırık vs. olarak bir süreksizlik varsa sıvı o çatlığa dolarak kendini UV ışık altında belli eder (Shipway et al., 2021).



Şekil 2.6. Sıvı Penetrant sıvının kullanım şekli ve çatlakların görüntüsü

Sabit olarak kurulan bir test sisteminde Şekil 2.7’de gösterildiği üzere bir sistem donanımı mevcuttur. Penetrant sıvının uygulanmasından, fazla sıvının alınması, kuruması vs. şeklinde bir sistem bütünü mevcuttur.

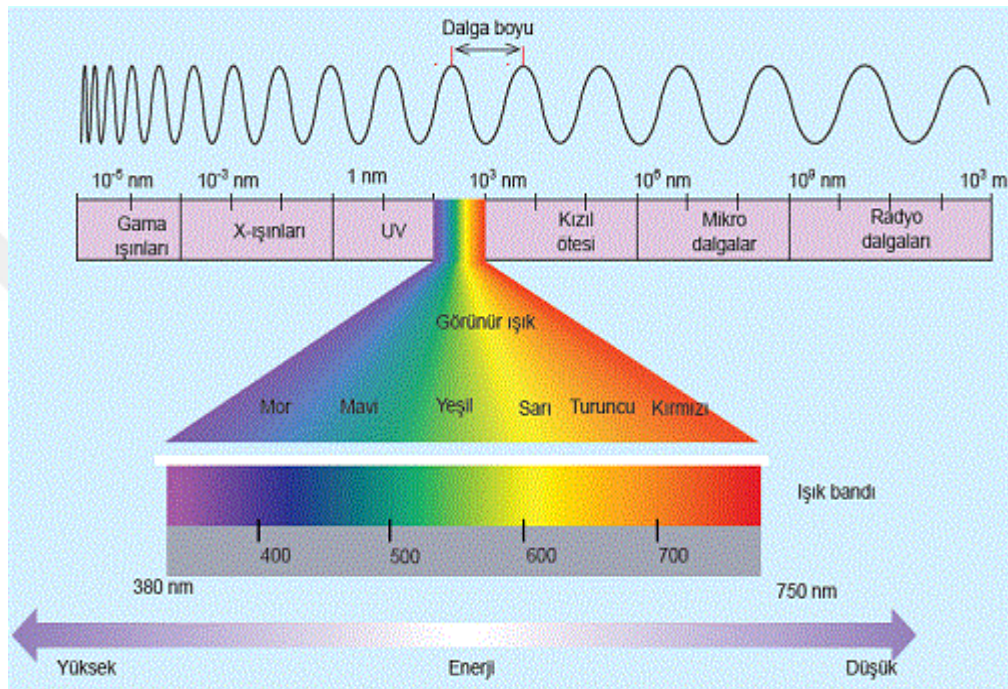


Şekil 2.7. Sabit penetrant test sistem donanımı

Söz konusu bu kontrolde malzeme sadece yüzeye açık olmalıdır. Bu husus başarılı bir test için dikkat edilmesi gereken en önemli adımdır. Başka bir deyişle test edilecek parçanın yüzeyi boya, kimyasal kaplama vb. bir malzeme ile kaplı olmaması ya da test öncesinde arındırılması önem arz etmektedir.

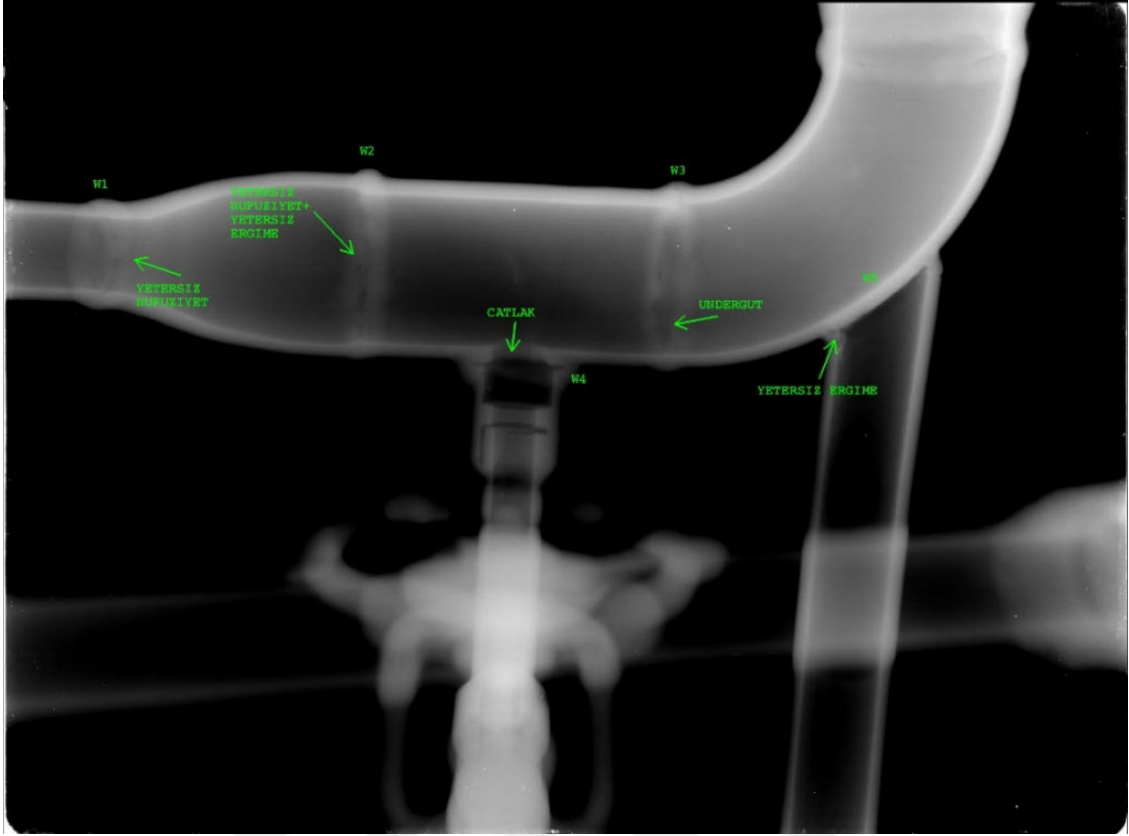
2.1.4. Radyografik Test (RT)

Bir nesnenin iç yapısının görüntülerini oluşturmak için X ışınlarının veya gama ışınlarının kullanılmasını içerir. X ışınları ve Gama ışınlarının yardımıyla yapılan radyografi kontrolü, test parçalarının içerisini incelemek için elektromanyetik radyasyonun nüfuz etme kabiliyetini kullanır. Şekil 2.8'de görülen Elektromanyetik spektrumda X ışınları ve Gama ışınlarının spektrum içerisinde yeri gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Elektromanyetik spektrum

X-RAY cihazından üretilen X ışınları test malzemesinin altına koyulan gümüş tanecikli filmlerin içerisinde bulunan gümüş taneciklerin yakılmasıyla gölgelendirme oluşturması beklenir. Bahse konu prensiple Şekil 2.9'da görüldüğü üzere yapılan radyografi kontrolü ile kusurlar tespit edilir (Lopez et al., 2018). Açık renk ile görülen bölümler X-ışınının dirençle karşılaşması sonucuyla geçememesinden kaynaklı yakılamayan gümüş tanecikleridir. Koyu renkler ise herhangi bir direnç ile karşılaşmayan X ışınlarının yaktığı gümüş taneciklerdir.



Şekil 2.9. Radyografik test çalışması

2.1.4.1. Radyografik Testin Avantajları

- Test edilen malzeme iç ve dış yapısındaki süreksizlikleri ortaya çıkarır,
- Günümüzde kullanılan pek çok malzeme ve parçaya yönelik test yapılabilmektedir,
- Malzemelerin üretim esnasında oluşan hatalarını ortaya çıkarır ve malzemelerin üretim aşamasında gerekli düzenlemelerin ve değiştirmelerin yapılmasına olanak sağlar,
- Montaj ile birleştirilen malzemelerin montaj sonrasında hataları tespit edilir,
- Film üzerinde test parçasının kalıcı görüntü kaydını sağlar.

2.1.4.2. Radyografik Testin Dezavantajları

- Test edilen malzemenin karmaşık yapıda olması uygulama zorluğu yaratır,
- Radyasyon kaynağı, test edilen malzeme ve film birleşenlerinin uygun şekilde ayarlanmaması sonuç alınmamasına neden olur,

- Aynı anda çift taraflı kontrol edilecek bir malzeme için iki taraftan yaklaşılabilmesi testi uygulanamaz hale getirir,
- Malzemedeki ışın hatlarına paralel olmayan küçük süreksizliklerin saptanması zordur,
- Kalın malzemelerde çok yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğundan testin uygulanması maliyetli hale gelebilmektedir. Belirli bir kalınlıktan sonra ise uygulama alanı kalmamaktadır.
- Radyografik test cihazları, radyoaktif ışınları absorbe edecek ünitenin dizaynı, kullanılan filmler, filmlerin banyo edilmesi için gerekli laboratuvar, banyo kimyasalları düşünüldüğünde test yöntemini oldukça pahalı ve zor bir hale getirir.
- Bazen bir malzemenin tam olarak incelenebilmesi için birden fazla ve farklı açılardan çekim ihtiyacı olabileceğinden testin maliyeti daha da artabilmektedir,
- Ana mantık olarak çekimlerin sürekli radyasyon olmadan film çekilemeyeceğinden radyasyon tehlikesi daima göz önünde bulunmalıdır,
- Testin tüm aşamaları operatörün kendine koruma endişesi içinde geçer,
- Test uygulanan malzeme test sonrasında iyonlaşmaya sebep olduğundan, ışın kaynakları olan izotoplar potansiyel bir tehlike kaynağıdır,

2.1.5. Girdap Akımı (Eddy Current) Testi (ECT)

Yüzey ve yüzey altı kusurlarını tespit etmek için elektromanyetik alan yaratılarak (Faraday Kanunu temel alarak), malzemenin davranışı izlenerek çatlakların tespitinde kullanılır. İletken malzemelerin muayenesinde yaygın olarak kullanılır (Tsopelas & Siakavellas, 2011). Genellikle iletken malzemelerde tercih edilebilmesi, nüfuziyet değerlerinin çok olamaması dezavantaj yaratmaktadır (Akay, 2000).

İçi dolu veya boş silindirik malzemelere (çubuk ve borular gibi), levhalara ve kaplamalara uygulanabilen girdap akımı (Eddy current) testi; malzeme iletkenliğinin ölçülmesi, malzemeye ait oluşmuş süreksizliklerin tespit edilmesi ve malzeme üzerinde uygulanmış olan kaplama kalınlığının saptanmasında etkin bir yöntemdir.

Girdap akımı (Eddy current) testi; Şekil 2.10'da uygulandığı gibi iletken bir malzemeye, malzeme tipine uygun verilen küçük elektrik akımlarının indüklenmesi ve ilgili manyetik alanlar arasında meydana gelen tepkimenin gözlemlenmesidir.



Şekil 2.10. Girdap akım testi uygulanan bir malzeme örneği

2.1.5.1. Girdap Akımı (Eddy Current) Testinin Avantajları

- Uygulaması kolay ve usulleri karmaşık değildir,
- Verilen sinyalin elektrik akımı olmasından dolayı anında gönderilebilmektedir. Söz konusu sinyalin oluşması için zamansal bekleme yapılmasına ihtiyaç yoktur,
- Malzemenin testi sırasında parça ile testi yapan cihazından arasında sadece manyetik alan oluştuğundan malzemenin hasar görmesi gibi bir durumla karşılaşılmaz,
- Kullanım sahası çok geniştir. Fiziki ve metalurjik değişkenlere karşı duyarlılık gösteren kontrol, ilgili değişkenler çıkarıldığı veya bastırıldığında tatmin edici sonuçlar çıkarabilmektedir,
- Test cihazının portatif versiyonları olduğundan mobilize bir şekilde kullanılabilir.

