

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HAVACILIK YAPILARININ BİRLEŞTİRİLMESİNDE KOMPOZİT
VE METAL PERÇİN BAĞLAYICILARIN MEKANİK DAVRANIŞA
ETKİSİNİN ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

UĞUR ŞEVVAL GÖK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA- 2025

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HAVACILIK YAPILARININ BİRLEŞTİRİLMESİNDE KOMPOZİT
VE METAL PERÇİN BAĞLAYICILARIN MEKANİK DAVRANIŞA
ETKİSİNİN ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

UĞUR ŞEVVAL GÖK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. ÖMER FARUK ELALDI

ANKARA - 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Uğur Şevval GÖK tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: ... / ... /

Tez Adı: Havacılık Yapılarının Birleştirilmesinde Kompozit ve Metal Perçin Bağlayıcıların Mekanik Davranışa Etkisinin Analizi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı – Soyadı, Kurumu)		İmza
Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı	Başkent Üniversitesi	
Prof. Dr. Ahmet Hakan Argeşo	Atılım Üniversitesi	
Dr. Öğr. Üyesi Cenk Balçık	Başkent Üniversitesi	

ONAY

Prof. Dr. Dilek Çökeliler Serdaroğlu
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 18 / 11 / 2025

Öğrencinin Adı, Soyadı: Uğur Şevval GÖK

Öğrencinin Numarası: 22210305

Anabilim Dalı: Savunma Teknolojileri ve Sistemleri

Programı: Savunma Platformları

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Ö. Faruk ELALDI

Tez Başlığı: Havacılık Yapılarının Birleştirilmesinde Kompozit ve Metal Perçin Bağlayıcıların Mekanik Davranışa Etkisinin Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 70 sayfalık kısmına ilişkin, 18.11.2025 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: 18 / 11 / 2025

Öğrenci Danışmanı:

Prof. Dr. Ö. Faruk ELALDI

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilgi, deneyim ve rehberliğiyle bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Ö. Faruk ELALDI'ya teşekkür ederim. Tüm eğitim hayatım boyunca beni yüreklendiren, bana motivasyon sağlayan aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecimin son döneminde hayatıma girerek her şeyi çok daha güzelleştiren canım yeğenim Timur'a bana kattığı motivasyon, enerji ve varlığıyla saçtığı umut için sonsuz teşekkür ederim.

Canım arkadaşım Zeynep, aramızdaki mesafelerin önemi olmadığını bu süreçte de bir kez daha birbirimize kanıtladık. Yıllardır değişmeyen desteğin, neşen ve inancın için gönülden teşekkür ederim.

Tezimin ortaya çıkmasında katkılarını esirgemeyen Erhan ÇİFTÇİ'ye süreç boyunca sağladığı destek için teşekkür ederim.

Çalışmanın gerçekleşmesi için gerekli altyapı olanaklarını sunarak bana destek olan TUSAŞ'a teşekkür ederim.

Bu tezin ortaya çıkmasında emeği geçen ve desteklerini esirgemeyen başta iş arkadaşlarıma ve yakın çevreme içtenlikle teşekkür ederim.

ÖZET

Uğur Şevval GÖK

HAVACILIK YAPILARININ BİRLEŞTİRİLMESİNDE KOMPOZİT VE METAL PERÇİN BAĞLAYICILARIN MEKANİK DAVRANIŞA ETKİSİNİN ANALİZİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı

2025

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte termoplastik kompozit malzemelerin kullanım alanları giderek artmaktadır. Bu çalışma kapsamında, havacılık endüstrisinde kullanılan yapısal bağlantılarda termoplastik kompozit perçinlerin mekanik davranışları metal perçinlere alternatif olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı özellikle, düşük ağırlıkta yüksek dayanım gereksinimi olan hava aracı platformlarında hafiflik ve dayanım kriterleri göz önünde bulundurularak en uygun bağlayıcı tipini belirlemektir. Bu kapsamda karbon fiber takviyeli polietilen keton (CF/PEKK) malzemesinden üretilen termoplastik kompozit perçinler, eşdeğer geometriye sahip alüminyum alaşımlı perçinlerle deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmada, tek bindirmeli kesme testi numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testinden elde edilen yük-yer değiştirme değerleri gerilme- gerinim değerlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen bu veriler yardımıyla oluşturulan grafikler incelenerek CF/PEKK ve alüminyum perçinlerin mekanik davranışları karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarının doğrulanması amacıyla söz konusu test numunesi geometrisine Altair/HyperMesh yazılımında Optistruct çözücüsü kullanılarak sonlu elemanlar analizi (FEM) yapılmıştır.

Deneysel ve sayısal analiz sonuçları doğrultusunda kompozit perçinlerin metal perçinlere göre daha yüksek akma dayanımına ve daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda kompozit malzemelerin deney esnasında kademeli hasara uğrayarak yarı-sünek davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, CF/PEKK kompozit perçinlerin metal perçinlere güçlü bir alternatif oluşturabileceği sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Kompozit, Termoplastik, CF/PEKK, Perçin, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

Uğur Şevval GÖK

ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPOSITE AND METAL RIVET FASTENERS IN JOINING OF AEROSPACE STRUCTURES

Başkent University Institute of Science

Department of Defense Technologies and Systems

2025

With the advancement of modern technologies, the use of thermoplastic composite materials has been steadily expanding across various engineering applications. In this study, the mechanical behavior of thermoplastic composite rivets was investigated as an alternative to metallic rivets in structural joints. The primary objective of the research is to determine the most suitable fastener type for aerospace platforms, where low weight and high strength are critical design requirements. In this context, thermoplastic composite rivets manufactured from carbon fiber reinforced poly-ether ketone ketone (CF/PEKK) were compared with aluminum alloy rivets of equivalent geometry.

In the experimental program, single-lap shear test specimens were prepared and subjected to tensile loading. The load–displacement data obtained from the tests were converted into stress–strain curves, enabling a comparative evaluation of the mechanical behaviors of CF/PEKK and aluminum rivets. To validate the experimental results, a finite element analysis (FEM) was conducted on the same test specimen configuration using the OptiStruct solver within the Altair HyperMesh environment.

Based on both experimental and numerical findings, it was determined that composite rivets exhibit higher yield strength and greater energy absorption capacity compared to metallic rivets. Additionally, the composite rivets demonstrated a progressive damage pattern, displaying pseudo-ductile behavior during loading. Considering these results, it can be concluded that CF/PEKK composite rivets hold strong potential as a robust alternative to traditional metallic rivets.

KEYWORDS: Composite, Thermoplastic, CF/PEKK, Rivet, Finite Element Analysis

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozit Malzemenin Tanımı.....	1
1.2. Bağlantı Yöntemleri	1
1.2.1 Mekanik bağlantılar.....	1
1.2.2. Mekanik bağlantı çeşitleri	2
1.2.3. Perçin nedir?	2
1.2.4. Perçin montaj yöntemleri	3
1.2.5. Metalik perçinler	4
1.2.6. Kompozit perçinler.....	5
1.2. Literatür Taraması.....	6
1.3. Amaç	16
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	18
2.1. Test Numunelerinin Hazırlanması.....	18
2.2. Malzeme Seçimi ve Üretimi	19
2.3. Deneyin Yapılışı.....	22
3. SAYISAL ANALİZ	28
3.1 Mesh Yapısı.....	28
3.2 Yükleme Şekli ve Sınır Koşulları	30
3.3 Sonlu Elemanlar (Altair OptiStruct) Programının Uygulaması.....	32

4. ELDE EDİLEN BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	35
4.1. Deneysel Sonuçlar.....	35
4.2. FEM Analizi Sonuçları	43
4.3. Deneysel Sonuçların ve FEM Analizinin Karşılaştırılması	47
5. SONUÇ	49
KAYNAKLAR.....	52



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Analiz Modelindeki Eleman Sayıları	33
Tablo 4.1. Alüminyum Perçin Deney Sonuçları.....	36
Tablo 4.2. CF/PEKK Perçin Deney Sonuçları	40
Tablo 4.3. CF/PEKK FEM Analizi ve Deneysel Sonuç Kıyaslaması.....	48



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1.Mekanik Bağlayıcılar	2
Şekil 1.2. Perçin Tipler	3
Şekil 1.3. Katı Perçin Montajı	4
Şekil 1.4. Çekmeli Perçin Montaj Örneği.....	4
Şekil 1.5. a) Kompozit Perçin b)Kompozit Plakada Perçin Yapısı	6
Şekil 1.6. Kopma Sonrası Perçinlerde Oluşan Mikro Yapı	8
Şekil 1.7. Perçin Hasar Analizi	9
Şekil 1.8. Kompozit Perçin Pultrüzyon İmalatı.....	9
Şekil 1.9. Perçin Ölçüleri.....	10
Şekil 1.10. Kompozit Perçin Montaj Yöntemi	10
Şekil 1.11. UD Kompozit Perçinlerde Montaj Sonrası Morfoloji.....	11
Şekil 1.12. Kayma Testi Sonrası Oluşan Yapısal Hasar	11
Şekil 1.13. CF/PEEK UD Kompozit Perçin Yapı ve Morfolojisi	13
Şekil 1.14. Örgü ve UD modelli CF/PEKK Kompozit Perçin Morfolojisi	14
Şekil 2.1. Kompozit Pim Teknik Çizimi	18
Şekil 2.2. Çelik Plakalar Teknik Çizimi	19
Şekil 2.3. Test Numunesi Teknik Çizimi	19
Şekil 2.4. Alüminyum Perçin Montajı Yapılmış Test Numunesi.....	20
Şekil 2.5. CF/PEKK Kompozit Pimler.....	21
Şekil 2.6. CF/PEKK Perçin Test Numune Seti	22

Şekil 2.7. Alüminyum Perçin Test Numune Seti	22
Şekil 2.8. Deney Öncesi Numune Yerleşimleri.....	23
Şekil 2.9. Kopması Gerçekleşen Alüminyum Perçin Numunesi.....	24
Şekil 2.10. Kompozit Perçin Deney Öncesi ve Sonrası Yerleşimi.....	25
Şekil 2.11. Alüminyum Perçin Yük-Deplasman Grafiği.....	25
Şekil 2.12. CF/PEKK Perçin Yük-Deplasman Grafiği.....	26
Şekil 2.13. Deney Sonrası CF/PEKK Perçinde Gözle Görünür Deformasyon	26
Şekil 2.14. Deney Öncesi Eksenel Yükleme Önleyici Metal Plakalar.....	27
Şekil 3.1. Analiz Modeli.....	28
Şekil 3.4. Yük Koşulları	30
Şekil 3.5. Çelik Plakalar Üzerine Analizi İyileştirmek İçin Atılan Pul Gösterimi.....	30
Şekil 3.6. Kesitleri Ayrılmış Kompozit Pim Modeli.....	31
Şekil 3.7. Pim ve Plakalarda TIE Kontak Gösterimi.....	31
Şekil 3.8. CF/PEKK Malzeme Verileri	32
Şekil 3.9. PH13-8Mo Çelik Malzeme Özellikleri	32
Şekil 4.1. Alüminyum Perçin Kayma Gerilim-Gerinim Grafiği	36
Şekil 4.2. Alüminyum Perçin Ortalama Kayma Gerilim-Gerinim Grafiği	37
Şekil 4.3. Kopmaya uğrayan Alüminyum Perçinli Numuneler.....	38
Şekil 4.4. Alüminyum Delik Deformasyonları.....	38
Şekil 4.5. CF/PEKK Perçin Kayma Gerilim-Gerinim Grafiği	39
Şekil 4.6. CF/PEKK Ortalama Kayma Gerilim-Gerinim Grafiği	40
Şekil 4.7. Çekme Testi Sonrası CF/PEKK Numuneleri	41
Şekil 4.8. CF/PEKK Perçinlerdeki Plastik Deformasyon.....	42

Şekil 4.9. CF/PEKK Perçinlerde Deney Sonrası Hasar.....	42
Şekil 4.10. Deney Sonrası Numunelerde Meydana Gelen Yatak Hasarları	43
Şekil 4.11. Plaka Üzerinde 1. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı	44
Şekil 4.12. Plaka Üzerinde 3. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı	44
Şekil 4.13. Plaka Üzerinde 5. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı	45
Şekil 4.14. Pim Üzerinde 1. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı.....	45
Şekil 4.15. Pim Üzerinde 3. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı.....	46
Şekil 4.16. Pim Üzerinde 5. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı.....	46
Şekil 4.17. CF/PEKK Perçinde Meydana Gelen Yer Değiştirme Dağılımı	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

CFRP: Karbon Fiber Takviyeli Polimer

FDM: Eklemeli İmalat

CCF/Onyx

CF/PEEK: Karbon Fiber takviyeli Polyether Ether Kethone

CF/PEKK: Karbon Fiber Polyether Ethere Ketone Keton

UD: Tek yönlü (Unidirectional)

FEM: Sonlu Elemanlar Analizi

SPC: Single Point Constraint

RBE3: Rigid Body Element 3

PSOLID: Property for Solid Elements

NLParm: Non-Linear Parameters

τ : Kayma Gerilimi

τ_{ave} : Ortalama Kayma Gerilimi

γ : Kayma Gerinimi

ν : Poisson Oranı

σ : Normal Gerilim

π : Pi Sayısı

D: Anlık Perçin Çapı

D₀: Başlangıç Anındaki Perçin Çapı

G: Kayma Modülü

E: Elastisite (Young) Modülü

U_e: Elastik Bölgede Depolanan Enerji

U_t: Tokluk

γ_y : Kayma Akma Gerinimi

E₁: 0° yönünde elastisite modülü

E₂: 90° yönünde elastisite modülü

G₁: Kayma Düzlemi üzerindeki kayma modülü

1. GİRİŞ

1.1.Kompozit Malzemenin Tanımı

Kompozit malzemeler günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin yaygın kullanıldığı alanlar, platformlarda ağırlık faktörünün büyük etkiye sahip olduğu bölgelerdir [1,2]. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, hafiflik ve dayanıklılık sunan, genellikle fiberler (karbon, cam, aramid gibi) ve bir matris malzemesinin (genellikle reçine) birleşiminden oluşan malzemelerdir.

1.2.Bağlantı Yöntemleri

Yapısal parçaların birleştirilmesinde bileşenlerin dayanıklılığı, maruz kaldığı yüklemeler, malzeme özellikleri gibi pek çok farklı etmen göz önünde bulundurulmalıdır. Birleştirilme yöntemleri temelde bakıldığında 3 başlıkta incelenebilir;

- Mekanik bağlantılar
- Yapıştırıcı bağlantılar
- Hibrit bağlantılar

1.2.1 Mekanik bağlantılar

Birden fazla yapıyı bir arada tutmaya yarayan ekstra parçaların kullanıldığı bağlantı tipidir. Mekanik bağlayıcılar bağlantı tipine göre sökülebilir ve kalıcı olarak ikiye ayrılır. Kalıcı mekanik bağlayıcılar demonte edilirken parçaları tahrip edici yöntemler kullanılırken sökülebilir bağlayıcılar çeşitli aletler yardımıyla kolayca demonte edilebilmektedir. Şekil 1.1 üzerinde çeşitli mekanik bağlayıcılar gösterilmiştir.



Şekil 1.1.Mekanik Bağlayıcılar

1.2.2. Mekanik bağlantı çeşitleri

Kalıcı Bağlantılar

Kalıcı bağlantılar; bağlayıcıya ya da yapısal bileşene zarar vermeden demonte edilemeyen bağlantı elemanlarıdır. Birleştirme işleminden sonra parçaları ayırmak için; delme, kesme ya da başka tahrip edici yöntemler kullanılmaktadır.

Kalıcı bağlantılara; perçin, kaynak bağlantısı, lehim bağlantısı, sıkı geçme bağlantıları örnek verilebilir.

Sökülebilir bağlantılar

Sökülebilir bağlantılar; montaj ve demontaj işlemlerinde yapıda tahribe sebebiyet vermeden kullanılabilir. Bakım onarım işlemlerinde kolaylık sağlamaktadır.

Sökülebilir bağlantılara; cıvata-somun, vidalı bağlayıcılar, pim ve klipsler gibi bağlantı yöntemleri örnek verilebilir.

1.2.3. Perçin nedir?

Birden fazla parçayı kalıcı olarak birleştirmekte kullanılan bir bağlayıcı çeşididir. Perçinler temelde üç bölgeden oluşur. Perçin kuyruk kısmından delikten geçirilir kafa kısmı dışarda kalacak şekilde yerleştirilir. Kuyruk kısmından çeşitli yöntemlerle şişirilerek gövdesi delikte sabitlenir. Perçinler montaj şekillerine ve yapılarına göre çeşitlere ayrılır. (**Şekil 1.2**)

Perçin Çeşitleri

1. Katı Perçin: Tek parça halinde olan ve çekiç veya pres kullanılarak baş kısmının oluşturulması için uç kısmı genişletilen perçinlerdir. Genellikle ağır yük taşıyan yapılarda kullanılır.

2. Tüp Perçin: İç kısmı kısmen boş olan ve montajı daha kolay olan perçinlerdir.
3. Kör Perçin: Tek taraflı erişim gerektiren yerlerde kullanılan perçinlerdir. Bir alet yardımıyla perçin gövdesinin içindeki çiviye çekerek genişletme işlemi yapılır. Kör perçinler arkasını göremediğiniz veya erişemediğiniz iki veya daha fazla parçayı perçinlemek için kullanılabilir.
4. Patlama Perçin: Kör perçinlere benzer şekilde çalışır ancak montaj sırasında baş kısmı patlayarak genişler ve daha geniş bir yüzey sağlar.



Şekil 1.2. Perçin Tipler

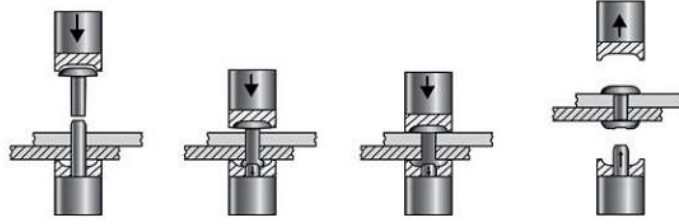
1.2.4. Perçin montaj yöntemleri

Perçinler kalıcı bağlantıyı sağlamak için perçin çeşidine göre farklı montaj sistemlerine sahiptir.[3]

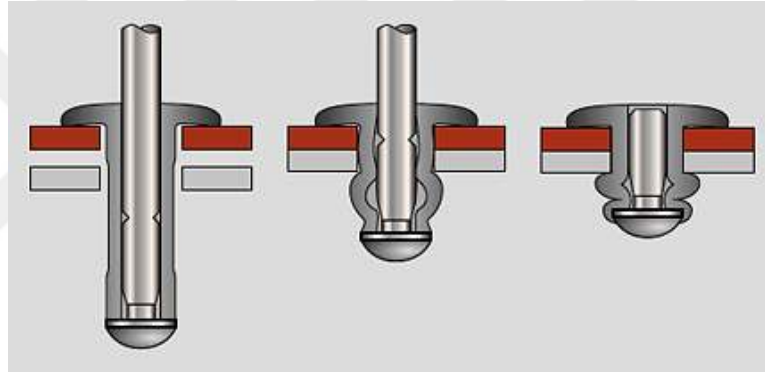
Soğuk perçinleme yöntemi en temel perçinleme yöntemidir. Genellikle kör perçinlerde kullanılır. Oda sıcaklığında perçine kuvvet uygulanarak perçinin iki yapı arasında şişmesi sağlanır. (Şekil 1.3)

Sıcak perçinleme yöntemi malzemenin plastik deformasyon özelliğinden yararlanılarak monte edilir. Perçin plastik deformasyon sıcaklığına ulaştırılarak monte edilir.

Çekmeli Perçinleme yöntemi yapının iki yüzeyine erişim bulunmadığı zamanlarda kullanılan tek taraflı perçinleme yöntemidir. Perçin tabancası kullanılarak montaj yapılır. (Şekil 1.4)



Şekil 1.3. Katı Perçin Montajı



Şekil 1.4. Çekmeli Perçin Montaj Örneği

1.2.5. Metalik perçinler

Perçinler genellikle yük taşıması ve yük dayanımı sağlaması amacıyla metalik malzemelerden üretilir. Metal perçinlerin havacılıkta kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir:

Uçak gövde ve Kanatlar: İç ve dış yapılarının birleştirilmesi

İniş Takımları: Yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren iniş takımları bağlantılarında kullanılır.

Motor Montajları: Motorların gövdeye bağlanmasında perçinler kullanılır. Motor bağlantılarının güvenilirliğini sağlar.

İç Mekân Yapıları: Kokpit, kabin ve diğer iç mekân bileşenlerindeki sızdırmazlık ihtiyacı olan montajlarda kullanılır. Çift yönlü erişim imkânı olmayan bölgelerde kör perçinlerin kullanımı montaj açısından kolaylık sağlar.

1.2.6. Kompozit perçinler

Havacılık endüstrisinde kompozit perçinlerin yaygın olarak kullanımı henüz söz konusu olmamakla birlikte araştırma geliştirme çalışmaları devam etmektedir. **Şekil 1.5**'te deneysel çalışma kapsamında tasarlanmış kompozit perçin prototipi ve plaka üzerinde montaj edilmiş hali görülmektedir.

Tasarımcıları kompozit perçin kullanımına iten önemli etkenler vardır. Hava araçlarında bağlantı elamanlarının toplam ağırlığı platformun toplam ağırlığının yaklaşık %2-5'ini oluşturmaktadır. Bu oran yakıt verimliliği açısından da yüksek öneme sahiptir. Bu sebeple bağlantı elemanlarında ağırlık faktörü göz önüne alınarak kompozit malzemeler üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Kompozit perçinlerin kullanımı, metal perçinlerin kullanımı ile kıyaslandığında ağırlık avantajının yanı sıra başka avantajlara da sahiptir.

Kompozit malzemelerin termal genleşme katsayıları genellikle metallerden daha düşüktür. Genleşme katsayıları fiberlerin yönelimine bağlıdır. Termal genleşme katsayılarının düşüklüğü uyumlu malzemelerle kullanıldığı zaman gerilme çatlağı riskini azaltır.

Kompozit malzemeler korozyona karşı metallerden daha dayanıklıdır. Nemli ve zorlu çevresel şartlara sahip bölgelerde metallerden daha uzun süreli, yüksek dayanıma sahip olurlar.

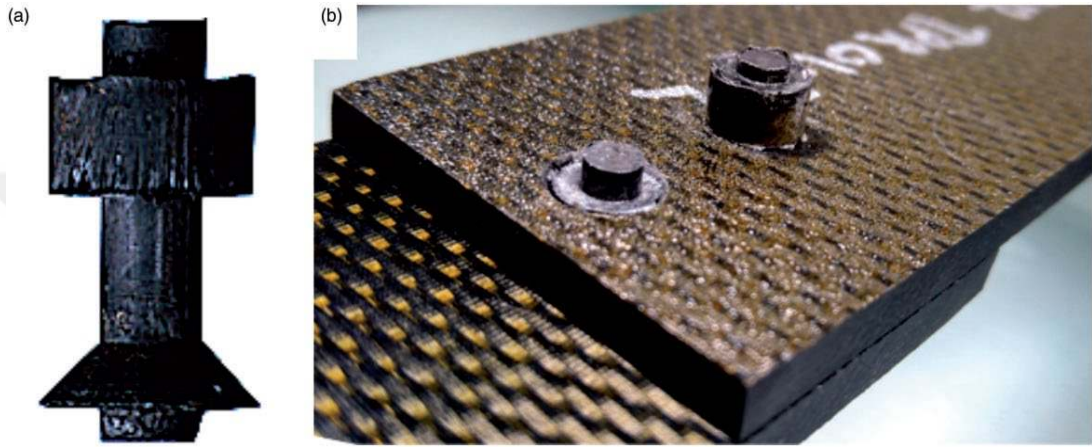
Elektriksel yalıtıma uçağın belirli bölgelerinde ihtiyaç duyulur, bu bölgelerde metal perçin kullanmak yalıtımı güçleştirecektir. Kompozit perçin elektriksel iletkenlik gerektirmeyen noktalarda avantaj sağlamaktadır.

Kompozit perçinler avantajlara sahip olmakla birlikte geleneksel kullanılan metal perçinlere göre dezavantajlı olduğu yönleri de bulunmaktadır.

Kompozit perçinlerde seri üretim yapılamamaktadır, bu sebeple hem malzeme maliyeti hem de üretim maliyeti açısından verimsiz kalmaktadır.

Makineleşmiş bir üretim sistemi gelişmemiştir. Üretim esnasında özel ekipmanlar ve hassasiyet gerekmektedir. Üretim ekipmanları hala gelişmekte olduğu için ekstra maliyete sebep olmakta ve işçilik ihtiyacı çıkarmaktadır.

Kompozit malzemeler plastik deformasyon açısından daha kısıtlı bir karaktere sahiptir. Düşük plastik deformasyona sahip oluşu yükleme esnasında delaminasyon ve mikro çatlakların oluşumuna sebebiyet vermektedir. Ayrıca malzeme içerisinde oluşan kusurlar gözle görülemediği için tespit edilmesi için daha gelişmiş yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1.5. a) Kompozit Perçin b)Kompozit Plakada Perçin Yapısı [3]

1.3.Literatür Taraması

Literatürde, perçin imalatında kompozit malzeme seçiminin yapısal dayanıma katkısı, imalat yöntemleri, deneysel süreçleri incelenmiş, kullanılabilirliği ve metal perçine göre mekanik dayanım açısından üstünlük kurup kuramayacağı araştırılmaktadır.

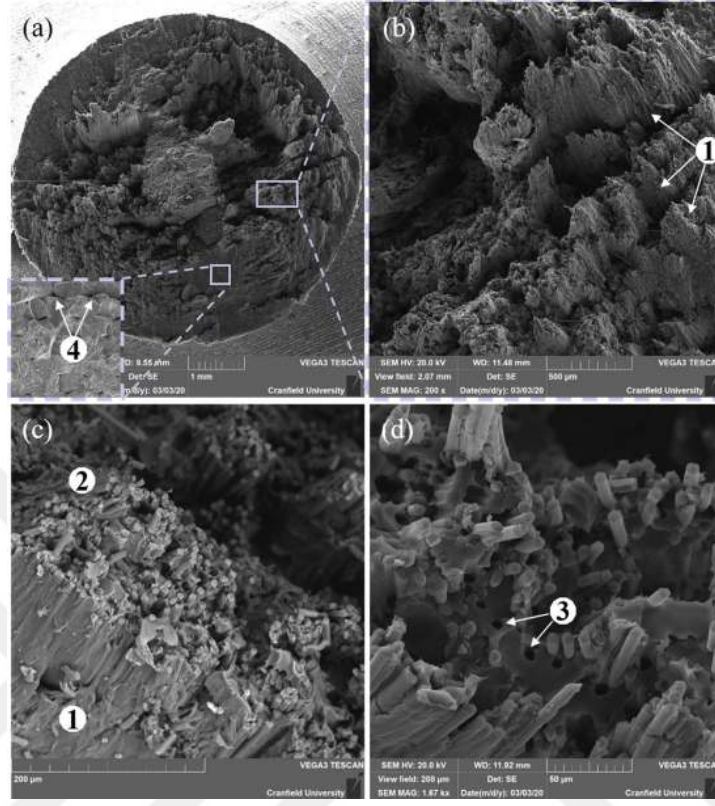
Thoppul, Finegan ve Gibson tarafından yapılan [4] çalışmada polimer matrisli kompozit yapılarda mekanik davranışını kapsamlı şekilde incelenerek, bu yapılarda mekanik bağlantı davranışının temel prensiplerini ortaya koyulmuştur. Çalışmalarında, yük aktarım mekanizmasının; fiber yönelimi, tabaka dizilimi, sıklık oranı, bağlantı geometrisi (delik çapı, kenar mesafesi, perçin aralığı), sürtünme koşulları parametrelerinden büyük ölçüde etkilendiği belirtilmiştir. Ayrıca, kompozit bağlantılarda görülen delaminasyon, fiber kırılması, matris çatlağı ve çekirdek ezilmesi gibi hasar modlarının, yükleme yönüne ve bağlantı biçimine dayanarak farklı şekilde geliştiği vurgulanmıştır. Metal bağlantılarla karşılaştırıldığında, kompozit bağlantılarda yük taşıma kapasitesinin fiber yönelimi ve tabaka yapısına duyarlı olduğu, bu nedenle klasik izotropik analizlerin yetersiz kaldığı ifade edilmiştir. Delik açma sırasında oluşan fiber kopmaları, ısıl faktör ve katmanlar arası

ayrılmaların bağlantı dayanımını önemli ölçüde düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Bu sebeple kompozit perçinleme, yapıştırıcı bağlantılar ve hibrit birleşimlerin alternatif çözümler olarak araştırılması önerilmiştir.