2.1.5.2. Girdap Akımı (Eddy Current) Testinin Dezavantajları

- Testin uygulandığı malzemeye yönelik derinliğin, standart durumlarda ortalama 0,25 inç 'ten daha az bir derinliğe sahip olmalıdır,
- Testi uygulayan kişiye çok bağlıdır. Operatörün tecrübesi, testin başarısında çok etkilidir,
- Test yalnızca iletken malzemelerde kullanılabilir,
- Ferromanyetik özellikli malzemelerin kontrolü imkânsız değildir fakat oldukça zordur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Uzun süre pek çok faaliyette kullanılmış, pek çok hava aracı çekimi yapılmış bir hava aracı çeker kancasının tahribatsız muayenesi (Non-Destructive Inspection/NDI) yapılması için beş tahribatsız muayene testi (Non-Destructive Testing/NDT) kullanılmıştır.

3.1. Malzeme ve Özellikleri

Şekil 3.1’de görülen hava aracı çeker kancası incelemeye alınmıştır. Malzeme AISI 4130 Alaşımli Çeliğinden üretilmiş olup AISI 4130 Alaşımli Çeliğinin mukavemet değerlerinin yüksek olmasından dolayı tercih edilmiştir. Tablo 3.1’de belirtilen malzeme özellikleri de göz önünde bulundurularak NDT uygulaması yapılmıştır.



Şekil 3.1. Test edilen hava aracı çeker kancası ve AISI 4130 alaşımli çelik

AISI 4130 Alaşımli Çeliğinden üretilen ve ferromanyetik bir özelliğe sahip olan çeker kancası Tablo 3.1’de belirtilen elementlerden üretimi sağlanmış bir

malzemedir. Demir oranının fazla olması ferromanyetik özellik taşımasına neden olurken bu durum yapılacak testlerde göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 3.1. AISI 4130 alaşımlı çeliğin kimyasal bileşimi

ELEMENT		İÇERİK (%)
Demir	(Fe)	97.03 – 98.22
Krom	(Cr)	0.80 – 1.10
Mangan	(Mn)	0.40 – 0.60
Karbon	(C)	0.280 – 0.330
Silisyum	(Si)	0.15 – 0.30
Molibden	(Mo)	0.15 – 0.25
Sülfür	(S)	0.040
Fosfor	(P)	0.035

Ayrıca test edilen çeker kancasının AISI 4130 alaşımlı çeliğine ait Tablo 3.2’de fiziksel özelliklerine, Tablo 3.3’te mekanik özelliklerine ve Tablo 3.4’te termal özelliklerine ait bilgilere yer verilmiştir.

Tablo 3.2. AISI 4130 alaşımlı çeliğin fiziksel özellikleri

ÖZELLİKLER	METRİK
Yoğunluk	7.85 g/cm ³
Erime Noktası	1432°C

Tablo 3.3. AISI 4130 alaşımlı çeliğin mekanik özellikleri

ÖZELLİKLER	METRİK
Çekme Mukavemeti	560 MPa
Akma Mukavemeti	460 MPa
Elastisite Modülü	190-210 GPa
Şıkışmazlık Modülü	140 GPa
Kayma Modülü	80 GPa
Poisson Oranı	0.27-0.30
Kopma Uzaması (in 50 mm)	21.50%
Çekme Testinde Alan Küçülmesi	59.60%
Sertlik	217
İşlenebilirlik	70

Tablo 3.4. AISI 4130 alaşımlı çeliğin termal özelliği

ÖZELLİKLER	METRİK
Termal İletkenlik (100°C)	42.7 W/mK

3.1.1. Malzeme Üzerinde Bulunan Pim/Perno

AISI 4130 Alaşımli Çeliğinden üretilen çeker kancası başlı başına tek malzemededen oluşmamakta birkaç parçanın birbirlerine pim ile tutturulması ile kullanıma sunulmaktadır. Pimler ve pernolar çok eskiden beri bilinen ve kullanılan makine elemanlarıdır. Elemanların birbirine temas yüzeyi silindir yüzeyi olup genelde yük bu silindirin eksenine dik yönde etkir. Pimler ve pernolar, mekanik sistemlerde iki veya daha fazla parçayı birleştirmek için kullanılan silindirik bağlantı elemanlarıdır. Her ikisi de benzer geometriye sahip olsa da özellik ve görevleri ile alakalı detaylar Tablo 3.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Pim ve pernoların özellik ve görevleri

ÖZELLİK	PİM	PERNO
Görev	Konumlandırma, döner hareket sağlama	Yük taşıma, sabit bağlama
Yük Tipi	Genellikle düşük, yönlendirici yükler	Ana yük taşıyıcı eleman
Hareket	Genellikle döner bağlantılarda	Rijit bağlantı

Havacılıkta pim ve perno kullanımı oldukça yaygındır. Uçuş kumanda yüzeyleri (rudder, elevatör, aileron) bağlantılarında, iniş takımı menteşeleri, kanat-gövde bağlantı elemanlarında, bakım sırasında sökülebilir bağlantılarda kullanılmaktadır.

Havacılıkta kullanılan pim ve pernolar genellikle yüksek mukavemetli alaşımli çelik, titanyum veya alüminyum alaşımlarından yapılır.

Bizim inceleme yaptığımız çeker kancasında ise işlevi gereği perno değil pim kullanılmıştır. Kullanılan pim; Tablo 3.6.'da mekanik özellikleri verilen AISI 4330 Alaşımli Çeliğinden üretilmiştir. Bu özellikler göz önünde bulundurularak uçak çeker kancasına ait pim bölümünün de hesaplamaya dayalı analiz incelemesi yapılmıştır.

Tablo 3.6. AISI 4330 alaşımli çeliğin mekanik özellikleri

ÖZELLİKLER	METRİK
Çekme Mukavemeti	860 MPa
Akma Mukavemeti	690 MPa
Kopma Uzaması (in 50 mm)	15%
Sertlik	285

3.1.2. Emniyet Katsayısı

Malzemenin emniyet katsayısı, bir sistemin veya malzemenin gerçek çalışma koşullarında karşılaşılabileceği maksimum yüke karşı güvenilirliğini belirlemek amacıyla kullanılan bir mühendislik parametresidir. Bir diğer deyişle, emniyet katsayısı, malzemenin kırılmadan veya arızalanmadan önce dayanabileceği yük ile tasarım yükü arasındaki oranı ifade eder.

Emniyet katsayısı (SF) şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Emniyet katsayısı (SF)} = \frac{\text{Kırılma Yüğü veya Maksimum Dayanım}}{\text{Çalışma Yüğü veya Tasarım Yüğü}}$$

Kırılma Yüğü (Ultimate Load): Malzemenin kırılma veya akma noktasındaki maksimum yük kapasitesi.

Çalışma Yüğü (Working Load): Malzemenin normal çalışma koşullarında maruz kalacağı yük.

Tablo 3.7. Emniyet katsayısı değerleri ve anlamları

EMNİYET KATSAYISI DEĞER ARALIKLARI	ANLAMLARI
1 – 1,5	Kritik öneme sahip olmayan, düşük riskli sistemler
2 - 3	Makine elemanları, yapısal elemanlar
3 - 4	Asansörler, vinçler, ağır yük taşıyan sistemler
5 - 10	Hayati öneme sahip sistemler

Emniyet katsayısı, kullanım amacına ve risk faktörüne bağlı olarak farklı değerlerde seçilebilir.

İncelemesi yapılan uçak çeker kancası ele alınacak olursa; Tablo 3.3.'de görülen değerlere göre hesaplama yapılabilir.

$$\text{Emniyet katsayısı (SF)} = \frac{460}{78} = 5,89 \quad (1)$$

Emniyet katsayısının Eşitlik 1'e göre 5,89'luk gibi değer olarak hesaplanması nedeniyle söz konusu malzeme Tablo 3.7.'de görüldüğü gibi hayati öneme sahip sistem olarak değerlendirilmektedir. Havacılık sektöründe ise bunun istenen normal bir durumu olduğu bilinmektedir.

Emniyet Katsayısı ve Güvenlik Faktörü İlişkisi; emniyet katsayısı ile güvenlik faktörü genellikle aynı anlama gelir. Ancak bazı durumlarda güvenlik faktörü, tasarım sürecinde risk analizleri ve belirsizlikleri de içerecek şekilde daha geniş kapsamlı bir değerlendirmeyi ifade edebilir.

İncelemesini yaptığımız uçak çeker kancası ele alındığında emniyet katsayısı;

- Malzeme Özellikleri: Akma dayanımı, kırılma mukavemeti,
- Yük Tipi: Statik, dinamik veya darbeli yükleme,
- Çevresel Faktörler: Sıcaklık, korozyon, titreşim,
- Risk ve Güvenlik Gereksinimleri: İnsan güvenliği, maliyet, işletme koşullarına göre belirlenir.

Sonuç olarak; emniyet katsayısı, mühendislikte kullanılan en kritik parametrelerden biridir ve tasarım güvenliğini ve sistem güvenilirliğini garanti altına almak amacıyla kullanılır. Belirlenen emniyet katsayısı, sistemin kullanım amacına, risk faktörüne ve malzeme özelliklerine göre dikkatle seçilmelidir. Bir tasarımda çok yüksek bir emniyet katsayısı, maliyet ve ağırlık artışına yol açarken, çok düşük bir emniyet katsayısı ise güvenlik risklerini artırır. Bu dengeyi kurmak, mühendislik tasarımının temelidir.

3.2. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Girdap Akımı (Eddy Current) Testi

Bu tahribatsız muayene yöntemi havacılıkta yaygın bir kullanıma sahip olmasıyla birlikte Faraday Kanunu prensibiyle çalışmaktadır. Kullanılan test cihazının probu (1.bobin), test malzemesi (kontrol malzemesi) (2.bobin) olarak çalışmaktadır. Girdap Akımı (Eddy Current) Testi ferromanyetik malzemelerde yalnızca yüzeye yakın kusurlarını tespit eder. Bu tespit durumunun başarısı malzemenin manyetik doygunluğa ulaşmasına bağlıdır (Li et al., 2024).

Şekil 3.1’de gösterilen incelemeye aldığımız çeker kancasına ilk olarak Girdap Akımı (Eddy Current) testi yapılmıştır. Söz konusu testi yaptığımız ve sonuçlarımızı gösterdiğimiz Şekil 3.2’deki cihaz ile incelemeye başlanmıştır.



Şekil 3.2. Girdap Akımı (Eddy Current) test cihazı

Girdap akımı testinde öncelikle kalibre parçasının testi yapılarak cihazın kalibre edilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.3'te gösterilen kalibre bloğu ile kalibresi yapılan cihazın ekranında grafiksel olarak değerler gözlemlenmiş ve ardında çeker kancası test edilmek üzere hazırlanmıştır.



Şekil 3.3. Kalibre bloğu ile kalibresi yapılan Girdap Akımı (Eddy Current) test cihazı

Uçak çeker kancası ile yapılan test işlemleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Test yapılırken aynı zamanda söz konusu cihazın ekranından Empedans-Düzlem diyagramı grafiksel olarak incelenmiştir. Grafiğe incelendiğinde kalibre yapılan blokta görülen Empedans-Düzlem diyagram grafiğinden çok farklı bir grafiksel çizim gözlemlenmiştir.



Şekil 3.4. Girdap Akımı (Eddy Current) testi yapılan uçak çeker kancası

3.3. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Ultrasonik Test

Girdap akımı (Eddy Current) testinden sonra söz konusu çeker kancası ultrasonik teste tabi tutulmak için hazırlandı. İlk olarak test edilecek çeker kancasının malzeme özelliklerine göre kalibresi yapıldı. Söz konusu kalibrenin yapılmasındaki amaç malzeme yoğunluğunun ses ile olan ilişkisinden kaynaklı olmasıdır.

Yüzeysel temizliği yapılan test malzemesine sürülmek üzere kuplaj sıvısı olarak gliserin kullanıldı. Test yapılacak bölüme gliserin dökülerek Şekil 3.5'te gösterilen cihazın kullanımına hazır hale getirildi.



Şekil 3.5. Ultrasonik test cihazı

Şekil 3.5 ultrasonik test cihazının 5 MHz'lik düz demet transdüserü uçak çeker kancası üzerinde gezdirildi. Yapılan test neticesinde Şekil 3.6'da görülen grafiksel değer gözlemlendi.



Şekil 3.6. Ultrasonik test yapılan uçak çeker kancası

3.4. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Radyografik Test

Söz konusu çeker kancası radyografik test için hazırlanmaya başlandı. Malzeme çekim yapılacak cihaza göre konumlandırıldı. Şekil 3.7’de gösterilen X-RAY cihazı açıldı ve uygun parametreler girildi. Söz konusu parametreler Tablo 3.8’de belirtildiği gibidir.

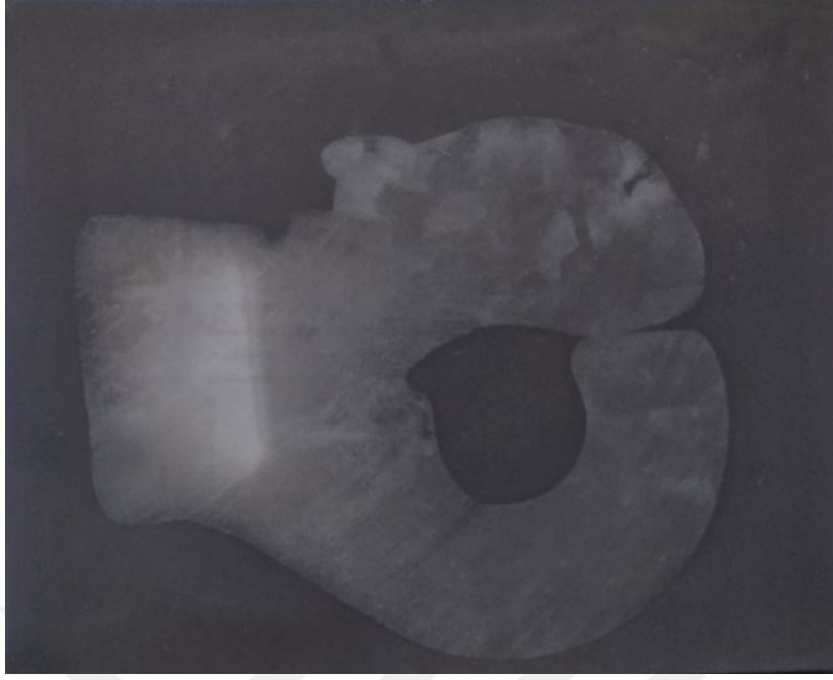


Şekil 3.7. Radyografik test cihazı

Tablo 3.8. Parametre değerleri

PARAMETRELER	AKIM DEĞERİ	SÜRE	VOLTAJ DEĞERİ	MESAFE
Test Değerleri	4 mA	90 sn	200 kV	0,9 m

Tamamlanan çekimin sonrasında film alınarak karanlık odaya götürüldü ve kırmızı ışık filtreli lambalar altında solüsyonlar ile proses işlemi yapıldı. İlk solüsyon olan Develpor solüsyonu ile 5 dakikalık banyo yapılarak gümüş taneciklerin siyah renge bürünmesi için geliştirildi. Sonrasında ikinci solüsyon olan Fixer solüsyonu ile de banyo edildi. Takibinde su ile durulama yaptırılarak kurutmaya bırakıldı. Bahse konu işlemler neticesinde beyaz ışıklı muayene panosunda görülen (Şekil 3.8) film görüntüsü elde edildi.



Şekil 3.8. Çeker kancasının radyografi test cihazı ile çekimi sonrası film görüntüsü

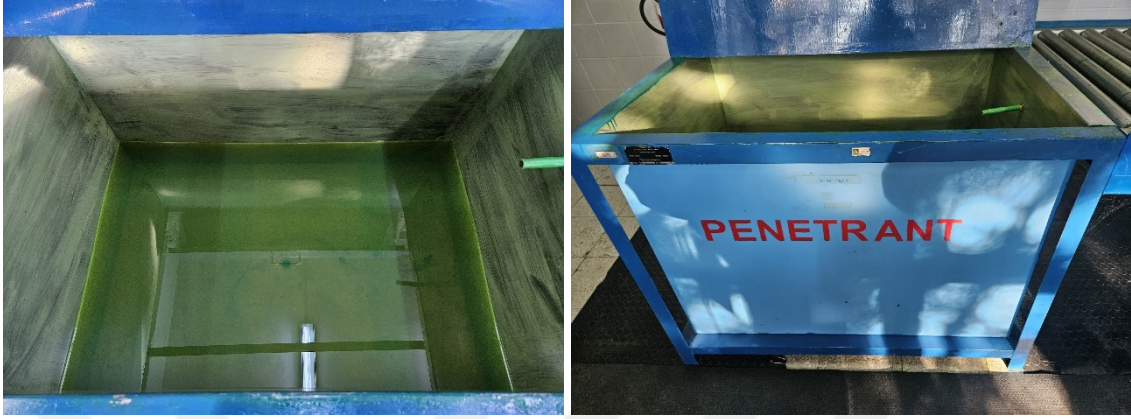
3.5. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Sıvı Penetrant Testi

Test edilen çeker kancası sıvı penetrant test işlemi için test odasına alındı. Sabit bir penetrant donanımına sahip olan üniteye ilk olarak penetrant sıvının içine konmak üzere Şekil 3.9'daki gibi hazırlandı.



Şekil 3.9. Sıvı penetrant test için malzemenin süzgeçlenmesi

Hazırlanan kanca Şekil 3.10’da bulunan içinde penetrant sıvısı dolu havuza daldırıldı. Bir süre beklemesi, sıvının derinlere kadar nüfuz etmesini sağlamakta etkili olduğu bilinmektedir.



Şekil 3.10. Penetrant sıvısı ve havuzu

Sıvı penetrant dolu havuzdan çıkarılan test malzemesi fazla penetrant sıvının süzülmesi için Şekil 3.11’de bulunan alanda bekletildi.

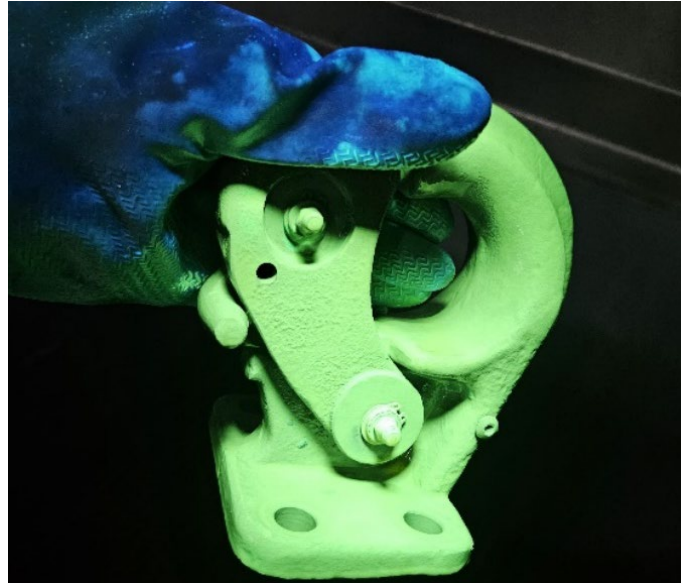


Şekil 3.11. Sıvı penetrant havuzundan çıkarılan ve süzülmeye bırakılan malzeme

Çeker kancası takiben ön yıkama yapıldıktan sonra Şekil 3.12’de görülen emulsifier havuzuna daldırıldı ve fazlaca kalmış olan penetrant sıvısının özellikle yüzeylerden temizlenmesi sağlandı. Emulsifier havuzundan çıkarılan malzeme Şekil 3.13’te görüldüğü şekilde olduğundan yıkama ihtiyaç duyuldu. Akabinde Şekil 3.14’te bulunan üniteye yıkama işlemine alındı. Yıkama işlemi esnasında suyun tazyikli olmaması gibi önemli noktalar göz ardı edilmedi.



Şekil 3.12. Sıvı penetrant test donanımına ait emulsifier havuzu



Şekil 3.13. Yıkama öncesi penetrant sıvısı ile kaplı olan malzeme



Şekil 3.14. Yıkama ünitesinde yıkamaması yapılan malzeme

Yıkama işlemi yapılan çeker kancası Şekil 3.15'te bulunan developer sıvısı havuzuna daldırılır. Bu sayede muhtemel süreksizlikler içinde biriken penetrant sıvısının ters kapuler hareketle yüzeye çıkması sağlanır.



Şekil 3.15. Developer sıvı havuzu

Şekil 3.15 developer sıvısından çıkarılan malzemenin kurutulması gerekmektedir. Kurutma işlemi ise Şekil 3.16'da görüle kurutma istasyonunda yapıldı. 49-52 °C, 5 (beş) dakikalık süre ile kurutulan malzeme süreksizlik takibi için Developer bekleme zamanına bırakıldı.



Şekil 3.16. Kurutma istasyonu

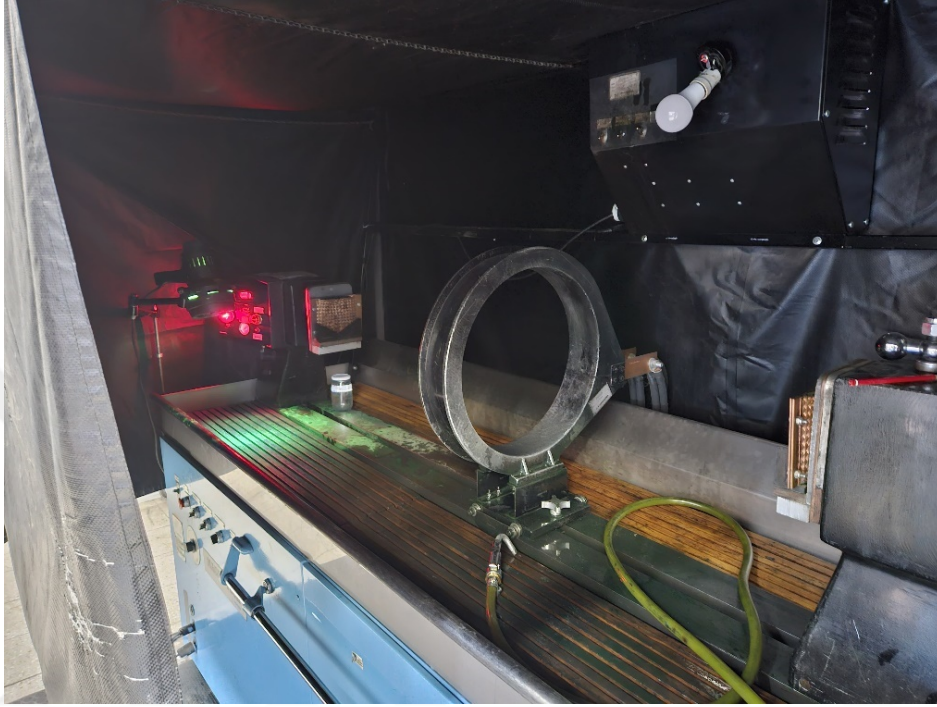
Kurutma işlemi tamamlanan ve developer bekleme zamanı dolan parça sonrasında incelenmek üzere karanlık odaya alındı. Süreksizlikler UV-A ışık altında Şekil 3.17'deki gibi gözle görülür halde takip edildi.



Şekil 3.17. Sıvı penetrant testi tamamlanan çeker kancası

3.6. Hava Aracı Çeker Kancasına Yapılan Manyetik Parçacık Testi

Son olarak manyetik parçacık testi ile malzeme incelemeye alındı. Test malzemesi öncelikle alkol-solvent karışımı temizlik sıvısı ile yağ, kir gibi unsurlardan arındırıldı. Şekil 3.18’de görseli bulunan test cihazı hazır hale getirildi.