Mulazimoglu ve Haylock [5] çalışmalarında, kompozit yapılarda yıldırım akımı sırasında perçin ve bağlayıcı noktalarında oluşan ark etkisini azaltmaya yönelik gelişen yöntemleri incelemiştir. Çalışmada, özellikle karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit yapıların metal bağlantı parçalarıyla birleştirildiğinde, iletkenlik farkı nedeniyle yıldırım kaynaklı akımının bağlayıcı (perçin) çevresinde yoğunlaşarak ark hasarı oluşturabildiği görülmüş ve hem yapısal hem de elektriksel bütünlüğü zayıflattığı tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, etkiyi azaltmak amacıyla kompozit esaslı veya yalıtkan kaplamalı bağlantı elemanlarının kullanımının etkin bir çözüm sunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, perçin-plaka arayüzünde kullanılan iletken dolgu ve yüzey kaplama malzemelerinin, yıldırım akımının düzgün dağılmasını sağlayarak ark oluşumunu en az düzeyde gerçekleştirdiği deneysel olarak gösterilmiştir. Çalışma, havacılık yapılarında mekanik bağlayıcı olarak metal bağlayıcılar yerine kompozit veya yalıtkan özellikteki alternatif bağlantı elemanlarının kullanılmasının, yıldırım dayanımı açısından da avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

W. Li ve arkadaşları tarafından yapılan [6] bir çalışmada tek bindirmeli birleşim bağlantılarında eklemeli imalat (FDM) yöntemi kullanılarak üretilen termoplastik kompozit perçinlerin kayma gerilmesi altında gösterdiği davranışlar incelenmiştir. Bu çalışmada CCF/Onyx (CF/PEEK(Karbon Fiber takviyeli Polyether Ether Kethone)) malzemeli termoplastik incelenmiştir. Üretilen kompozit perçinler üretimleri gerçekleştikten sonra malzemenin ısıtılarak şekillendirilme özelliğinin kullanılmasıyla basınç uygulanarak tek bindirmeli test numunelerine monte edilmiştir. Basınç uygulanan takım için perçine şekil verecek başlıklar imal edilmiştir. Çalışmada kompozit perçinler farklı kafa tiplerine göre iki grupta incelenmiştir ve bu iki grup kendi içerisinde ısıtma işlemi tabii tutulup tutulmamasına göre de ayrılmıştır. Kompozit perçinler 5 ve 8 mm çaplarına sahip çelik perçinlerle kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarına göre kompozit perçinler 8 mm çapa sahip kendi çaplarındaki çelik perçinlere göre daha düşük yük taşıma kapasitesine sahipken 5 mm çapa sahip çelik perçinden daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada çelik ve kompozit perçinlerin farklı hasar modları gösterdiği de görülmüştür. Kompozit perçinler, ani kırılma, kesme (shear failure) hasarına maruz kalmakta ancak çelik

perçinlerde hasar kademeli olarak ilerlemektedir (Bearing Failure). Çalışmada kompozit malzemeye ısıtılma işleminin etkisi de incelenmiştir.

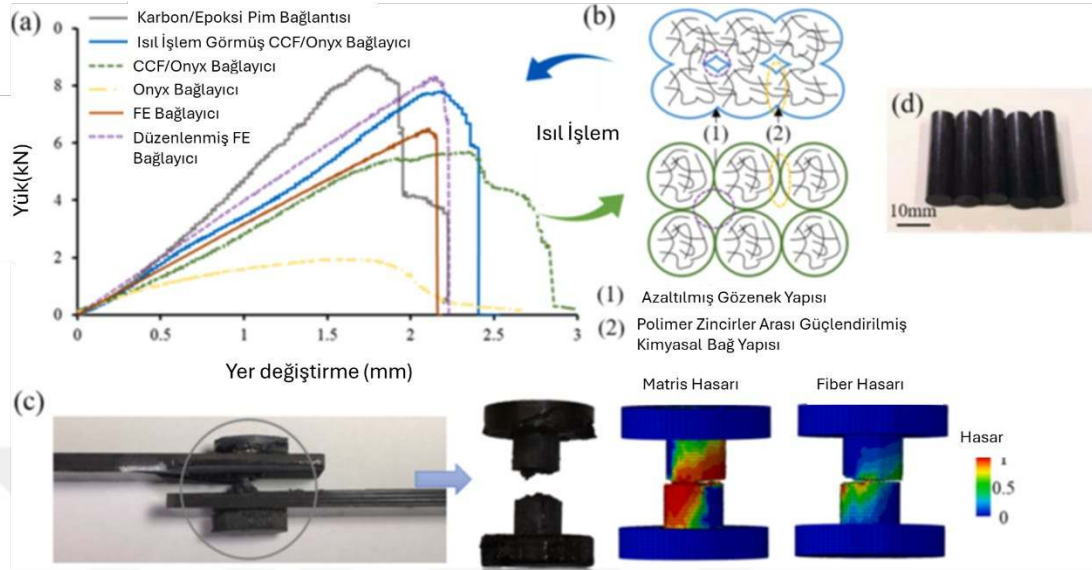


Şekil 1.6. Kopma Sonrası Perçinlerde Oluşan Mikro Yapı [5]

Kompozit perçinlerin kopma yapısı mikroskop altında incelenmiş, Şekil 1.6 (a) görselinde gözle görünür bir kırılma deseni oluşmuştur. Bu kırılma deseninde matris ayrışması ve fiberlerinin çekilmesi (fiber pull-out) durumu ve katmanlar arası delaminasyon meydana gelmiştir. (b) görselinde bu kırılma deseni büyütülerek fiberlerin kopması daha belirginleştirilmiştir. (c) görselinde bazı fiberlerde çekilme meydana gelmiştir. (d) görselinde 3 numara ile belirtilen konumlarda fiberlerin çekildiği gözlemlenmiştir. (a) görselinde 4 numaralı konumda ısıtılma işleminin ardından gözenekli yapının neredeyse tamamen düzeldiği görülmüştür. Bu çalışmada ısıtılma işleminin kompozit malzemede iç yapının gözenekliliğini giderdiği gözlenmiştir.

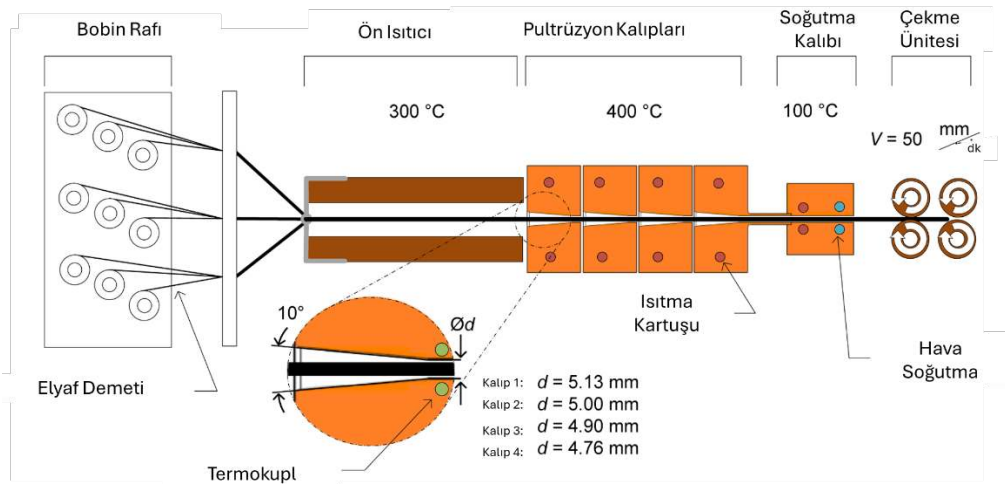
Şekil 1.7 farklı bağlayıcılardan elde edilen yük-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek yük taşıma kapasitesi karbon epoksi pim bağlantısında görülmüş ancak kopması daha erken meydana gelmiştir. Isıtılma görmüş CCF/Onyx bağlayıcıların gözenek yapısının azaltıldığı ve ısıtılma görmeyen CCF/Onyx'e göre daha

yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Matris ve fiber hasar analizler FEM modeli ile gösterilmiştir.



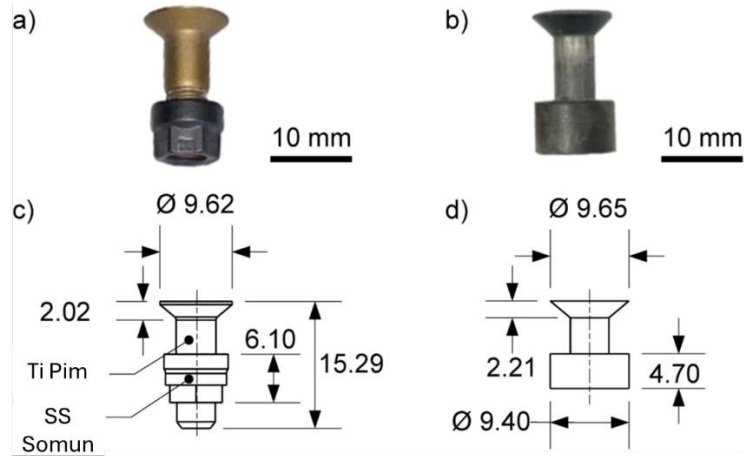
Şekil 1.7. Perçin Hasar Analizi [5]

Absi ve arkadaşları tarafından yapılan [7] bir çalışmada, CF-PEEK kompozit malzemesinden üretilen perçin ile titanyum malzemeli bağlayıcıyı karşılaştırılmıştır. Çalışmada kompozit pimler pultrüzyon yöntemi ile imal edilmiştir (Şekil 1.8).



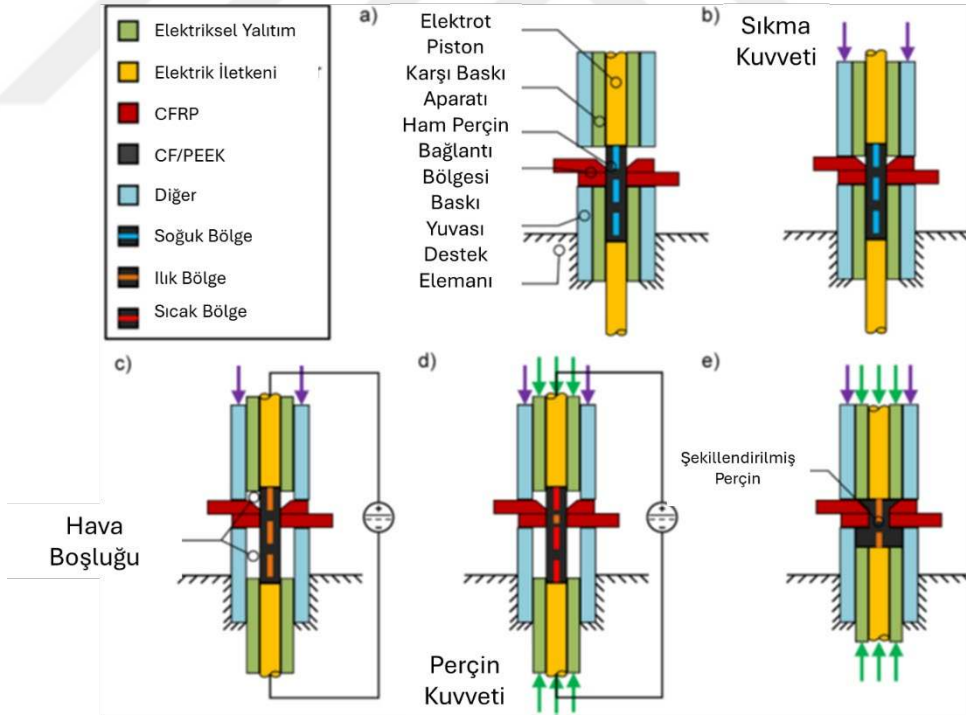
Şekil 1.8. Kompozit Perçin Pultrüzyon İmalatı[4]

Pultrüzyon yönteminde karbon fiberler PEEK matrisine emdirilir sonrasında bir kalıptan geçirilerek şekil verilir. Çubuk şekli verildikten sonra eşit uzunluklarda miller elde edilir. Perçin olarak kullanılacak bu miller 4.76 mm çapa sahiptir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Perçin Ölçüleri[4]

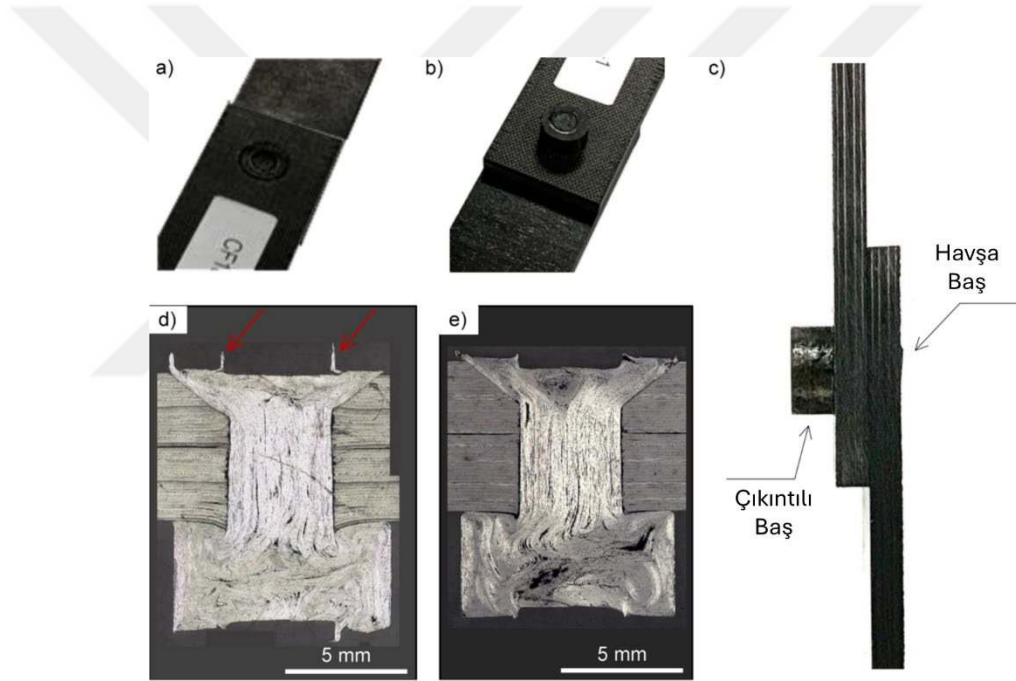
Kompozit perçinin, montaj işlemi için özel bir takım geliştirilmiştir (Şekil 1.10). Bu takımda termoplastik malzemenin ısı ile form değiştirmesi ve soğutulduğu zaman mekanik performansı değişmeden eski formuna geri dönebilmesinden faydalanılmıştır.