Şekil 3.18. Manyetik parçacık test cihazı

Öncelikli olarak çeker kancası Şekil 3.19’da gösterilen şekilde uygun olarak içerisinde 5 (beş) sarımlı bobin bulunan cihaz içerisine konumlandırıldı. Sürekli alan test metodunun uygulanması için içeriksel olarak manyetik parçacık barındıran sıvı ile homojen bir şekilde ıslatıldı ve eş zamanlı olarak (L/D) değeri 5(beş) olarak bilinen malzeme için Eşitlik 2’deki denklem ile hesaplama yapılarak 1800 Amper akım uygulandı.

$$\text{Amper} - \text{Sarım} = \frac{K}{(L/D)} \quad (2)$$

- Parça kesit alanı bobin kesit alanının 1/10’undan küçükse K sabit sayısı:45.000
- Parça kesit alanı bobin kesit alanının 1/10’undan büyük fakat 1/2’inden küçükse K sabit sayısı:43.000

- Parça kesit alanı bobin kesit alanının 1/2' sinden büyükse K sabit sayı: 35.000

Eşitlik 3'te K sabiti 45000 olarak alınır.

$$Amper - Sarım = \frac{45000}{5} \quad (3)$$

Eşitlik 4'te değer görülür.

$$Amper - Sarım = 9000 \quad (4)$$

Eşitlik 5'te amper değerinin bulunması için

$$Amper = \frac{Amper - Sarım}{Bobin Sarım Sayısı} \quad (5)$$

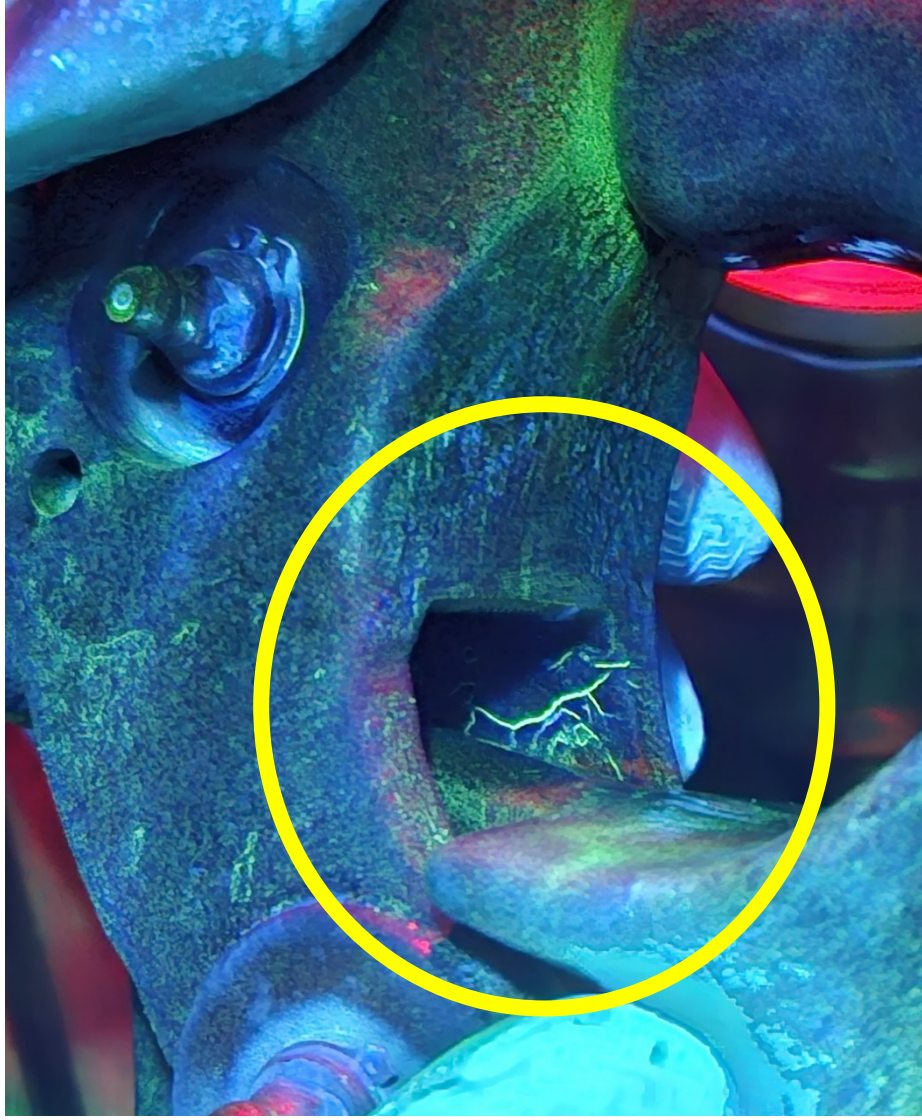
Eşitlik 6'da bobin sarım sayısının 5 olduğu bilindiğinden

$$Amper = \frac{9000}{5} = 1800 \text{ A} \quad (6)$$



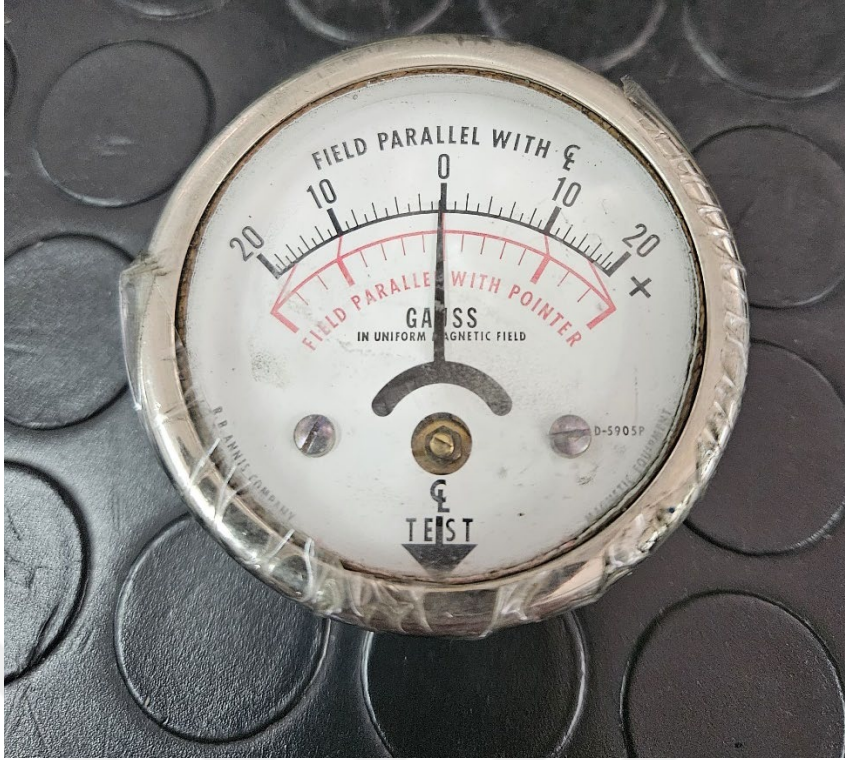
Şekil 3.19. Malzemenin uygun şekilde yerleştirilmesi ve test sıvısı ile yıkanması

Test işlemi sonrasında artık malzeme incelenmeye hazır hale geldiğinden karanlık odada UV-A ışık altında Şekil 3.20'deki malzemede gözle görülen süreksizlikler belli hale geldi.



Şekil 3.20. Manyetik parçacık test sonrası inceleme yapılan ve süreksizliklerin görüldüğü malzeme

İnceleme sonra rutin faaliyet olarak malzemelerin manyetik alandan etkilenmeleri neticesinde mıknatıslanan test malzemesinin tekrar demagnetize yapılarak nötr hale getirilmesi gerekmektedir. Bu husus özellikle ferromanyetik malzemelerde daha da önem arz etmektedir. Test sonrası ilgili malzeme nötr hale getirilmiş olup Şekil 3.21’de görülen manyetik alan ölçer Gauss metre ile malzemenin nötr hale geldiği kontrol edildi.



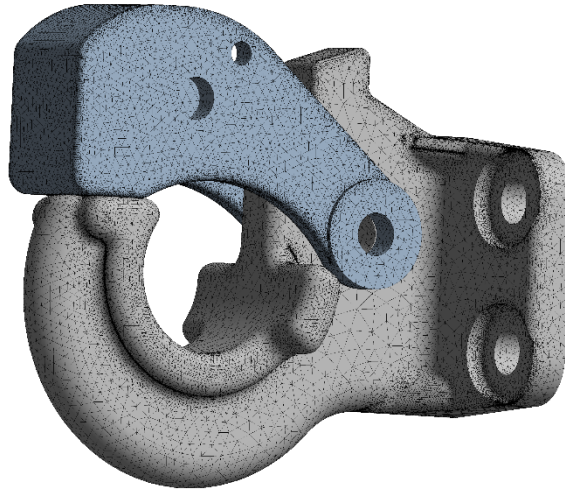
Şekil 3.21. Gauss metre

3.7. Analiz Çalışması

Uçak çekimi esnasında uçak ile çeki kancası konumu/açısı çok önemlidir. Konumların durumları uygulanan kuvvetleri direk etkilediğinden yanlış bir konumlama o malzemenin ömrünün kısılmasına, malzeme yorulmasına, malzeme üzerinde istenmeyen çatlak/kırılmalara neden olabilir.

Hesaplamaya dayalı ve ANSYS programına dayalı yapılan analiz çalışmasında dik doğrultuda uçağın çekim yapıldığı senaryo ele alınmıştır.

Bu çalışmada yapılan analiz çalışmasında, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz, dinamik analiz ve çeşitli modelleme tekniklerini destekleyen kapsamlı bir yönetim yazılımı olan ANSYS ile kıyaslanmıştır. Analiz sonuçlarının kontrol edilmesi ve doğruluğunun teyit edilmesi gelişen teknolojiyle birlikte bilgisayar programları ile de mümkün hale gelmiştir. Kıyaslama ANSYS Mechanical hazır paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.22. Çeker kancasının ağ (mesh) yapısı

Geometri üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 3.22’de sunulmaktadır. Sayısal çözümleme sürecinde, geometri üzerinde toplam 584.523 adet ağ elemanı oluşturulmuştur.

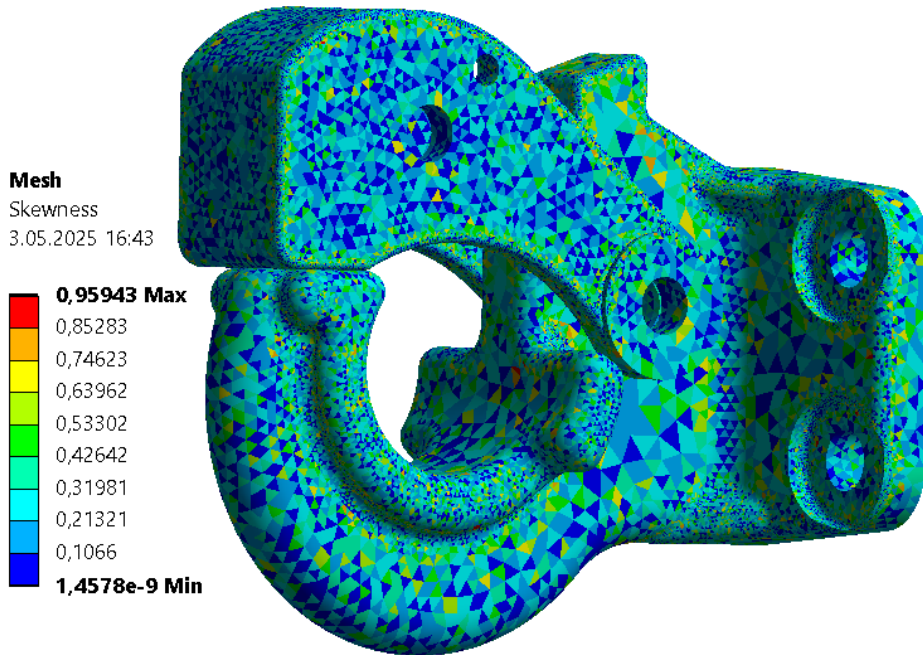
Çeki kancasının yapısal çözümlemesine yönelik gerçekleştirilen bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi esas alınarak tamamen dört-yüzlü (tetrahedral) elemanlardan oluşan üç boyutlu bir ağ modeli oluşturulmuştur. Dört-yüzlü elemanlar, karmaşık geometrilere uyum sağlama yetenekleri ve otomatik ağ üretim algoritmalarıyla olan yüksek uyumları nedeniyle bu tür analizlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Modelleme sürecinde, yüksek çözünürlüklü bir mesh yapısı oluşturulmuş ve her bir elemanın geometrik uygunluğu, çarpıklık (skewness) metriği üzerinden değerlendirilmiştir. Çarpıklık, bir dağılımın asimetrisinin bir ölçüsüdür. Bir dağılım, sol ve sağ tarafı ayna görüntüsü olmadığında asimettiktir. Çarpıklık, her elemanın ideal geometriye ne ölçüde yakın olduğunu ifade eden kritik bir kalite göstergesi olup, sayısal çözümün doğruluğu ve kararlılığı açısından büyük önem taşımaktadır.

Analiz sonucunda elde edilen veriler, maksimum çarpıklık değerinin 0,95943 olduğunu ve elemanların büyük bir kısmının 0,3–0,6 aralığında yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Bu değer aralığı, genel ağ kalitesinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu ve sayısal doğruluğun korunduğunu göstermektedir. Öte yandan, yerel olarak 0,9 seviyelerine kadar ulaşan yüksek çarpıklık değerleri, özellikle gerilme birikimlerinin

görüldüğü bölgelerde çözüm hassasiyetinin azalabileceğine işaret etmektedir. Ancak bu yüksek değerlerin model genelindeki dağılımı oldukça sınırlıdır.

Yapılan görsel değerlendirmelerde kullanılan renkli kontur haritası, mesh kalitesinin mekânsal dağılımını açıkça göstermektedir. Bu haritalarda kırmızı ve turuncu tonlarının yalnızca sınırlı bölgelerde yer aldığı, buna karşılık büyük ölçüde mavi ve yeşil tonların hâkim olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, ağ yapısının büyük çoğunlukla düşük çarpıklık değerlerine sahip olduğunu ve dolayısıyla genel mesh kalitesinin başarılı bir dağılım gösterdiğini doğrulamaktadır. Özellikle yük uygulama noktalarında ve yapısal olarak kritik bölgelerde dört-yüzlü elemanların düzgün bir şekilde yerleştiği, böylece geometrik bozulmaların minimize edildiği tespit edilmiştir. Bu durum, analiz sonuçlarının kararlılığını artırarak, hesaplamaların mühendislik açısından güvenilirliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, çeki kancası gibi geometrik olarak karmaşık yapıya sahip bir mekanik bileşenin yapısal analizinde kullanılan dört-yüzlü ağ yapısı hem sayısal çözümün doğruluğunu hem de mühendislik güvenilirliğini sağlayacak niteliktedir. Çarpıklık dağılımının homojenliği ve kritik bölgelerdeki düşük bozulma seviyeleri, bu mesh yapısının Sonlu Elemanlar Yöntemi tabanlı yapısal analizlerde etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.23. İnceleme konusu yapılan çeki kancasına ait çarpıklık değer dağılımı

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Toplamda 5 (beş) ayrı test işlemi yapılan ve çeker kancasının hasar analizine yönelik araştırma sonuçları inceleme noktasında çok tatmin edici sonuçlar vermiştir. Testlerin sonucunu ayrıca incelememiz fikir sahibi olmamızı sağlayacaktır.

4.1. Girdap Akımı (Eddy Current) Testinin Araştırma Sonucu

Girdap Akımı (Eddy Current) Testi, test edilen materyalin yüzey ve yüzey altı hatalarının kontrol edilmesini sağlayan tahribatsız test yöntemlerinden biridir (D'Angelo et al., 2016).

Bizim test ettiğimiz çeker kancasının Tablo 3.1'e göre ferromanyetik bir malzeme olduğu bilinmektedir. Ferromanyetik olmayan malzemelerle karşılaştırıldığında, ferromanyetik malzemenin manyetik geçirgenliği, numunenin içindeki pozisyona göre değişen ve sinyal-gürültü oranını kötüleştiren bir durumu vardır. Mıknatıslanmanın kısmen veya tamamen bir yöne yönlendirildiği bir DC mıknatıslanma yönteminin, testin güvenilir bir şekilde yapılmasını sağlamak için Girdap Akımı (Eddy Current) Testini ile birlikte yapması gerektiği yaygın olarak kabul edilmektedir (Deng et al., 2018). Yani test öncesinde malzemenin manyetik doygunluğa ulaşması gerekmektedir (Akay, 2000).

Fakat bu durum teorikte başarılı gibi görülse de pratikte çok da tercih edilen bir metod değildir. Tercih edilmemesinin en büyük sebebi ise her ne kadar malzeme manyetik doygunluğa ulaştırılsa da artık mıknatısiyet tutma zamanı kısa olduğundan dolayı en ufak bir manyetik alandan etkilenebilmektedir. Örneğin dünyanın manyetik alanı dahi malzeme üstünde bir etki yaratmaktadır.

Test yapılan bölümde mıknatıslanma yönteminin uygulamasının yapılacağı bir ortam ve cihaz bulunmadığından söz konusu yöntem yapılamadan test yapılmıştır. Şekil 4.1'de bize göstermiştir ki test edilen malzeme açısından Girdap Akımı (Eddy Current) testinin çok doğru ve açıklayıcı bir sonuç vermemiştir.



Şekil 4.1. Girdap akımı (Eddy current) testi yapılan malzeme

4.2. Ultrasonik Testin Araştırma Sonucu

Testi yapılan uçak çeker kancasının gözle yapılan ilk kontrolünde malzemenin karmaşık yapıda olması, yüzeyinde bulunan cidar kaplamasının çok düzgün bir dağılım göstermemesi gibi nedenler aslında ultrasonik test yapmaya elverişli bir malzeme olmadığı yorumunu ilk etapta yaptırmaktadır.

Biliyoruz ki; test sırasında uygulanan ultrasonik dalgalar malzeme içeriğindeki ortamda yayıldığında, gerilim alanındaki dislokasyonun doğrusal olmayan titreşimi nedeniyle bozulmaya uğrar ve doğrusal olmayan ultrasonik davranışa neden olurlar (Wang et al., 2021). Bu durumda doğru bir bölgede süreksizlik bulunmasını engelleyebilir.

Şekil 4.2’de görülen test cihazının ekranında takip edilen titreşim, çok sayıdaki yansıma görüntüsü bu durumu biz göstermektedir.



Şekil 4.2. Test sırasında cihazda görülen değer

Ayrıca yapılan araştırmalarda eğer ultrasonik test yapılacak malzemeye yönelik uygun çap, şekil ve evsafa prop kullanımı da testin başarısında çok önemlidir (Görgün, 2022).

Ultrasonik muayene yöntemi yüzey kusurlarının tespitinde iyi bir performans sergilememektedir. Tek başına tahribatsız muayene yapılacak olan malzemeye bu testin yapılması da ayrıca elde edilecek verilerin çok doğru olmadığını da ortaya koymaktadır (Sevim, M. A., Çelt, A. C., Kabar, S., & Akgünlü, 2020).

Yapılan ultrasonik test kontrolü sonucunda malzemenin geometrik şeklinin uygunsuzluğu, yüzey pürüzlülüğü ve karmaşık yapıda olması nedeniyle süreksizliğin konumu belirlenememiştir. Sonuç alınamayan bir test işlemi olarak karşımıza çıkmıştır.

4.3. Radyografik Testin Araştırma Sonucu

Şekil 4.3'te görülen Radyografik teste tabi tutulan çeker kancası X-RAY çekim metodu ile kontrole başlanmıştır. Bu metotta dikkat edilmesi gereken en önemli husus radyasyona karşı güvenlik tedbirleridir. Söz konusu çekimi kurşun kapılar ardında olan kumanda odasında ve 38 cm beton-demir karışımı duvarların ardında radyasyon ölçer cihazlar eşliğinde emniyetli bir şekilde gerçekleştirmektedir.

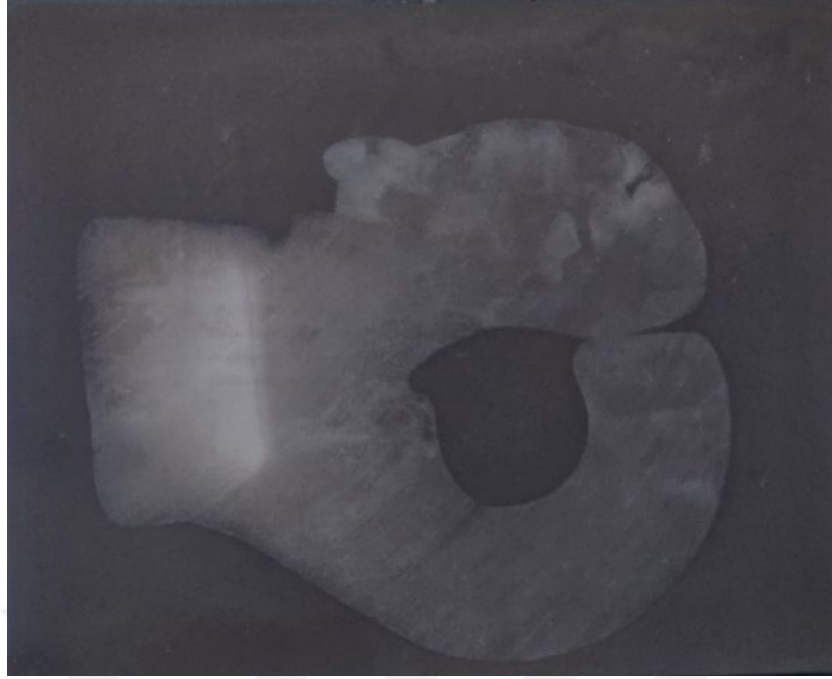


Şekil 4.3. Radyografik çekim

Tablo 4.1. Parametre değerleri

PARAMETRELER	AKIM DEĞERİ	SÜRE	VOLTAJ DEĞERİ	MESAFE
Test Değerleri	4 mA	90 sn	200 kV	0,9 m

Tablo 4.1’de belirtilen değerler ile yapılan çekimler sonrasında cihazın en üst değeri olan 200 kV test malzemesinin yapısı gereği çok iyi bir sonuç alınamamıştır. Nedeni ise test malzemesinin yapısı gereği çok yoğun bir alaşım olması ve kullanılan cihazın bu yoğunluktaki maddeye yeteri kadar nüfuz edememesidir.



Şekil 4.4. Film görüntüsü

Şekil 4.4'te görülen film incelendiğinde süreksizlik tam olarak yorumlanamamış ve sonuç alınamamıştır.

4.4. Sıvı Penetrant Testin Araştırma Sonucu

Sıvı penetrant testin uygulanması için gereksinimlerden birisi de test malzemesinin yüzeyini pürüzsüz olması ya da kimyasal dağlama işlemine maruz bırakılmasıdır. Penetrantın tanecik boyutu, ıslatma kabiliyeti, viskozitesi göz önüne alındığında test malzemesinde bulunan pürüzlerin arasına girerek ilgisiz belirti olması ve operatörü yanlış yönlendirmesi olasıdır.

Bununla birlikte son işlem basamağı olan son temizlik verimli bir şekilde yapılamayıp (malzemenin yüzey pürüzlülüğünden dolayı) bir süre sonra korozyona neden olup tahribatsız bir muayene yapılamamasına ve ilerleyen zamanlarda malzemenin hasarlı bir şekilde kullanıma sunulmasına neden olabilir. Söz konusu işlem basamakları şunlardır;

- Ön temizlik
- Penetrant uygulaması
- Fazla penetrantın temizlenmesi
- Developer uygulaması

- Kontrol
- Son temizlik

Penetrant işlem basamaklarından geçen çeker kancası son basamakta UV-A ışıklı karanlık odada incelendiğinde Şekil 4.5’de göz görülebilen fakat net olmayan belirtilen takip edilmiştir.