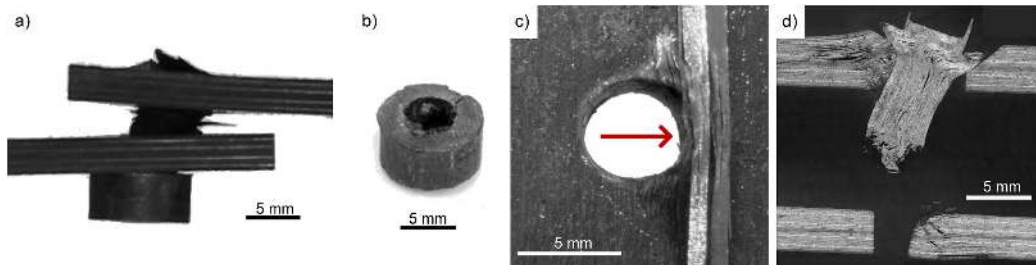
Şekil 1.10. Kompozit Perçin Montaj Yöntemi[4]

Bu çalışmada [7], karbon fiber takviyeli PEEK matrisli kompozit perçinlerin montajı, seri imalat yapabilen bir sistemle gerçekleştirilmiştir. Pultrüzyon metoduyla üretilen

CF/PEEK miller, belirli uzunluklarda kesilerek perçin bloğuna dönüştürülmüştür. Bu bloklar, Joule ısıtması yöntemiyle (iç dirençle ısı üretme metoduyla) eritilmiş sonrasında ısı kaybı gerçekleşmeden servo motor kontrollü bir pres ile şekillendirilmiştir. Kompozit plakalar ve çelik plakalar için farklı güçler uygulanmıştır. Kompozit için yaklaşık 110 W, çelik için ise 175 W güç uygulanmıştır. Isıtma ve şekillendirme prosesi toplamda her bir perçin için yaklaşık 35 saniye sürmüştür. Montaj esnasında önce düşük basınçla temas sağlanmış, ardından basınç artırılarak yaklaşık 11 MPa seviyesinde basınç uygulanıp perçin başlığı oluşturulmuştur (Şekil 1.11). Tüm prosesler boyunca sıcaklık, kuvvet ve pozisyon parametreleri eş zamanlı takip edilmiştir. Bu prosesler sayesinde, perçin yapısındaki gözeneklilik %47'den %12'ye düşürülerek daha homojen ve yüksek performanslı bir bağlantı elde edilmiştir.



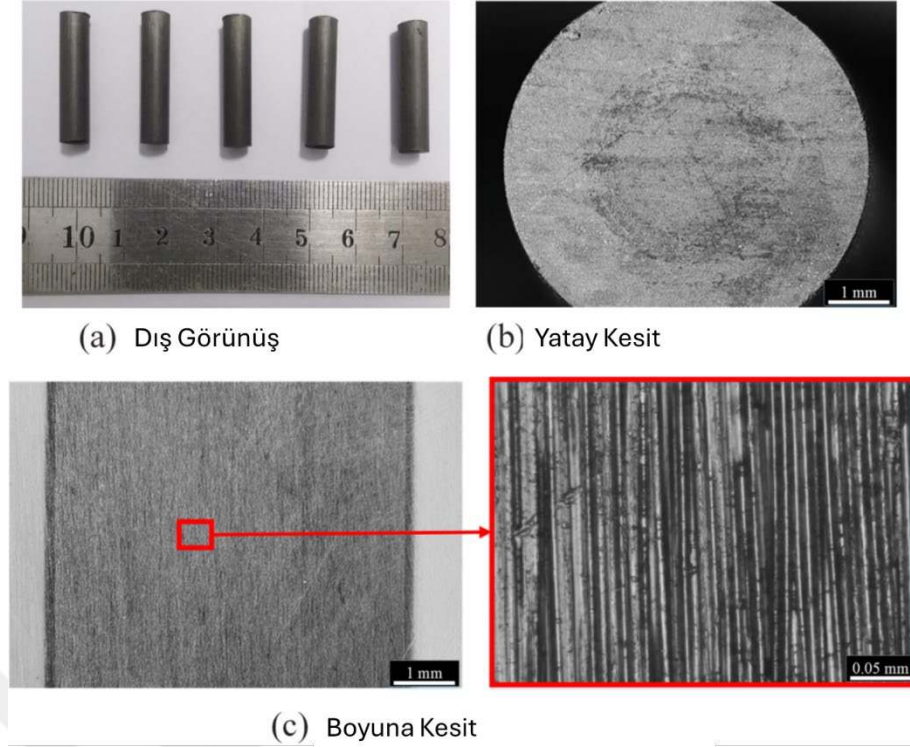
Şekil 1.11. UD Kompozit Perçinlerde Montaj Sonrası Morfoloji[4]



Şekil 1.12. Kayma Testi Sonrası Oluşan Yapısal Hasar[4]

Çalışma sonuçları incelendiğinde CF/PEEK perçinler tek bindirmeli kayma testinde 6,2 kN, çekme testinde ise 4,1 kN yüke dayanmıştır. Kompozit perçinden elde edilen sonuçlar mutlak yük taşıma kapasitesi açısından titanyum perçinlere göre daha düşüktür. Ancak özgül performans açısından değerlendirildiğinde, CF/PEEK perçinler kesmede 8,7 kN/g, çekmede 5,7 kN/g dayanım göstermiştir. Buna karşılık titanyum perçinler sırasıyla yalnızca 4,7 kN/g ve 3,0 kN/g değerlerine ulaşmıştır. Aynı zamanda, delik ile perçin gövdesi arasındaki deformasyon hem CF/PEEK hem de titanyum perçinler için incelenmiştir. Titanyum perçinlerde boşluk miktarı arttıkça ikincil bükülme ve ezilme hasarı (bearing damage) gözlenmiştir; boşluk azaldığında ise perçin kendisi hasar görmekte, ezilme minimumda kalmaktadır (Şekil 1.12.). Buna karşılık, CF/PEEK perçinler tüm boşluk aralıklarında benzer mekanik davranış sergilemiştir. Bu, montaj sırasında perçin gövdesinin delik formuna göre genişerek küçük tolerans farklılıklarını telafi etmesine olanak sağlamıştır. Bu özellik, delik işleme toleranslarının genişletilmesine imkân tanıyarak üretim maliyetlerini azaltma potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca çoklu perçinli bağlantılarda, yük dağılımındaki dengesizlik riskini de azaltabilir. Bu durum, CF/PEEK perçinlerin hafiflik avantajı sayesinde malzeme verimliliğinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Yao ve arkadaşları, UD CF/PEEK (karbon fiber takviyeli) kompozit malzemesinden elde edilen perçinlerin tek bindirmeli (Single Lap Joint) bağlantılarında mekanik davranışlarını incelemiştir [8]. Çalışmada UD kompozit malzemeden mil üretilmiş (Şekil 1.13). İmal edilen CF/PEEK miller önce ısıtılıp sonra preslenme ve soğutma yöntemiyle birleştirilmiştir. Perçinler farklı fiber oranlarına ve soğutma hızlarına sahiptir.



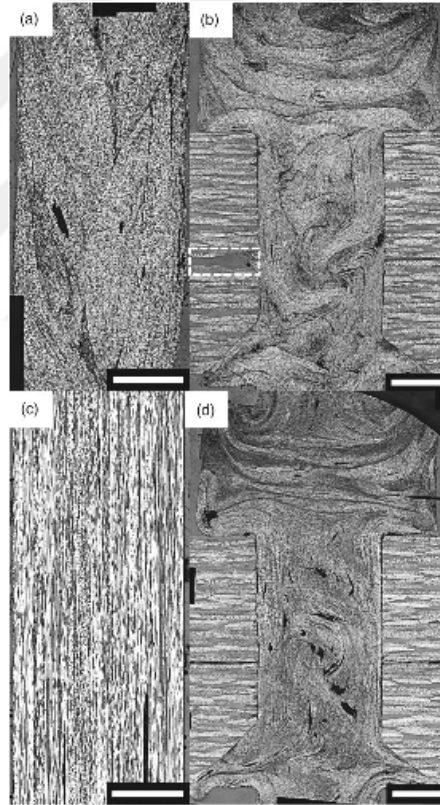
Şekil 1.13. CF/PEEK UD Kompozit Perçin Yapı ve Morfolojisi[7]

Kompozit plakaların titanyum perçinlerle birleştirildiği bağlantılar kompozit perçinin kullanıldığı plakalarla deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Termoplastik perçinin fiber içeriğe ve kristallik özelliklerinin optimizasyonuna yoğunlaşmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde kompozit perçinin imalat aşamasındaki farklı koşulların perçin dayanımına büyük etkisi olduğu görülmüştür. Perçinin soğuma hızının azalmasının plakalarla birleşiminde mukavemeti arttırdığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ortaya çıkan bu durum kompozit malzemenin matris (PEEK) kristallenme oranındaki artışla ilişkilendirilmiştir. Yüksek soğuma hızında hareket kabiliyeti hızla azalan PEEK zincirlerinin kristallenme süresi kısalmakta, taneciklerinin büyümesi sınırlanmaktadır. Bu durumda da düşük kristalli sferulit adı verilen yapılar elde edilmiş. CF/PEEK yapıdaki perçinlerin mekanik davranışları kristallenme oranı doğru orantıya sahip olduğu için düşük soğuma hızı birleştirmenin dayanımını arttırmaktadır.

Çalışmada hacimsel fiber etkisi incelendiğinde, hacim içerisindeki fiber oranı arttıkça birleşim dayanımı ve rijitliğinin yükseldiği tespit edilmiştir. Titanyum perçinli bağlantılar ve kompozit perçinli bağlantılar kıyaslandığında kompozit perçinlerde kesme yönünde deformasyon görülmüş, titanyum perçinde ise kompozit plakada yatak gerilmesinin meydana geldiği görülmüştür. Titanyum perçinin dayanımının CF/PEEK perçinden yüksek

olduğu sonucu elde edilmiştir, ancak perçinlerin özgül dayanımları kıyaslandığında kompozit perçinin dayanım/ağırlık oranının titanyum perçinden yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda kompozit perçinlerin titanyum perçinler yerine platformda ağırlık-etkin çözümler bulmak amacıyla ikincil yapısal bağlantılarda kullanılabileceğini gösterilmektedir.

Fortier ve arkadaşları Polyether ether ketone ketone (PEKK) matrisli karbon fiber kompozit perçin imalatı için örgülü yapıya sahip perçinler üzerine çalışma yapmışlardır [9]. Kompozit perçinlerin havacılık platformlarda titanyum perçinlerin alternatifi olarak kullanılabilirliği üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada örgü modellenmiş kompozit perçinler ve UD kompozit perçinler imal edilmiş ve kıyaslanmıştır. Şekil 1.14 görselinde montajı tamamlanmış UD ve örgü modellenmiş perçinler görülmektedir.



Şekil 1.14. Örgü ve UD modellenmiş CF/PEKK Kompozit Perçin Morfolojisi[3]

Termoplastik perçinlerin montajı için kullanılan takımın elektrik direncinden dolayı ortaya çıkan ısıyla perçin delikleri ısıtılmış ardından hazırlanan kompozit miller delikten geçirilmiş ancak plakaların etkilenmemesi için mil ile plaka arasına yalıtıcı malzeme konulmuştur. Ardından basınç uygulanarak perçinler sabitlenmiştir. Perçin montajları 40 saniyeden az sürmüş ve plakalardaki delik yüzey sıcaklığı 136° ye kadar çıkmıştır. Her bir

çift kompozit plaka bir çift kompozit perçin ile sabitlenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda UD kompozit perçinlerin örgülü kompozit perçinlere göre daha düşük mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda örgülü kompozitler eşdeğer alüminyum perçinlere göre daha yüksek kopma yüküne sahip bulunmuş özgül dayanım göz önüne alındığında ise titanyum perçinlerden de daha yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir.

Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kompozit plakalarda yapıştırılabilirliği yöntemi kullanılarak oluşturulan bağlantı yöntemi ve karbon fiber pim kullanılarak oluşturulan bağlantılar deneysel ve sayısal analiz yöntemi ile karşılaştırılmıştır [10]. Çalışmada numuneler sadece yapıştırma yöntemi kullanılanlar, hibrit bağlantı ve yalnızca kompozit pim kullanılanlar olmak üzere üç temel gruba ayrılmış. Deney sonucunda hibrit bağlantılı numunelerin mukavemetinin sadece yapıştırma yöntemi kullanılanlara göre %19,1 artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca bu hibrit numunelerde hasar başlangıcından sonra yükün yayılımında fayda sağladığı görülmüştür. Çalışma kapsamında ABAQUS programı üzerinden sayısal parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde deneyde kullanılan kompozit pimle eşdeğer çelik pimin mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda aynı çaptaki çelik pimin mukavemet değerinin daha yüksek olduğu saptanmış ancak kompozit pimin fiber yönelimlerinin ve çap değerinin optimize edilmesiyle çelik pime eşdeğer hatta daha yüksek mukavemet değerlerine de erişilebileceği sonucu elde edilmiştir. Çelik pim yerine kompozit pim kullanıldığında yaklaşık %46,9 oranında ağırlık düşüşü elde edilmiştir.

Yao ve arkadaşlarının tarafından yapılan derleme çalışmasında [11] karbon fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin imalat yöntemleri, yüzey kaliteleri, mekanik performansları incelemiştir. Karbon fiber malzemenin yüksek özgül dayanımları, yüksek mukavemet ve yüksek aşınma direncine sahip olması sebebiyle endüstride yaygınlaştığı, termoplastik matrisin termoset malzemelere göre geri dönüştürülebilirlik açısından tercih edildiği belirlenmiştir. CF/PEEK malzemesinin kullanıldığı parçalarda fiber oryantasyonu ve imalat sıcaklığının parçadaki eğilme ve aşınma direncinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Yao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada sıkı geçme ile oluşturulan bağlantılarda termoplastik kompozit bağlayıcının mekanik davranışlarını incelenmiştir [12]. CF/PEEK malzemedan üretilen bağlayıcıların üç farklı (%0.55, %1.04 ve %2.06 sıkı geçme oranındaki performansları incelenmiştir. Deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlarda %1.04 sıklık oranına sahip numuneler en yüksek mukavemeti sağlamış ve 363 MPa değeri elde etmiştir. ABAQUS üzerinden yapılan sayısal analizde fiber, matrisler ve katmanlar arası

hasar modellenmiştir. Modelleme sonucunda sıklık oranındaki artış delaminasyona ve fiber kopmalarından doğan katastrofik kırılmalara sebebiyet verdiği görülmüştür. Çalışma sonucunda sıkı geçmeli CF/PEEK bağlayıcıların metal bağlayıcılara muadil olabileceğine yönelik değerler elde edilmiştir. Kompozit bağlayıcıların, Titanyum cıvata bağlantılarından özgül dayanım açısından 3 kat daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

Yang ve ark. [2] tarafından, yapıştırıcı madde kullanılarak birleştirilmiş, perçinli ve hibrit CFRP bağlantılarının mekanik dayanım özelliklerini karşılaştıran bir çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucunda bağlantı tipinin yük aktarımı ve hasar davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. Hibrit bağlantıya sahip parçaların daha yüksek dayanım ve enerji sönümleme kapasitesi gösterdiği, bu nedenle kompozit bağlantı uygulamalarında alternatif bir çözüm sunduğu belirtilmiştir.

Belardi ve arkadaşları [13], çoklu perçinli kompozit bağlantılarda yükün dağılımını ve bunun bağlantı bölgesinde ikincil eğilme durumunun oluşturmaya etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda çoklu perçinli kompozit bağlantılarda yük dağılımının dengesizlik yaratması nedeniyle bağlantı bölgelerinde ikincil eğilme (secondary bending) oluşturduğu ve yüklemeye delik çevresinde gerilme yığılmalarını artırarak bağlantının genel dayanımını düşürdüğü belirtilmiştir.

Marannano ve Zuccarello [14], alüminyum-CFRP hibrit çift bindirme bağlantılarında yük aktarımı ve hasar davranışını hem deneysel hem sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kompozit tabakada katmanlar arasında delaminasyon meydana gelmiş, metal tabakada ise plastik deformasyon gözlemiştir.

1.4.Amaç

Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, hafiflik, yüksek korozyon direnci özellikleri sayesinde tasarım esnekliği ihtiyacı olan otomotiv, savunma sanayii ve havacılık sektörlerinde günümüzde metallerin yerini almaya başlamıştır. Kullanıldığı alanlarda karmaşık yüklemelere maruz kaldıkları için bu yapıların bağlantı elemanlarında yüksek yorulma ömrü ihtiyacı bulunmaktadır. Kompozit malzemeler genellikle fiberler (karbon, cam, aramid gibi) ve bir reçine malzemesinin birleşiminden oluşmaktadır. İç yapısında kullanılan fiberlerin yerleştirildiği yöne bağlı olarak farklı yönlerden gelen yüklemelere karşı dayanımı yüksektir. Yapıların birleştirme yöntemleri temelde üçe ayrılabilir. Bu yöntemler; mekanik bağlayıcı, yapıştırma ve hibrit yöntemlerdir. Bakım ve onarım

ihtiyaçları göz önüne alındığında en çok tercih edilen birleştirme yöntemi mekanik bağlayıcılar olmaktadır.

Günümüzde mekanik bağlantı yöntemi olarak yüksek oranda metalik bağlayıcılar kullanılmaktadır. Metalik bağlayıcılar bağlantılara yüksek dayanım sağlamalarına rağmen farklı malzemelerin bir arada kullanıldığı durumlarda çevresel ve mekanik sorunlara yol açmaktadır. Galvanik uyumsuzluk, yüksek ağırlık, korozyon, elektromanyetik iletkenlik bu sorunlardan bazılarıdır. Kompozit bağlayıcılar özellikle platform ağırlığının önemli olduğu havacılık sektöründe metalik bağlayıcılara ciddi bir alternatif olma potansiyeline sahiptir.

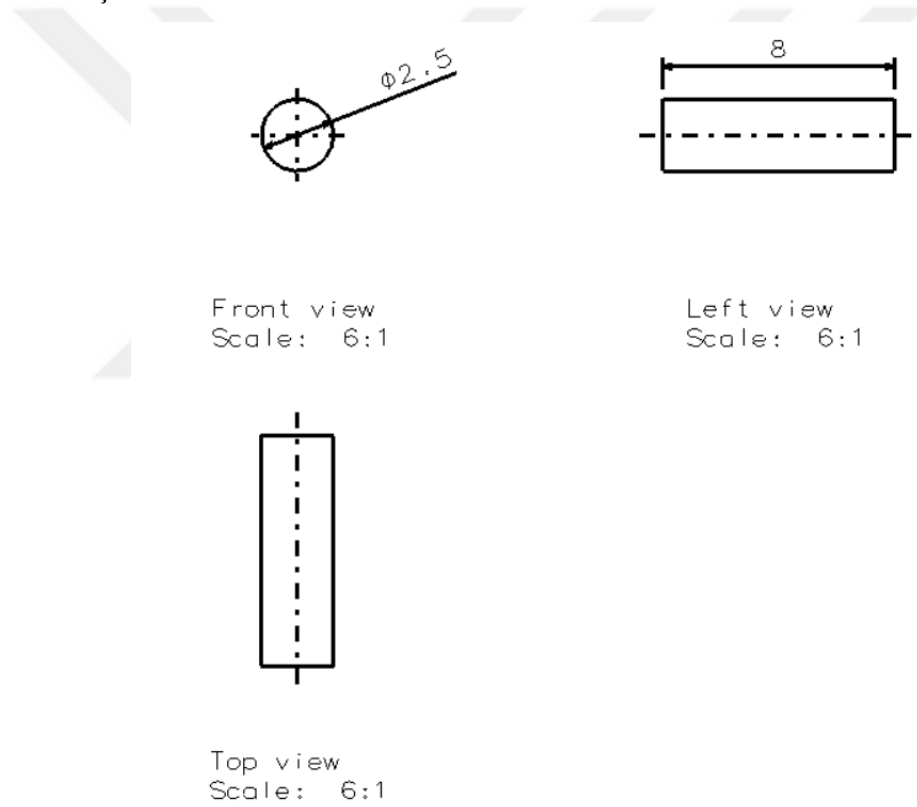
Bu tez çalışmasında; havacılıkta kullanılan malzemelerden üretilen parçaların birleştirilmesinde kullanılabilecek kompozit perçin (CF/PEKK) reterek, bu perçini geleneksel metal (Alüminyum alaşımlı) perçin ile deneysel ve sayısal olarak karşılaştırmak suretiyle mekanik performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında iki perçin türünün ayrı ayrı kullanıldığı numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler sayısal olarak FEM analizi ile doğrulanmıştır.

Tezi çalışmasının sonucunda ağırlık, mukavemet, bakım ve üretilbilirlik kriterlerine göre etkin performansa sahip kompozit malzemeden yapılmış perçinlerin kullanılabilirliğine ilişkin bilimsel bir katkı sağlanması hedeflenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

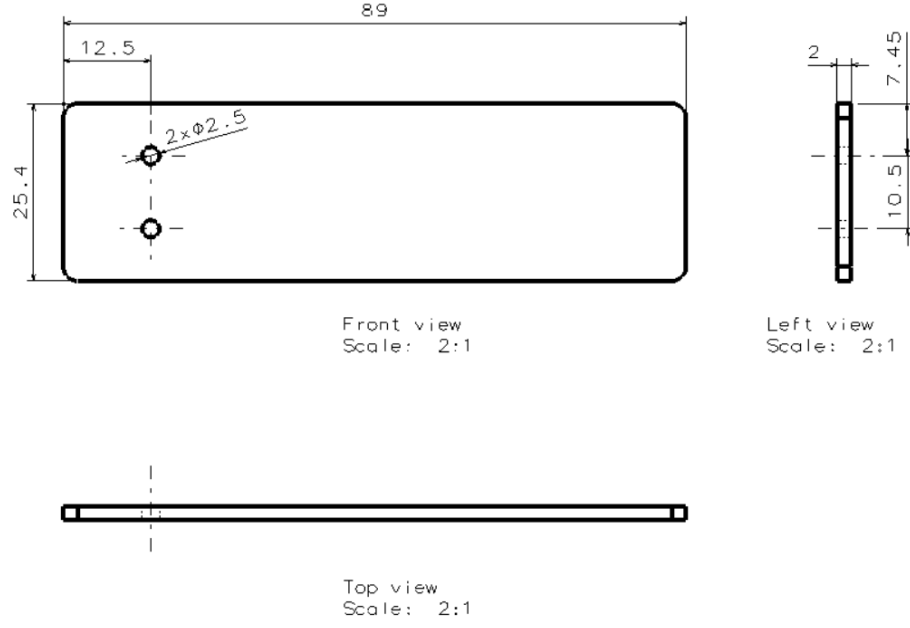
2.1. Test Numunelerinin Hazırlanması

Tez çalışmasında kullanılan modellerin tasarımı yapılırken deneyde kullanılacak standart belirlemesine gidilmiştir. Havacılıkta kullanılan standartlar incelendiğinde perçin dayanımını test etmek için ASTM D1002 [15] standardına göre tasarım yapılması uygun görülmüştür. Bu standart yapıştırma yöntemiyle birleştirilen parçaların çekme yüklemesine karşı birleştiren yüzeyde oluşan kesme gerilmesinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Standart kullanılarak Catia V5 programı üzerinden CAD modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan CAD modelleri Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 üzerinde, montaj resmi Şekil 2.3 olarak gösterilmiştir.



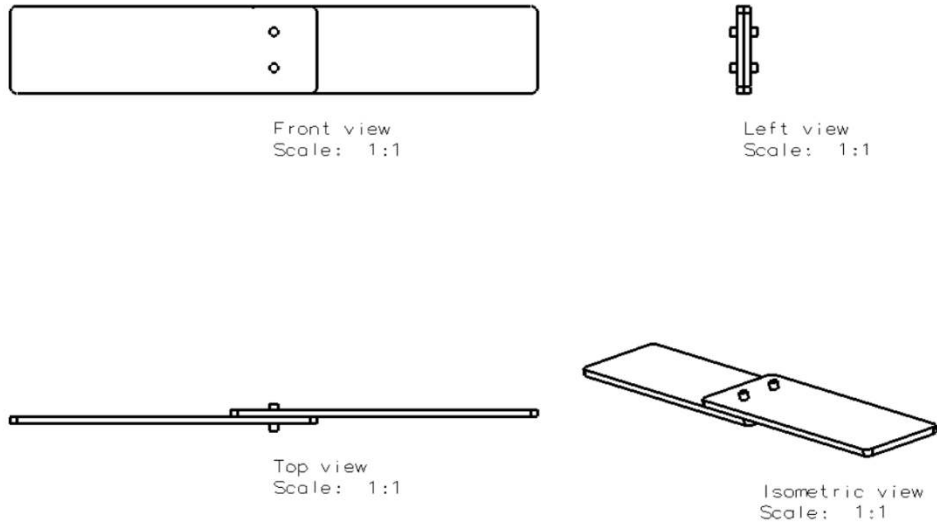
Şekil 2.1. Kompozit Pim Teknik Çizimi

Kullanılan metal perçin eşdeğerine uygun 2.5 mm çapa sahip 8 mm uzunlukta CF/PEKK pimler tasarlanmıştır.



Şekil 2.2. Çelik Plakalar Teknik Çizimi

Belirtilen standarda uygun olarak test numunesi için 89x25.4x2mm boyutlarına sahip PH13-8Mo çelik plakalar tasarlanmıştır. Plakaların üzerinde iki adet perçinin montajının gerçekleştirileceği delikler standartta belirtilen ölçülere göre konumlandırılmıştır.



Şekil 2.3. Test Numunesi Teknik Çizimi

2.2. Malzeme Seçimi ve Üretimi

Bu çalışmada, malzeme seçimi yapılırken çeşitli parametreler değerlendirilmiştir.