Şekil 4.5. Test sonrası takip edilen süreksizlikler

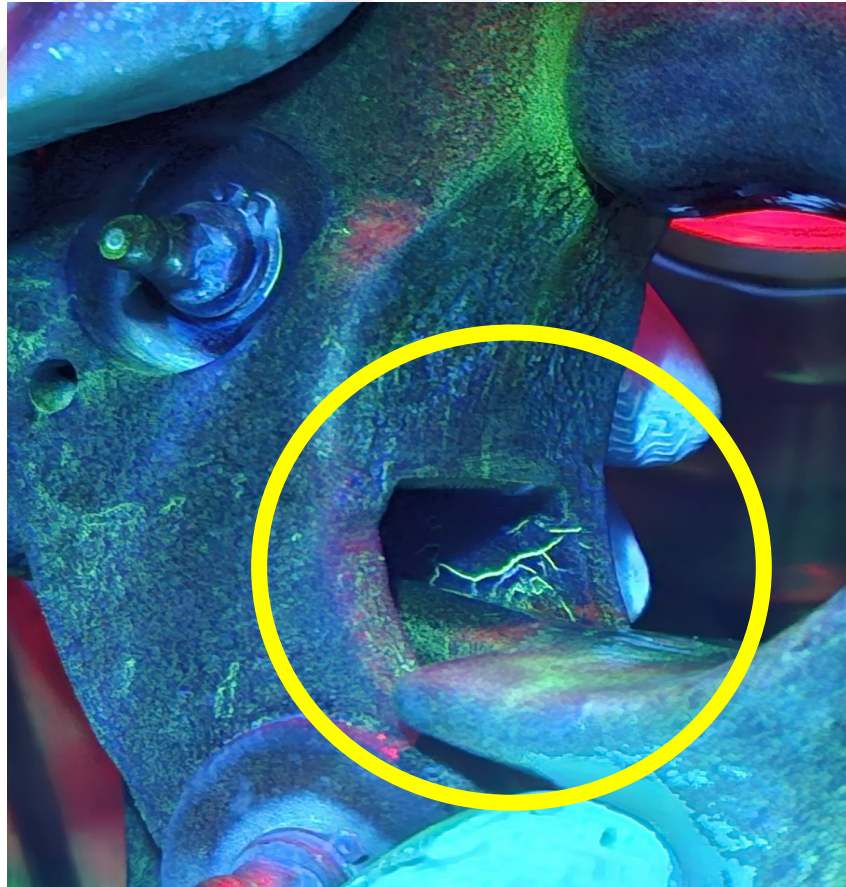
Uygulanan işlemler sonucunda tespit edilen süreksizlik belirtileri girdap akımı testi, ultrasonik test ve radyografi testlerine göre daha başarılı ve tatmin edici sonuçlar vermekle beraber malzemenin yüzeyinden kaynaklı çok sayıda ilgisiz belirti de gözlemlenmiştir.

4.5. Manyetik Parçacık Testin Araştırma Sonucu

Yapılan dört testin sonrasında üreticinin vermiş olduğu kontrol metodu olan manyetik parçacık testi uygulanmıştır. Uygulanma öncesinde ön temizlik detaylı bir şekilde yapılmıştır. Malzemenin kir ve yağdan arındırılması sağlanmış olup teste temiz bir şekilde başlanması sağlanmıştır. Bu temizliğin amaçları arasında örnek verilmesi gerekirse herhangi bir yağ kalıntısının söz konusu bir süreksizliği kapatabilme ihtimaline karşılık önlem alınmasıdır.

Ardından Gauss metre ile test öncesi malzemede herhangi bir manyetik alanın varlığına bakılmıştır. Manyetik alanın bulunmadığı tespit edilen malzeme test cihazının bobinine yerleştirilerek 1800 A şiddetinde akım uygulanmış ve manyetik alanın malzemeyi indüklenmesi sağlanmıştır. Eş zamanlı olarak floresan demir tozu tanecikli test sıvısı homojen bir şekilde uygulanarak test işlemi yapılmıştır.

Test işlemi sonrası Gauss metre ile tekrar manyetik alanın indüklendiği kontrol edildiğinde testin başarılı bir şekilde indükleme yaptığı görülmüştür. Akabinde UV-A lamba bulunan karanlık oda da incelemeye alınmıştır.



Şekil 4.6. Test sonrasında tespit edilen süreksizlik

İnceleme sonucunda diğer testlerde tam anlamıyla tespit edilemeyen süreksizlik Şekil 4.6'daki görüldüğü gibi açık ve net bir şekilde tespit edilmiştir. Tespit sonrası testin ilgili malzemede çok net bir şekilde başarılı bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Manyetik parçacık testi (MT), ferromanyetik malzemelerdeki yüzey ve yüzey altı çatlaklarını tespit etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Sözeri et al., 2023).

Ferromanyetik malzemelerdeki yüzey ve yüzeye yakın kusurları tespit etmek için olmazsa olmaz olan son derece hassas ve kullanıcı dostu bir tahribatsız tekniktir (Wu et al., 2024).

4.6. Analiz Sonuçları

4.6.1. Hesaplamaya Dayalı Analiz Sonuçları

Bizim ele aldığımız senaryoda ise uçağın yakıt yüklü olması ile yüksüz olması, açısal bakımdan konumlama durumlarına göre malzeme etkileri de ayrıca incelenmiştir.

İlk olarak uçağın çekim yapılabilmesi için Çekme Kuvveti hesaplaması Eşitlik 7'de belirtilen şekilde hesaplandı.

$$F = \mu m g \quad (7)$$

Sürtünme katsayısı (μ), yüzey tipine bağlıdır:

- **Beton pist:** $\mu \approx 0,02 - 0,05$
- **Asfalt pist:** $\mu \approx 0,03 - 0,06$
- **Çimen/zemin:** $\mu \approx 0,1 - 0,2$

Tüm hesaplamalarda pistin **Asfalt** olduğu göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapılacak olursa;

Uçak boş (yakıt yüklü değil) ise;

Uçağın kütlesi: $m = 12.473 \text{ kg}$

Yerçekimi ivmesi: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Asfalt pist için sürtünme katsayısı: $\mu = 0,04$ (Ortalama değer)

$$F = 0,04 \cdot 12.473 \cdot 9,81 \quad (8)$$

Eşitlik 8'deki gibi hesaplama yapıldığında boş uçak için çekme kuvveti Eşitlik 9'da gösterilmiştir.

$$F = 4.897,9 \text{ N} \approx 4,90 \text{ kN} \quad (9)$$

Uçak dolu (yakıt yüklü) ise;

Uçağın kütlesi: $m = 19.187 \text{ kg}$

Yerçekimi ivmesi: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

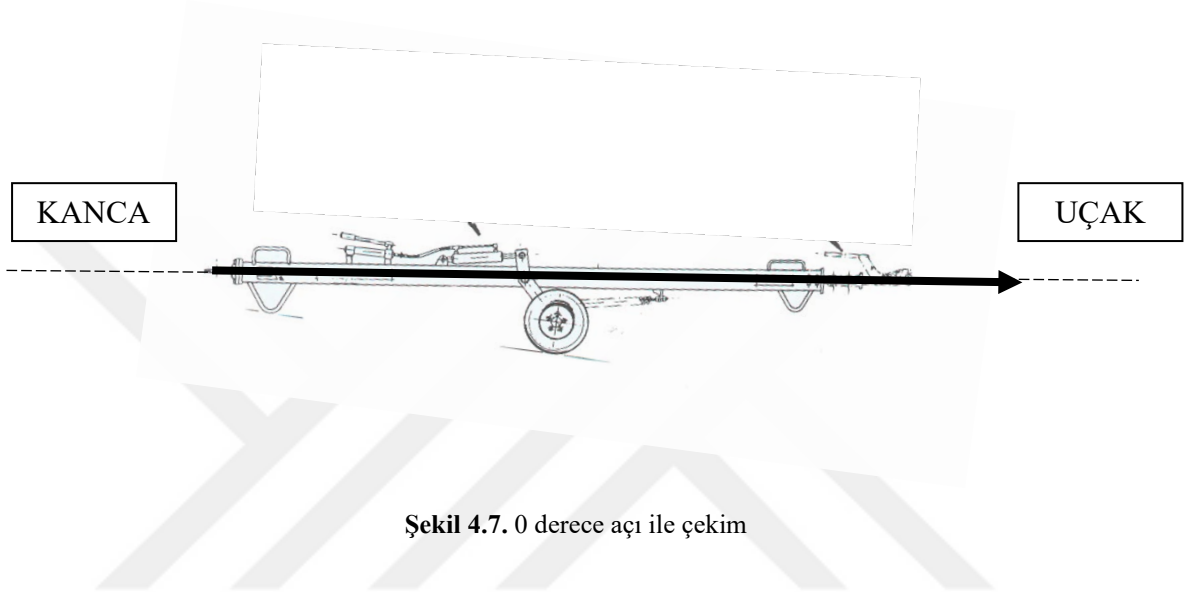
Asfalt pist için sürtünme katsayısı: $\mu = 0,04$ (Ortalama değer)

$$F = 0,04 \cdot 19.187,981 \quad (10)$$

Eşitlik 10'daki gibi hesaplama yapıldığında boş uçak için çekme kuvveti Eşitlik 11'de gösterilmiştir.

$$F = 7.531,6 \text{ N} \approx 7,53 \text{ kN} \quad (11)$$

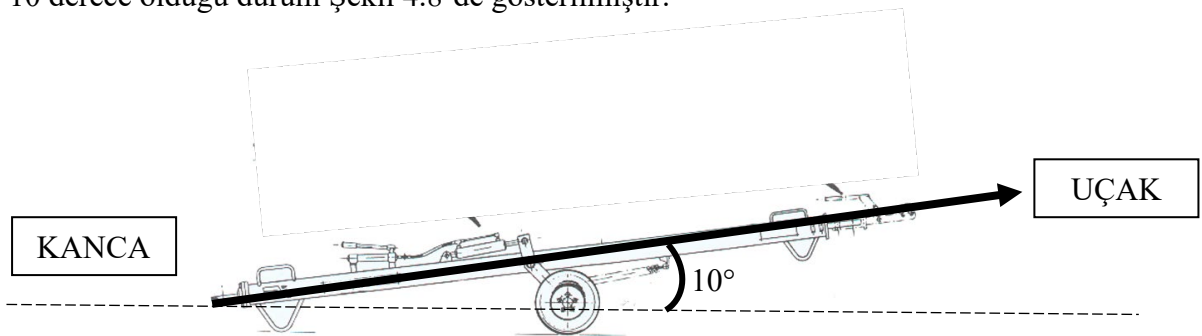
Uçak çeker kancası ile uçak arasındaki konumlamada çekim yapılan yüzey ile paralel olarak açı 0 derece olduğu durum Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. 0 derece açı ile çekim

0 derece ile çekim yapıldığında ihtiyaç olan Çekme Kuvveti; yakıt yüklü olmayan uçak için Eşitlik 9'da, yakıt yüklü uçak için ise Eşitlik 11'de hesaplanmıştır.

Uçak çeker kancası ile uçak arasındaki konumlamada çekim yapılan yüzey ile açı 10 derece olduğu durum Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. 10 derece açı ile çekim

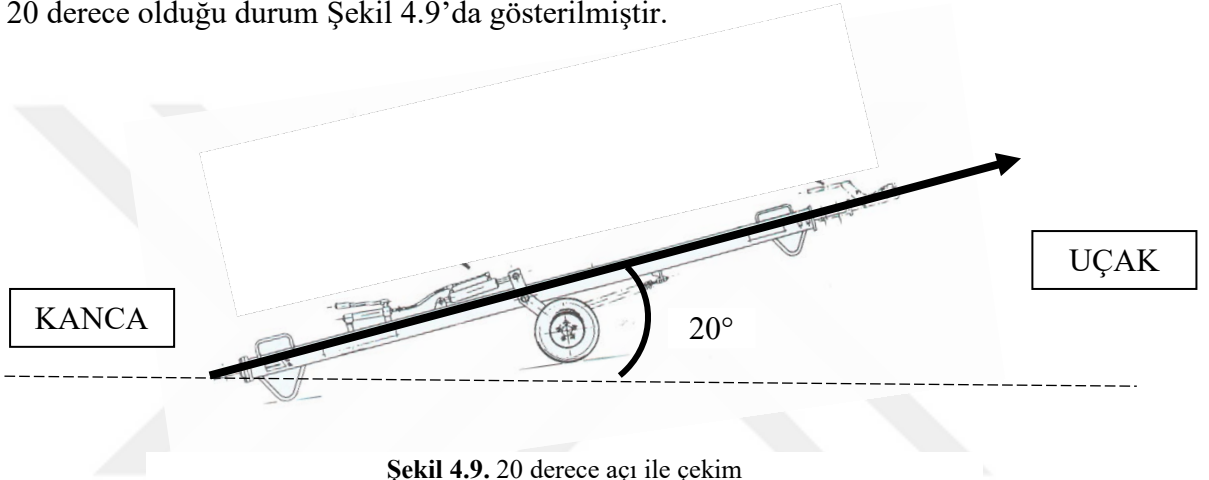
10 derecelik açı ile çekim hesaplaması yapılması durumunda uçak boş (yakıt yüklü değil) ise ihtiyaç olan Çekme Kuvveti hesaplaması Eşitlik 9'da elde edilen değer ile $\text{Cos}(10^\circ)$ çarpımıdır.