Test numunelerinin plakalarının belirlenmesinde Alüminyum, kompozit ve çelik malzemeleri değerlendirilmiştir. Alüminyum plakaların dayanımının termoplastik perçinin dayanımından düşük olabileceği öngörüldüğü için, plakada perçin yataklarında meydana gelebilecek hasarlar perçinin mekanik dayanımının hesaplanmasında sapmalara yol açabilmektedir. Kompozit plakalarda ise plaka fiber oryantasyonu, matris yoğunluğu ve üretim süreci gibi pek çok değişkene bağlı olarak plaka dayanımı değişkenlik gösterecektir. Bu durumdan dolayı perçin dayanımında malzeme etkisinin izole bir şekilde incelenmesi güçleşecektir. Dolayısıyla yalnızca perçinlerin davranışının incelenebilmesi için çelik malzemesi tercih edilmiştir.

Hava aracı platformlarında kullanılan perçinler incelenmiştir. Perçinler, hava araçlarında kabuk ve güçlendirici yapı bağlantılarında, ekipman bağlantılarında, kabuk-kabuk bağlantılarında kullanılmaktadır [4,16]. Bunlar arasında kullanılan genellikle iç bölgelerde, spar-rib bağlantılarında kullanılan EN6101AD3 [17] perçini referans alınmıştır. Referans alınan alüminyum perçin (EN6101AD3) 2,38 mm çapa sahiptir. Montajı tamamlanmış Al perçine sahip test numunesi Şekil 2.4 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Alüminyum Perçin Montajı Yapılmış Test Numunesi

Termoplastik malzeme olarak günümüzde uçaklarda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan CF/PEKK matrisli karbon fiber malzeme kullanılmıştır. CF/PEKK malzemesi yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptir [18]. CF/PEKK malzemesi -60°C ile 200°C arasında yapısal bütünlüğünü korumaktadır [19]. Perçin imalatında termoplastik malzemenin ısı ile şekil değiştirerek soğuma işleminin ardından yapısal bozulmaya uğramadan eski rijitliğine dönebilmesi çok büyük avantaj sağlamıştır [8,9]. CF/PEKK kompozit malzemesi yüksek korozyon dayanımına sahiptir, aynı zamanda platformların içerisinde titreşimi sönümleyebilmesi amacıyla kullanılan malzemelerden birisidir.

Kompozit perçinin imalatı için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmıştır [6,7,9], bu çalışmada kompozit perçin imalatı için yeni bir kalıp tasarlanması mümkün olmadığından dolayı farklı bir yöntem kullanılmıştır. CF/PEKK katmanlar üst üste serim yapılarak referans perçin kalınlığında UD plakalar imal edilmiştir. Ardından bu plakalar daha küçük parçalara bölünmüş ve yaklaşık 2.5-2.8 mm çapa sahip miller üretilmiştir. Miller yaklaşık olarak 2.5 mm çapına eriştikten sonra işleme yöntemi daha hassaslaşmıştır. İşleme yönteminde kompozit pimlerin içerisindeki fiberlerin zarar görmemesi için hassas yüzey pürüzsüzleştirme yöntemi kullanılmıştır.

Bu işlem sayesinde kompozit pimler referans alınan alüminyum perçin ile eş ölçülere getirilmiştir. İşleme kolaylığı olması açısından referans ölçülerden daha uzun imal edilen kompozit pimler, istenen çap değerine ulaştıktan sonra kısaltılarak yaklaşık 6 mm uzunluğunda parçalara ayrılmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. CF/PEKK Kompozit Pimler

İmal edilen pimler mengene yardımıyla sıkıştırılan çelik plakalarda bulunan deliklere sıkı geçme toleransı ile monte edilmiştir. Ardından pimler plaka dışarısında kalan baş ve kuyruk kısımlarından havya yardımıyla ısıtılarak perçin kompozit malzemenin yumuşaması

sağlanmıştır. Kompozit pim yumuşadıktan sonra sıkıştırma aleti yardımıyla basınç uygulayarak perçin başları körleştirilmiştir.

Bu yöntem ile pimin iç yüzey sıcaklığı ve sıkışma miktarı tam bilinmemektedir, ancak ilk montaj işleminde sıkı geçme toleransı ile montajları gerçekleştirildiği için plakaların iç yüzeyine oturduğundan emin olunmuştur. Montaj işlemi tamamlandıktan sonra (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7), perçin başlarının levhaların dış yüzeyi ile aynı düzlemde, düzgün biçimde oturduğu ve olabildiğince homojen bir yüzey oluşmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 2.6. CF/PEKK Perçin Test Numune Seti



Şekil 2.7. Alüminyum Perçin Test Numune Seti

2.3. Deneyin Yapılışı

Deneyde perçinlerin dayanabileceği maksimum kesme gerilmesinin bulunması amacıyla test numuneleri TUSAŞ bünyesinde bulunan INSTRON Çekme Testi Cihazına bağlanmıştır. Test cihazı 100 kN yük yükleme kapasitesine sahiptir. Cihaz farklı boyutlarda bulunan tekli test numunelerinde parçaların dayanımın tespit edilmesinde, montaj yapılmış

numunelerde mekanik bağlantı elemanlarının, yapıştırma tekniğiyle birleştirilmiş numunelerde yapıştırıcı malzemenin dayanımının ölçülmesinde kullanılmaktadır. Test numunelerinin çekme ekseninde olabilmesi için numunelerin karşılıklı birer yüzüne şim (pabuç levha) konularak çenelerden kaynaklanan eksen kaçıklığı önlenmiştir.

Test esnasında kopma gözlemlenene kadar numuneler teste tabii tutulmuştur.

Deney düzeneğinde Instron çekme test düzeneğinin uyguladığı kuvvet eş zamanlı olarak bilgisayar ekranından görülmektedir. Deney süresince saniyede 10 veri alarak yüklemeye karşılık gelen deplasman değerleri bilgisayara aktarılmıştır. Test düzeneğinin bağlı olduğu bilgisayarda numunelerde meydana gelen deplasman değerleri ve kuvvetler, yük-deplasman grafiğine aktarılmış ve sayısal veriler tablo şeklinde kaydedilmiştir.



Şekil 2.8. Deney Öncesi Numune Yerleşimleri



Şekil 2.9. Kopması Gerçekleşen Alüminyum Perçin Numunesi

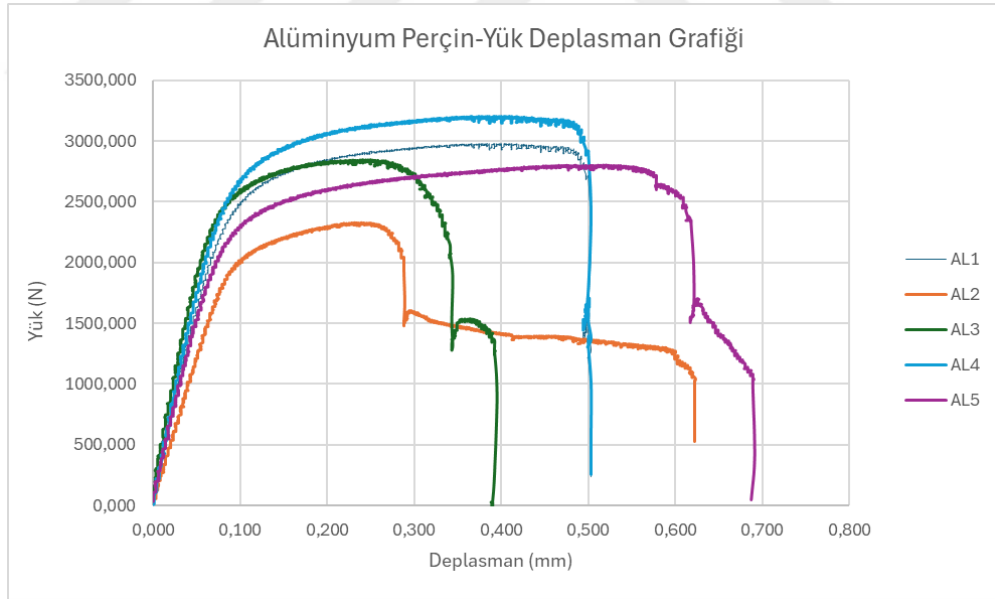
Öncelikli olarak Alüminyum perçine sahip numuneler numaralandırılmıştır. Sırasıyla numuneler cihazın çenelerine aksel kaçıklık olmamasına dikkat edilerek yerleştirilmiştir (Şekil 2.8 ve Şekil 2.9).

Alüminyum perçin kullanılan numuneler ile deney aşaması tamamlandıktan sonra kompozit perçinli numuneler aynı şekilde yerleştirilip 5 adet numune için test tekrarlanmıştır (Şekil 2.10).

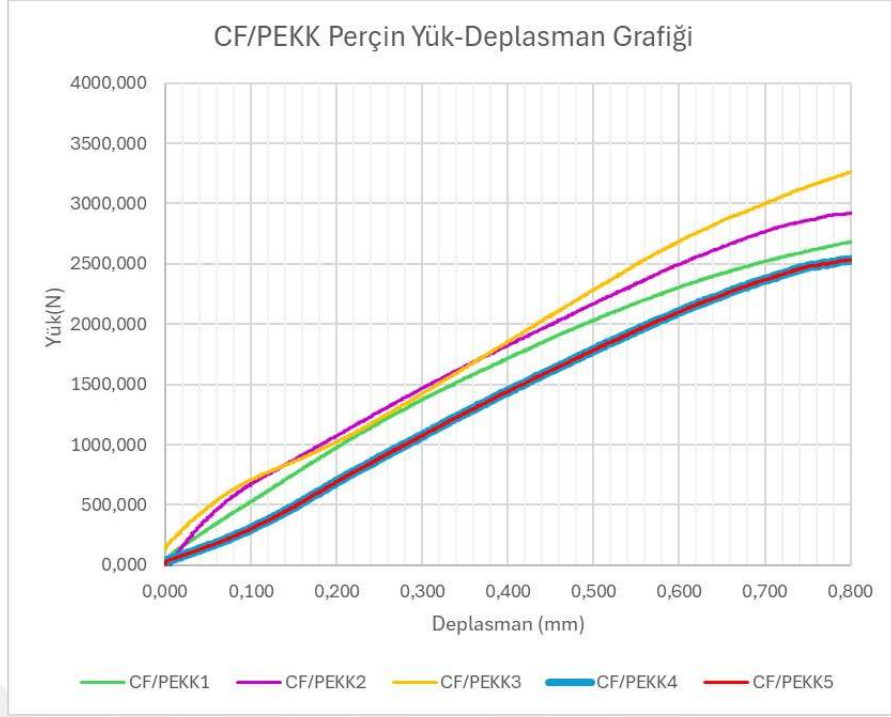


Şekil 2.10. Kompozit Perçin Deney Öncesi ve Sonrası Yerleşimi

Deneysel çalışma sonucunda, test numunelerine uygulanan çekme kuvvetinin, deney cihazının çeneleri arasındaki uzaklık (yer değiştirme) ile ilişkisini ortaya koyan grafikler oluşturulmuştur Şekil 2.11 ve Şekil 2.12).



Şekil 2.11. Alüminyum Perçin Yük-Deplasman Grafiği



Şekil 2.12. CF/PEKK Perçin Yük-Deplasman Grafiği



Şekil 2.13. Deney Sonrası CF/PEKK Perçinde Gözle Görünür Deformasyon

Deney sonrasında CF/PEKK perçin üzerinde gözle görünür bir plastik deformasyon oluşmuştur. Plakalar yükleme kaynaklı birbirinde uzaklaşmış ve perçinin kesiti bozulmuştur (Şekil 2.13).

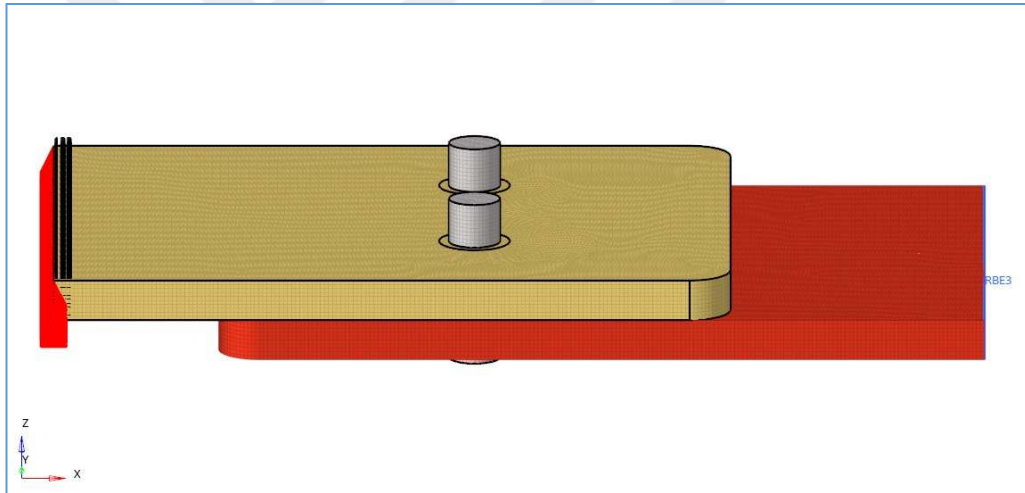
Deney esnasında aksel kaçıklık olmaması amacıyla test cihazı çeneleriyle plakalar arasına test numunelerinde plakalarla eş kalınlıkta çelik plakalar bağlanmıştır. Şekil 2.14 üzerinde sarı yuvarlak içerisinde metal şım parçaları görülmektedir.



Şekil 2.14. Deney Öncesi Aksel Yükleme Önleyici Metal Plakalar

3. SAYISAL ANALİZ

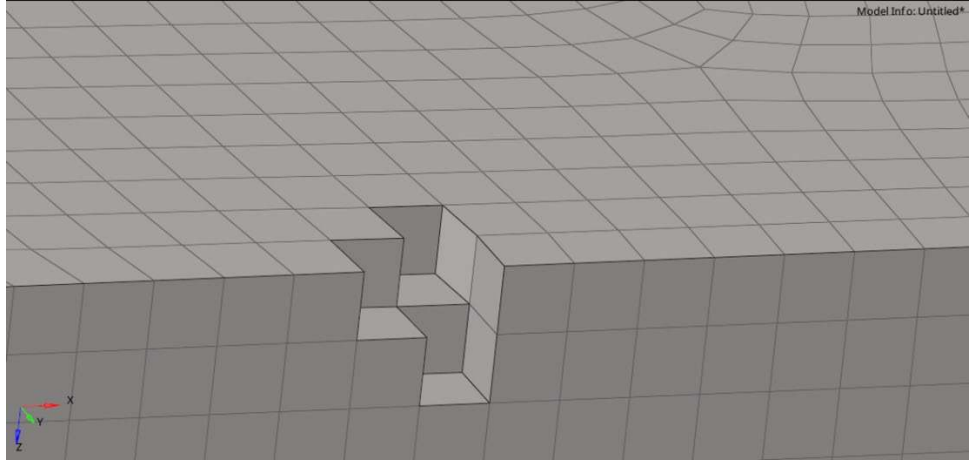
Farklı çaplarda ve uzunlukta CF/PEKK perçin kullanılması halinde gerekli sayısal analizleri yapmak maksadıyla deneysel çalışmada kullanılan alüminyum ve CF/PEEK perçinlerin geometrik özelliklerine göre sayısal model hazırlanmış ve bu model deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Sayısal modelin benzer yük altındaki davranışını incelemek üzere sonlu elemanlar (FEM) analizi tercih edilmiştir. CATIA analiz programı içerisinde hazırlanan model geometrisi Altair HyperMesh ortamına aktarılmış ve sonlu elemanlar ağı bu program üzerinden yapılmıştır. Model içerisinde tanımlanan malzeme verileri, sınır koşulları, kuvvet koşulları doğrultusunda, Altair OptiStruct sonlu eleman çözücüsü kullanılarak FEM analizi sonuçları elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen verilerin deneysel verilerle tutarlılığı kıyaslanmıştır.



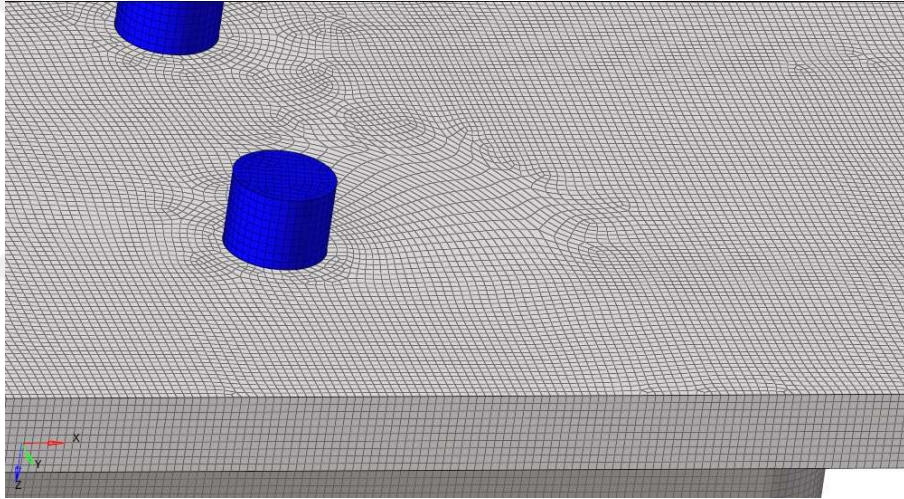
Şekil 3.1. Analiz Modeli

3.1 Mesh Yapısı

Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan analiz modeli Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Model 0.2 mm’lik düğüm noktalarına sahip CHEXA [20,21] sonlu elemanlar ağı ile örülmüştür. Ağ boyutu ve yapısı Non-Lineer analizde [4,22,23] çok büyük etkiye sahip olduğu için küçük elemanlar tercih edilmiştir. Şekil 3.2 üzerinde plaka üzerinde oluşturulan eleman yapısı gösterilmiştir. Plaka ve perçin üzerinde aynı eleman yapısı kullanılmıştır. Geometrik farklılıklarından dolayı perçin ve plaka üzerinde ağ dağılımı farklılık göstermiştir (Şekil 3.33).

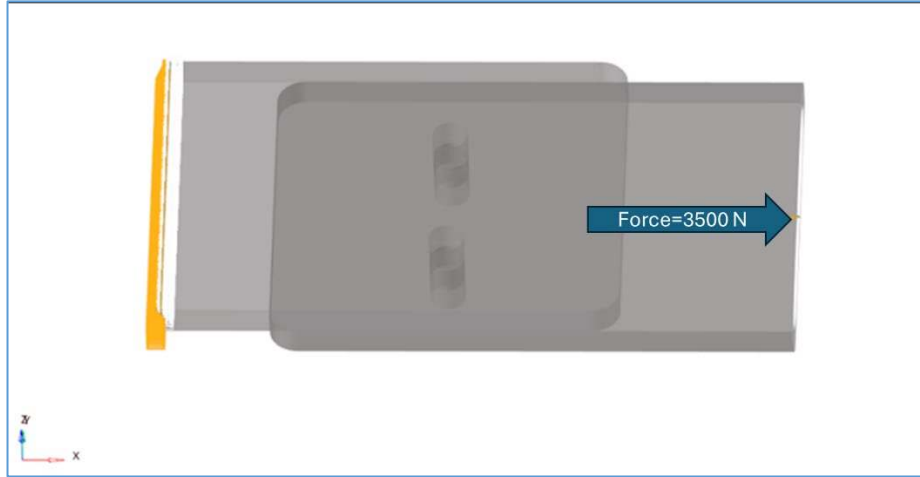


Şekil 3.2. Model Üzerinde Oluşturulan CHEXA Eleman Yapısı



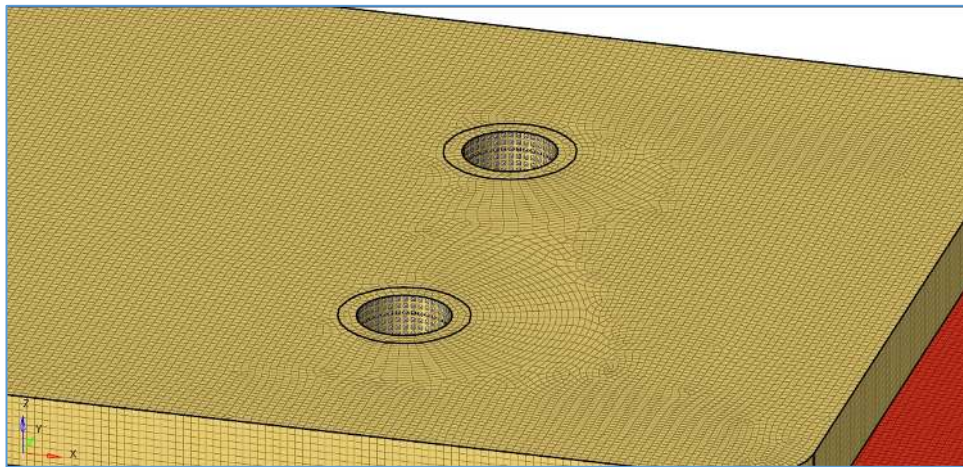
Şekil 3.3. Model Eleman Dağılımı

3.2 Yükleme Şekli ve Sınır Koşulları



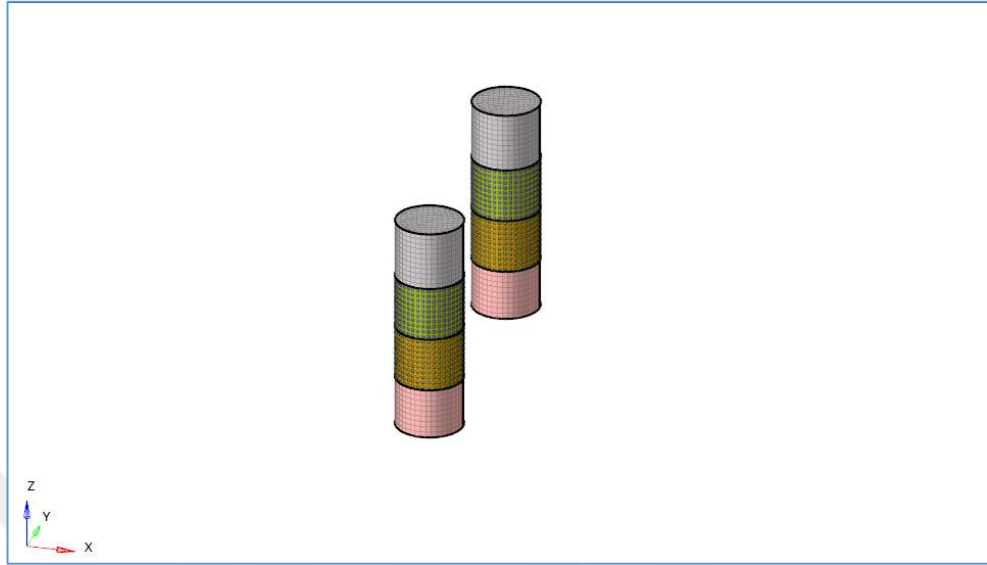
Şekil 3.2. Yük Koşulları

Plakalara uygulanan test yüklemesinin modellenmesi için sınır koşulları tanımlanmıştır. Şekil 3.2 görselinde sınır koşulları gösterilmiştir. Sınır koşulu tanımlarından birincisinde, ilk plaka, bir yüzeyden SPC (Single Point Coinstraint) yöntemi ile sabitlenmiştir. Şekil 3.2 üzerinde SPC ile sabitlenen yüzey sarı şerit ile gösterilmiştir. Bu yöntem ile model üzerinde numunelerin deplasmanı kısıtlanmıştır. İkinci plaka dış yüzeyinden RBE3 yöntemi (Rigid Body Element 3) kullanılarak 3500 N'luk çekme yüküne maruz bırakılmıştır (Şekil 3.2). RBE3 yöntemi ile yükün yüzey boyunca eşit dağıtılması hedeflenmiştir. Bu sayede bölgesel gerilmelerin oluşmasının önüne geçilmiştir.



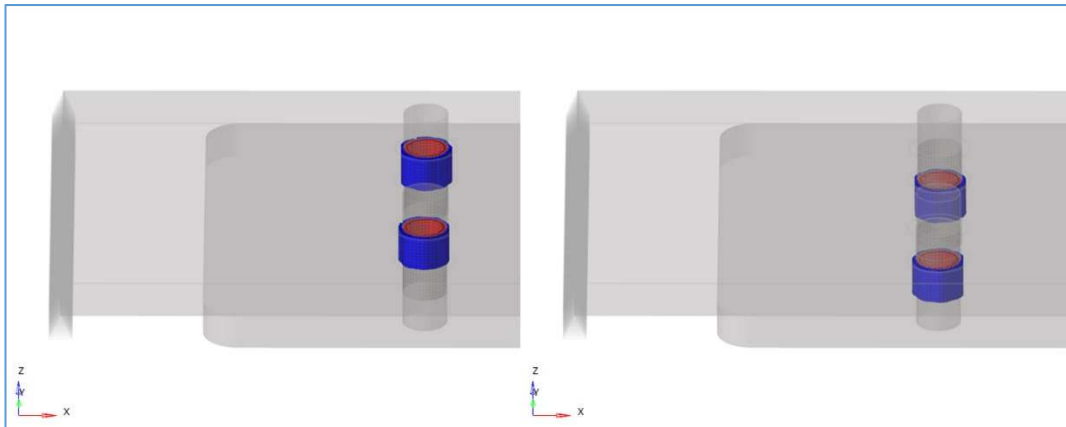
Şekil 3.3. Çelik Plakalar Üzerine Analizi İyileştirmek İçin Atılan Pul Gösterimi

Plakalardaki ağ yapısının iyileştirilmesi için şekil 3.3 üzerinde gösterilen modelde delik yapılarının etrafına pul ilave edilmiştir.



şekil 3.4. Kesitleri Ayrılmış Kompozit Pim Modeli

Kompozit pimler ile plakalarla arasındaki temas yüzeyinin iyileştirilmesi ve yk iletiminin daha sağlıklı olması için şekil 3.4’da gösterildiği üzere plakaların kalınlığı boyunca parçalara blnmştir.



şekil 3.5. Pim ve Plakalarda TIE Kontak Gösterimi

Yüzeyler arasında temas koşulu olarak TIE Kontak yapısı kullanılmıştır. şekil 3.5 üzerinde perçinlerin birinci ve ikinci plaka arasındaki kontakta ilişkisi görülmektedir. Bu temas metodu ile, iki yüzeyin birbiriyle tamamen temas içerisinde olduğu, plaka perçin

yüzeylerinin birbiriyle görelî hareket bulundurmadiğı ve yüzeylere bir ön gerilme bulundurmadiğı varsayılmaktadır.