$$F = 4,90 \text{ Cos}(10^\circ) = 4,98 \text{ kN} \quad (12)$$

10 derecelik açı ile çekim hesaplaması yapılması durumunda uçak dolu (yakıt yüklü) ise ihtiyaç olan Çekme Kuvveti hesaplaması Eşitlik 11'de elde edilen değer ile $\text{Cos}(10^\circ)$ çarpımıdır.

$$F = 7,53 \text{ Cos}(10^\circ) = 7,65 \text{ kN} \quad (13)$$

Uçak çeker kancası ile uçak arasındaki konumlamada çekim yapılan yüzey ile açı 20 derece olduğu durum Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



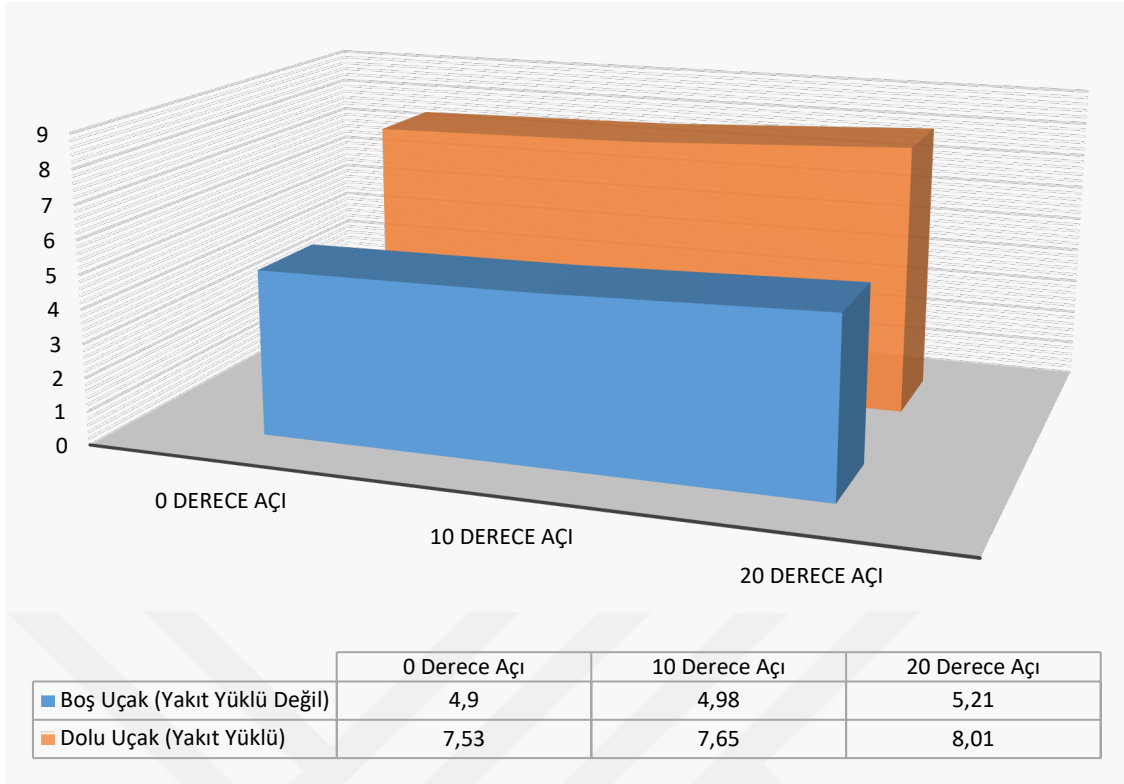
Şekil 4.9. 20 derece açı ile çekim

20 derecelik açı ile çekim hesaplaması yapılması durumunda uçak boş (yakıt yüklü değil) ise ihtiyaç olan Çekme Kuvveti hesaplaması Eşitlik 9'da elde edilen değer ile $\text{Cos}(20^\circ)$ çarpımıdır.

$$F = 4,90 \text{ Cos}(20^\circ) = 5,21 \text{ kN} \quad (14)$$

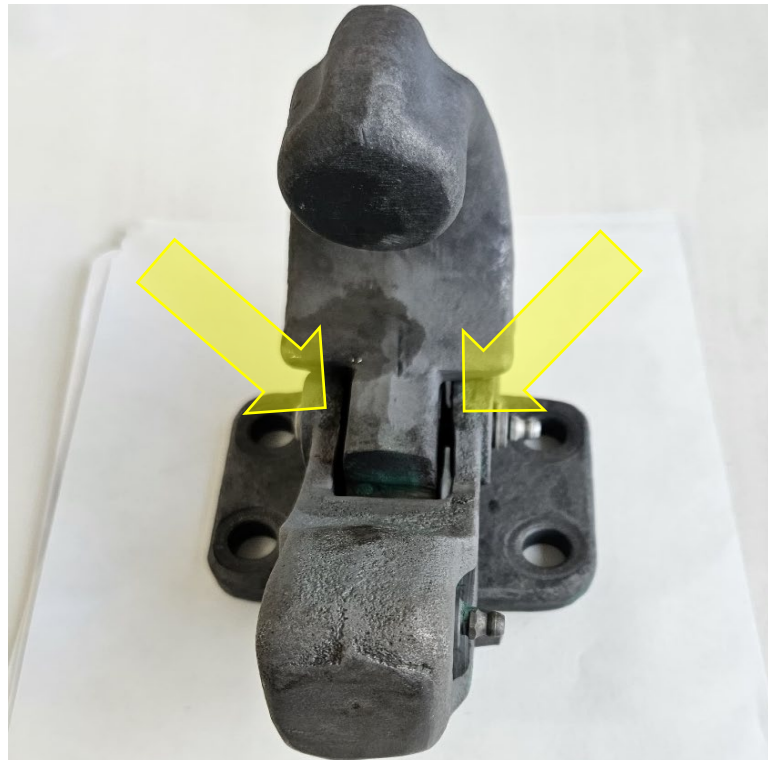
20 derecelik açı ile çekim hesaplaması yapılması durumunda uçak dolu (yakıt yüklü) ise ihtiyaç olan Çekme Kuvveti hesaplaması Eşitlik 11'de elde edilen değer ile $\text{Cos}(20^\circ)$ çarpımıdır.

$$F = 7,53 \text{ Cos}(20^\circ) = 8,01 \text{ kN} \quad (15)$$



Şekil 4.10. Değişen açiya bağlı olarak artan kuvvet

4.6.2. Malzeme Üzerinde Bulunan Pim Kısımının Analiz Sonuçları



Şekil 4.11. İki yüzey tarafından kesilen pim

Uçağın yakıt yüklü olması ile yüksüz olması, açısal bakımdan konumlama durumlarına göre inceleme yapılmıştır. Söz konusu değerler Şekil 4.10.'da görüldüğü gibidir. Uçak çeker kancası incelendiğinde Şekil 4.11.'deki gibi söz konusu pim iki yüzey tarafından kesildiğinden hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Kayma gerilmesi formülü Eşitlik 16'ya göre yapılmaktadır.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (16)$$

Eşitlik 16'ya göre yapılan hesaplamada çift kesme durumu olduğundan kesme alanı hesaplaması;

$$A = 2 \times \frac{\pi d^2}{4} = 2 \times \frac{\pi 5^2}{4} = 39,27 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

Hesaplanan tüm yük değerleri için sırasıyla kayma gerilmesi hesaplanırsa;

Uçağın boş olduğu yüklerden;

$$\tau = \frac{4.900}{39,27} = 124,78 \text{ MPa} \quad (18)$$

$$\tau = \frac{4.980}{39,27} = 126,81 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$\tau = \frac{5.210}{39,27} = 132,67 \text{ MPa} \quad (20)$$

Uçağın dolu olduğu yüklerden;

$$\tau = \frac{7.530}{39,27} = 191,75 \text{ MPa} \quad (21)$$

$$\tau = \frac{7.650}{39,27} = 194,81 \text{ MPa} \quad (22)$$

$$\tau = \frac{8.010}{39,27} = 203,97 \text{ MPa} \quad (23)$$

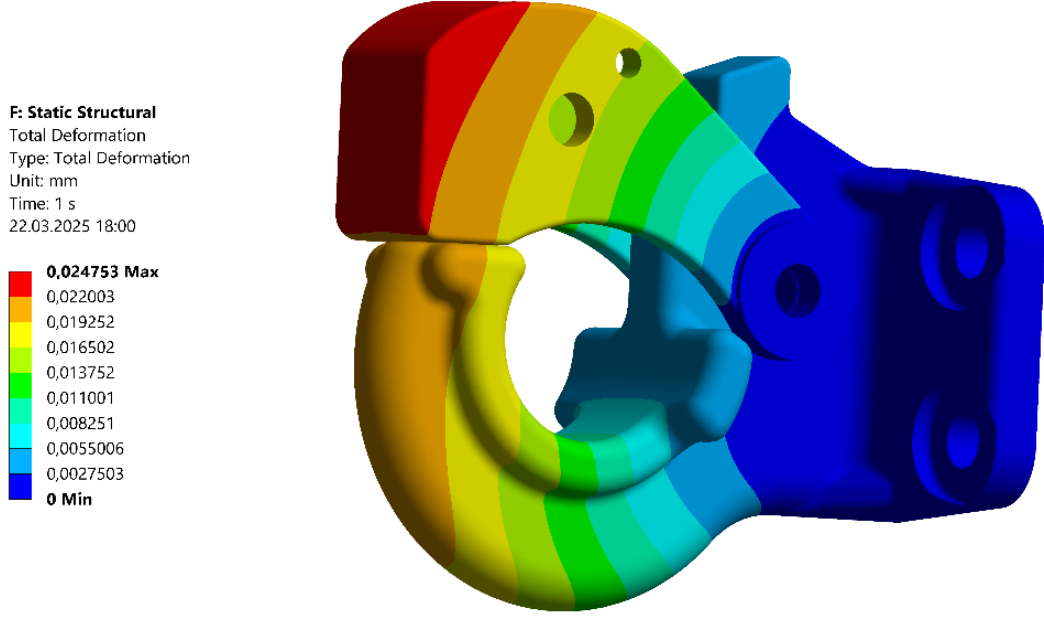
Tüm hesaplanan kayma gerilmesi sonuçları Tablo 3.6.'da bulunan mekanik değerlerden akma mukavemeti 690 MPa'dan küçük olduğu için kullanılan pimin güvenli olduğu görülmektedir.

4.6.3. ANSYS Analiz Programına Dayalı Analiz Sonuçları

ANSYS analiz programına dayalı analiz sonuçları irdelendiğinde hesaplama ve testlere dayalı, örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde;

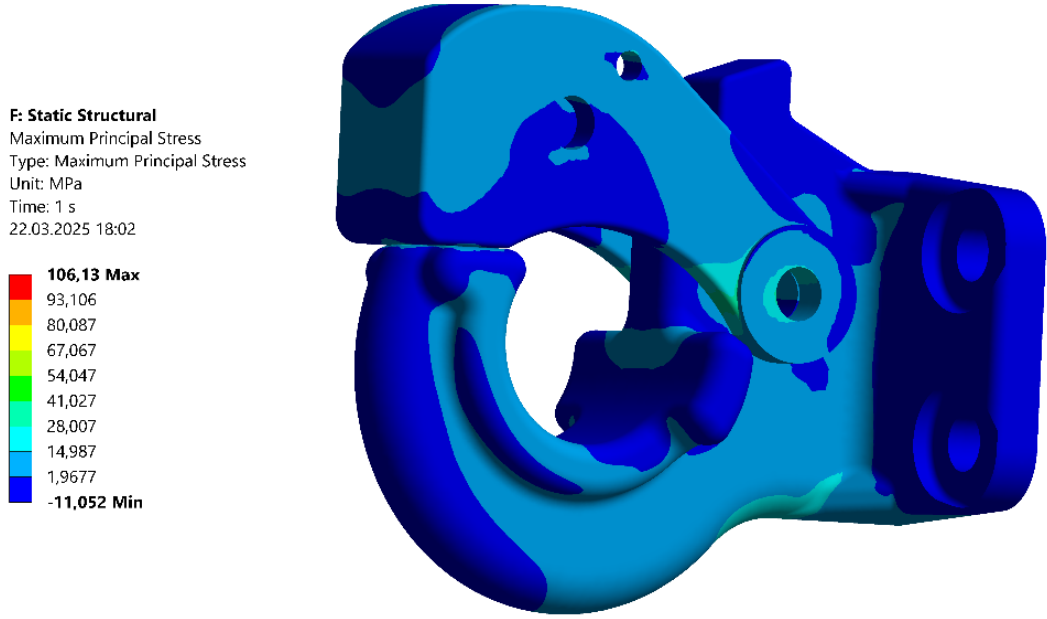
Toplam Deformasyon ile uygulanan kuvvete göre ne kadar yükseğe çekileceği görülmektedir. Şekil 4.12.'de maksimum yükselmenin olduğu yer kırmızı renkte, yani

düzgün artar kuvvet ile en çok gerilmeye maruz kaldığı yeri görmekteyiz. Minimum yükselmenin olduğu yer mavi renklerle gösterilmiştir. Tüm açı değişimlerinde de aynı sonuç elde edilmektedir. Etkilenen bölgeler değişmemektedir.



Şekil 4.12. Toplam deformasyon

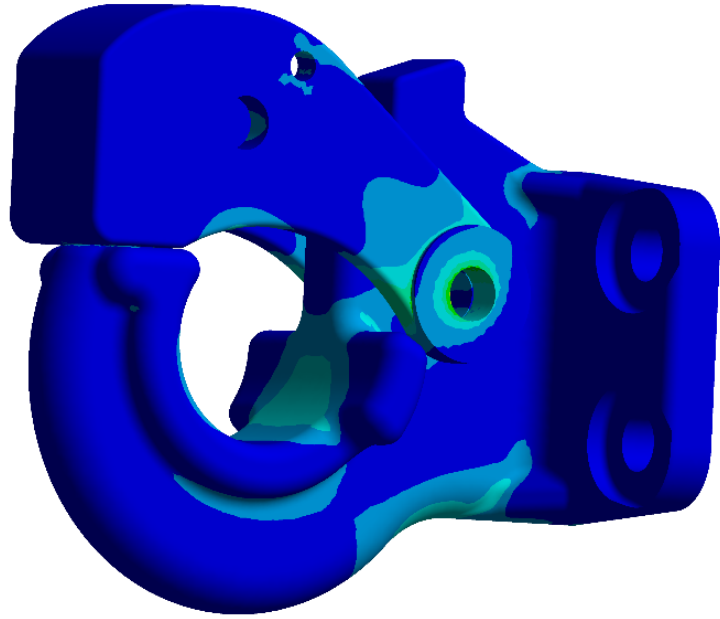
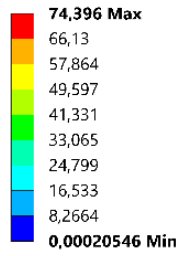
Malzemenin dayanımına karşılık olarak değerlendirilen ve akma noktasının gösterildiği En Büyük Asal Gerilme ile malzeme dayanımı sunulmuştur. Şekil 4.13.'te gösterilen ve mavi renkten en yoğun olarak belli olan yeşil renge doğru ilerleyen akma değeri bizim NDI sonuçlarında da edindiğimiz çatlak sonucuyla uyusmaktadır. Bu şekilde ANSYS analizi ile de sonucumuz desteklenmiş oldu. Ayrıca tüm açısal değişimlerde de sonuç yine aynı bölgede çatlak oluşma olasılığını ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 4.13. En büyük asal gerilme

Eşdeğer von-Mises gerilmesi Şekil 4.14.'te gösterilen şekilde uygulanmıştır. Buradan eşdeğer gerilmenin kancanın uç yani bağlantı kısmında maksimum, mavi olarak görülen yere minimum olduğu görülmektedir. Uçak çeker kancası için yapılan NDT testlerinden Sıvı Penetrant Test sonucunda gösterilen Şekil 4.5.'te kısmen, Manyetik Parçacık Test sonucunda gösterilen Şekil 4.6.'da oldukça belirli olan süreksizlik ile de oldukça örtüşen bu analizde yine bağlantı kısımlarının malzemede kırılmaya/çatlamaya karşı hassas olduğu görülmektedir.

F: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
22.03.2025 18:02



Şekil 4.14. Eşdeğer von-Mises gerilmesi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Hava aracı çeker kancasının geometrik şekli, malzemenin iç yapısı ve yüzeyin pürüzlülüğü göz önüne alındığında girdap akımı testinin, ultrasonik testin, radyografi testin ve sıvı penetrant testin çok verimli sonuçlar ortaya çıkarmadığı görülmüştür.

İncelenen malzemenin geometrik şekli, malzemenin iç yapısı, yüzeyin pürüzlülüğü ve malzeme yapısından kaynaklı ferromanyetik bir malzeme oluşu da manyetik parçacık testini yapmaya sevk etmiş ve akabinde de test sonucunda çok başarılı sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Ayrıca ANSYS analizleriyle de sonuç örtüşmüştür. Kuvvetin uygulama açısından bağımsız olarak malzeme üzerinde çatlağın görüldüğü bölgenin hassas olduğu, malzemenin zayıf bölgesi olduğu belirlenmiştir.

Çeker kancası bu çalışma neticesinde tespit edilen süreksizlik sebebiyle kullanım dışı bırakılmış, oluşacak ya da oluşması muhtemel bir istenmeyen olayın önüne geçilmiş, çeker kancasının yerine ikame olarak yenisi kullanılmaya başlamıştır.

Bu tür işlemlerin neticesinde tahribatsız muayenenin önemi ortaya çıkmış, olası bir kaza-kırımın önüne geçilerek emniyet sağlanmıştır.

Yanlış kullanım sonucu olarak ya da malzeme yorulmasına bağlı oluşması muhtemel olan süreksizliğin ilk başta imalat olarak döküm esnasında da olabilecek bir hata sonucu oluşabileceği de değerlendirilmiştir.

5.2. Öneriler

Üretilen ve kullanıma sunulan her teçhizat ve araçlarda zamanla bozulmaların olacağı asla unutulmamalıdır. Bu kapsamda malzemenin kullanım alanına bağlı olarak hayati derece önemli olanlardan başlamak kaydıyla rutin bir şekilde tahribatsız muayene testlerinin hayatın olağan akışına katılması gerekmektedir.

Test işlemi yapılması karar verilen malzemeye yönelik olarak amacın sadece süreksizlik tespiti olmamalıdır. Her ne kadar tahribatsız muayene de olsa yanlış malzemeye yanlış kullanılan test ve test ürünü parçada zarar verici etkisi de olabilir. Test öncesinde araştırmaların ve teknik dokümanların incelenmesi şarttır.

Test işlemlerinde;

- Testi yapan operatörün alanında yetkin olması, gerekli sertifikasyonlarının tam olması,

- Test için kullanılan araç, gereç ve teçhizatların tam ve faal olarak yeterli donanımda olması,
- Test edilecek parçaya ait parçayı üreten firmanın verdiği uygun kontrol yöntemlerinin seçilmesi,
- Malzemelerin kontrol periyotlarının aşılmaması gibi durumlar önem arz etmektedir.

Operasyonel alanda kullanılan uçak çeker kancasının sürekli olarak kontrol edilmesi esnasında zayıf bölgesi olarak görülen kısmın detaylı kontrol edilmesi, ilerleyen süreçte AR-GE çalışmalarının bu bölgede ağırlık gösterilmesi ayrıca önemlidir.

Havacılık kurallarının asla esnetilemez olduğu, en ufak bir hatanın can ve mal kaybına sebebiyet verdiği göz önünde bulundurularak tahribatsız muayenenin önemi kavranmış olup doğru ve etkin bir testin ne kadar başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çerçevede kullanım sırasında gerçekleşmesi muhtemel kaza kırımı önceden tespit edip zaman, ekonomi ve emniyet açısından katkılar sunulmuştur.

6. KAYNAKLAR

- Akay, S. K. (2000). *The physical principle of eddy current technic and its industrial applications*.
- D'Angelo, G., Laraccab, M., & Salvatore Ramponea. (n.d.). *Automated Eddy Current Non-Destructive Testing through Low Definition Lissajous Figures*.
- Deng, Z., Kang, Y., Zhang, J., & Song, K. (2018). Multi-source effect in magnetizing-based eddy current testing sensor for surface crack in ferromagnetic materials. *Sensors and Actuators A: Physical*, 271, 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.009>
- Görgün, E. (2022). Ultrasonik Muayene Prob Çaplarının Darbe Yankı Değerine Etkisinin Araştırılması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 381–389. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1077386>
- Hussin, R., Ismail, N., & Mustapa, S. (2016). A study of foreign object damage (FOD) and prevention method at the airport and aircraft maintenance area. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 152, 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012038>
- Jodhani, J., Handa, A., Gautam, A., Ashwni, & Rana, R. (2023). Ultrasonic non-destructive evaluation of composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 78, 627–632. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.12.055>
- Kılıç, O. (2019). *Marmaray Demiryolu Hattında Ray Kusurlarının Ultrasonik Yöntemle İncelenmesi Ve Ray Kusurlarının Hattın Hangi Kısımlarında Yoğunlaştığının Tespiti*. 115.
- Li, E., Guo, W., Cao, X., & Zhu, J. (2024). A magnetic head-based eddy current array for defect detection in ferromagnetic steels. *Sensors and Actuators A: Physical*, 379, 115862. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115862>
- Lopez, A., Bacelar, R., Pires, I., Santos, T. G., Sousa, J. P., & Quintino, L. (2018). Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, 298–306. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.03.020>
- Masniza, Y., Zulfabli, H. M., Amarul, T., Khairunnisa, S. N., Zilawati, N. A. R. N. N., Nazera, D., & Ismalina, H. N. (2019). *Potential FOD defects on the composite material*. 020056. <https://doi.org/10.1063/1.5118064>
- Sevim, M. A., Çelt, A. C., Kabar, S., & Akgünlü, Ö. (2020). Demiryollarında raylara uygulanan tahribatsız muayene yöntemleri. *Demiryolu Mühendisliği*, 60–74.
- Shiotani, T., Ogura, N., Okude, N., Watabe, K., Van Steen, C., Tsangouri, E., Lacidogna, G., Czarnecki, S., Chai, H. K., Yang, Y., Verstrynge, E., & Aggelis, D. G. (2024). Non-destructive inspection technologies for repair assessment in materials and structures. *Developments in the Built Environment*, 18, 100443. <https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2024.100443>
- Shipway, N. J., Huthwaite, P., Lowe, M. J. S., & Barden, T. J. (2021). Using ResNets to perform automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection. *NDT & E International*, 119, 102400. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2020.102400>
- Smoqi, Z., Sotelo, L. D., Gaikwad, A., Turner, J. A., & Rao, P. (2023). Ultrasonic nondestructive evaluation of additively manufactured wear coatings. *NDT & E International*, 133, 102754. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102754>
- Sözeri, V., Keskin, O., Harmanşah, C., Kozak, İ., & Kibar, E. N. (2023). Görüntü İşleme Algoritmalarına Dayalı Olarak Manyetik Parçacık Test Görüntülerinde Kusur Tespitinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 23(1), 115–122. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1173473>

- Tsopelas, N., & Siakavellas, N. J. (2011). Experimental evaluation of electromagnetic-thermal non-destructive inspection by eddy current thermography in square aluminum plates. *NDT & E International*, 44(7), 609–620. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2011.06.006>
- Wang, J. J., Wen, Z. X., Pei, H. Q., Gu, S. N., Zhang, C. J., & Yue, Z. F. (2021). Thermal damage evaluation of nickel-based superalloys based on ultrasonic nondestructive testing. *Applied Acoustics*, 183, 108329. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108329>
- Wenner, C. A., & Drury, C. G. (2000). Analyzing human error in aircraft ground damage incidents. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26(2), 177–199. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(99\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(99)00065-7)
- Wu, Q., Dong, K., Qin, X., Hu, Z., & Xiong, X. (2024). Magnetic particle inspection: Status, advances, and challenges — Demands for automatic non-destructive testing. *NDT and E International*, 143, 103030. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.103030>