Name	Value
Solver Keyword:	MAT9ORT
Name:	material1
ID:	4002
Color:	
Include:	[Master Model]
Defined:	☒
Card Image:	MAT9ORT
User Comments:	Hide In Menu/Export
E1:	135000.0
E2:	10000.0
E3:	10000.0
NU12:	0.32
NU23:	0.45
NU31:	0.0237
RHO:	1.59e-06
G12:	5200.0
G23:	3800.0
G31:	5200.0

Şekil 3.6. CF/PEKK Malzeme Verileri

Name	Value
Solver Keyword:	MAT1
Name:	MAT1_3001
ID:	3001
Color:	
Include:	[Master Model]
Defined:	☒
Card Image:	MAT1
User Comments:	Do Not Export
E:	195122.0
G:	75842.33
NU:	0.28
RHO:	7.7504e-09
A:	1.152e-05

Şekil 3.7. PH13-8Mo Çelik Malzeme Özellikleri

3.3 Sonlu Elemanlar (Altair OptiStruct) Programının Uygulaması

Test numunelerinin plakaları PH13-8Mo Çelik malzeme özellikleri veri seti içerisinde [24] alınmıştır. Alınan malzeme özellikleri MAT1 kartı kullanılarak (Şekil 3.7), CF/PEKK malzeme veri setinden alınan [25] veriler MAT9 ortotropik kartı (Şekil 3.6) kullanılarak tanımlanmıştır. MAT1 Kartı yöne bağılı olarak malzeme mekanik özelliklerinin değişmediğı izotropik malzemelerde, MAT9 kartı ise malzeme yönelimlerine bağılı olarak

dayanım değiştiren malzemelerde kullanılmaktadır. MAT9ORT kartında fiber yönelimine göre X,Y ve Z eksenlerinde elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranı farklılık göstermektedir. Analiz içerisinde 8 düğümlü CHEXA elemanı 3 boyutlu katı yapıların modellemesinde kullanılmıştır. Bu eleman tipi ile gerilme dağılımları ve hacimsel deformasyonlar incelenebilmiştir.

Tablo 3.1. Analiz Modelindeki Eleman Sayıları

Parça Adı	Adet	Eleman Sayısı
CF/PEKK Perçin	2	11520
Çelik plaka	2	676511
	Toplam	688031

Ağ yapısı tamamlandığında model içerisinde 688031 eleman oluşturulmuştur (Tablo 3.1). Malzeme özellikleri program içerisinde PSOLID kartı kullanılarak parçalara aktarılmıştır.

HyperMesh 2021 programında modellerin ağ yapısı oluşturulduktan sonra, oluşturulan model OptiStruct çözücüsüne aktarılmıştır. OptiStruct çözücüsünde gerilim analizi Non-Linear Statik Analiz koşulunda yapılmıştır.

Kompozit pimler ve plaka arasındaki temas yüzeylerindeki değişkenlik ve kompozit malzemenin lineer karakteristik göstermemesi sebebiyle non-lineer analiz tercih edilmiştir. Lineer analizde parçalar arası temasın açılıp kapanması, malzemenin plastikleşmesi ve parçalardaki geometrik bozulmalar gerçekçi gözlemlenememektedir. Non-lineer analiz metodunda gerilim değeri iyileştirilip gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ek olarak non-lineer analiz yönteminde yük uygulamasıyla birlikte gerilim ve deformasyon miktarları iteratif olarak güncellenerek yük-deplasman verilerinin doğruluğunu arttırmaktadır.

Non-lineer statik analiz OptiStruct üzerinde NLParm kartının kullanılmasıyla 5 aşamalı olarak yapılmıştır. Plaka üzerindeki gerilme dağılımları Von-Mises akma kriterine göre değerlendirilmiştir. Anizotropik yapıya sahip olan CF/PEKK perçinler için yöne bağlı hasar davranışı değişen malzemelerde kullanılan Maksimum Gerilme Prensibi 'ne göre gerilim dağılımına bakılmıştır. Maksimum gerilme prensibine göre malzemenin herhangi bir yönde izin verdiği maksimum kopma gerilimi değeri aşıldığında kopma başlamaktadır.

6061 Serisi alüminyumların mekanik özellikleri literatürde kapsamlı şekilde tanımlandığı için, tez kapsamında alüminyum perçin için FEM analizi yürütülmemiştir. Deneyin doğrulanması için deneysel yol ile elde edilen değerler literatürde yer alan değerler ile karşılaştırılmıştır.



4. ELDE EDİLEN BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Deneysel Sonuçlar

Yapılan çalışmada CF/PEKK perçinden ve alüminyum perçinden oluşan numuneler perçinlerde kopma görülene kadar yüklemeye maruz bırakılmıştır. Yapılan ölçümlerin sonuçları cihaz üzerinden alınarak saniyede 10 yük-deplasman verisi şeklinde kaydedilmiştir. Bu veriler Excel üzerinden aşağıdaki işlemler yapılarak her bir numune için kayma gerilimi – gerinim değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler Alüminyum ve CF/PEKK malzemesinden dört ayrı grafik olarak gösterilmiştir.

Gerilim değerinin hesaplanmasında Alüminyum perçin için ortalama kayma gerilmesi formülü kullanılmıştır.

Her bir test numunesinde iki adet perçin kullanılmıştır. Numuneler bir yüzeyden sabitlenerek P yükü uygulanmıştır. Dolayısıyla formül düzenlendiği zaman:

$$\tau_{ave} = \frac{Yük}{Alan} = \frac{P}{2 * (\frac{\pi d^2}{4})} \quad (4.1)$$

P: Çekme cihazından uygulanan yük

d: Perçin çapı, (2,5 mm)

Gerinim hesabı yapılırken kullanılan formülde x deplasman, l ise perçin uzunluğu kabul edilmiştir.

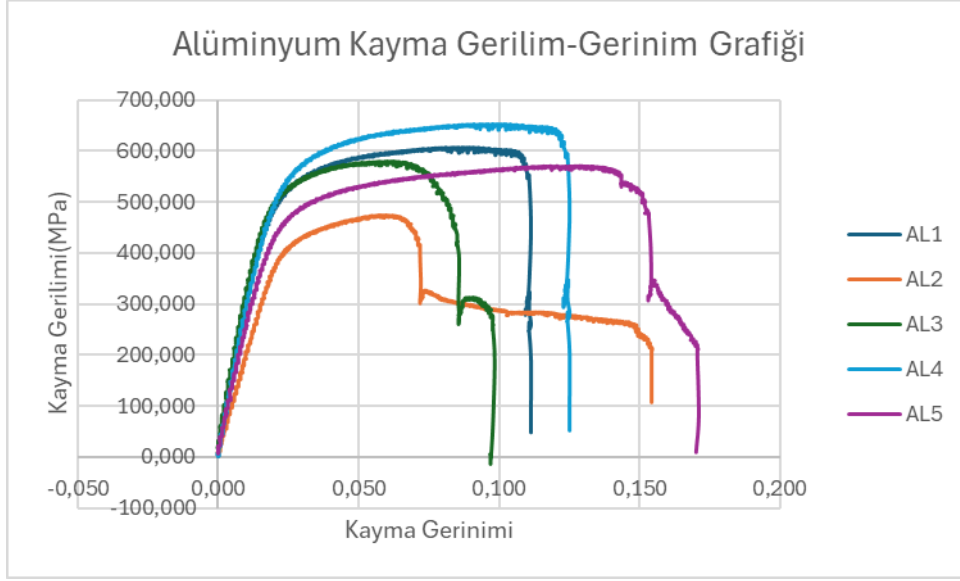
$$\gamma = \arctan \left(\frac{x}{l} \right) \quad (4.2)$$

Bu şekilde mühendislik gerilim-gerinimleri hesaplanıp her bir numune için grafiğe aktarılmıştır. 5 farklı numunenin ortalaması hesaplanarak yeni bir eğri oluşturulmuştur. Bu eğri üzerinden Kayma modülü değeri hesaplanmıştır.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \approx 26 \text{ GPa} \quad (4.3)$$

Alüminyum perçinden elde edilen G değeri yaklaşık 26 GPa'dır.

Literatür incelemesi yapıldığında 6061 serisi Alüminyum için kullanılan standart kayma modülü değeri ise yaklaşık 26 GPa'dır. Deneyin doğrulanması adına yapılan hesaplamalarda da bu değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Alüminyum Perçin Kayma Gerilim-Gerinim Grafiği

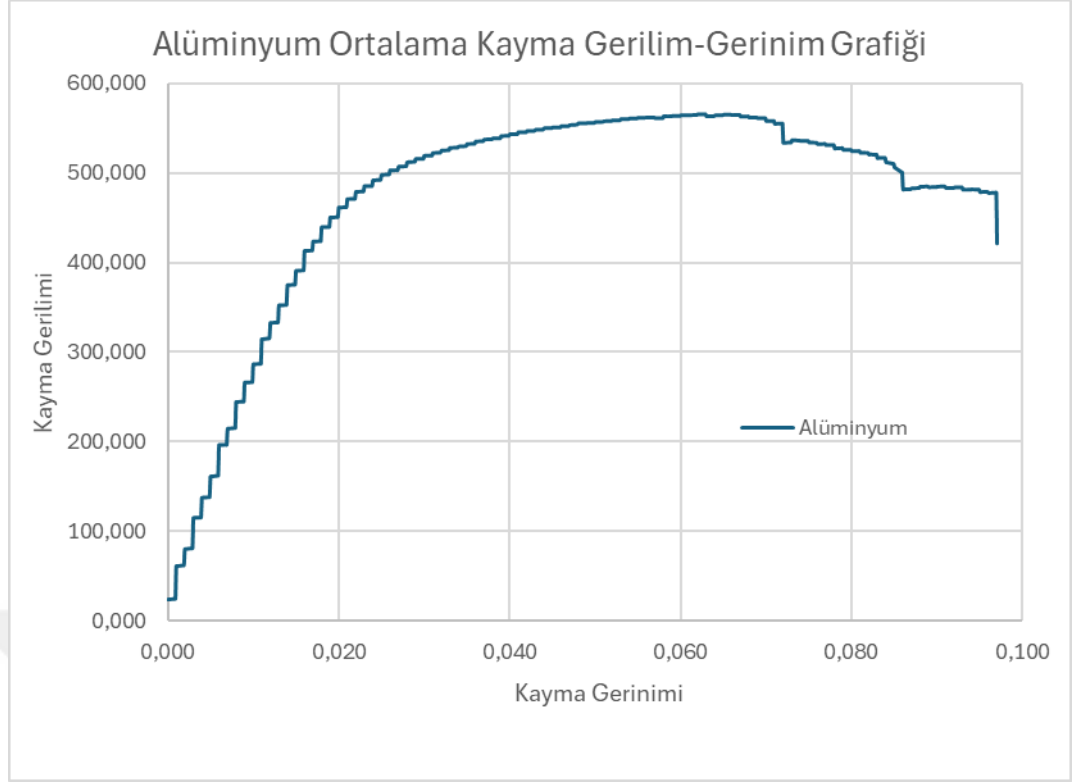
Alüminyum perçinlerin kullanıldığı numunelere ait eğriler Şekil 4.1 üzerinde gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde elastik bölgede perçinlerin benzer davranışlar gösterdiği yaklaşık olarak eşit kayma modüllerine sahip olduğu görülmektedir. Ancak farklı akma gerilim değerlerine sahip olunduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi numune imalat toleranslarındaki küçük farklılıklar, malzeme mikro yapılarındaki farklılıklar olabileceği düşünülmüştür.

Elastik bölgeden sonra yük artışıyla birlikte alüminyum perçinde kalıcı uzama ve şekil değişimi görülmeye devam etmiştir. Bu durumda malzeme boyun vermeye başlamış ve malzemenin sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Alüminyum perçinlerin kullanıldığı numunelerinden elde edilen değerler Tablo 4.1 gösterilmiştir. Ortalama kayma gerilim gerinim eğrisi Şekil 4.2 gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Alüminyum Perçin Deney Sonuçları

Numune numarası	Kayma Akma(τ_y) (MPa)	Mak. Kayma Gerilmesi(τ_{max}) (MPa)
AL 1	467,03	603,61
AL 2	387,67	470,38
AL 3	471,20	575,50
AL 4	557,57	649,65
AL 5	437,99	565,51
Ortalama	464,29	572,93



Şekil 4.2. Alüminyum Perçin Ortalama Kayma Gerilim-Gerinim Grafiği

Bu eğri incelendiğinde yaklaşık 464,3 MPa; 0,017 gerinim değerinde Alüminyum perçinin elastik bölge limitine ulaştığı görülmektedir. Alüminyum perçinin elastik tokluk değerine bakıldığında

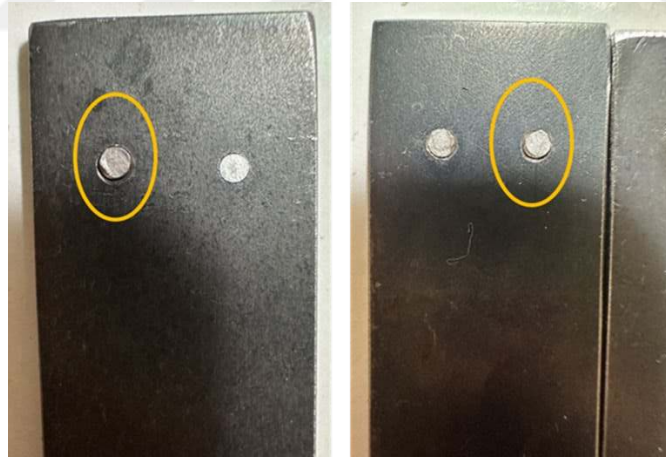
$$U_e = \int_0^{\gamma_y} \tau d\gamma = 4,15 \text{ MJ}/m^3 \text{ elde edilmiştir.} \quad (4.5)$$

Kopma gerçekleşene kadar perçinin depoladığı ortalama enerjiye bakılacak olursa 46,1 MJ/m³ değeri elde edilmektedir. Enerjinin büyük bölümü plastik deformasyon bölgesinde malzeme tarafından absorbe edilmiştir. Alüminyum perçinin plastik deformasyon sürecinde daha büyük oranda enerji absorbe etmiş olması tokluk davranışının bu bölgede şekillendiğini göstermektedir.



Şekil 4.3. Kopmaya uğrayan Alüminyum Perçinli Numuneler

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de Alüminyum perçine sahip numunelerin deney sonucundaki görüntüleri bulunmaktadır. Numuneler incelendiğinde plakalardaki perçin deliklerinde plastik ezilme meydana geldiği ve uygulanan yükleme ile plakaların akma gerilmesinden daha büyük gerilmeye maruz kalmasından dolayı plastik deformasyona uğrayarak kalıcı bozulmaya uğradığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. Alüminyum Delik Deformasyonları

CF/PEKK malzemesinin kullanıldığı perçinin kayma gerilim-gerinim verileri Şekil 4.5’te verilmiştir. Deneyde kullanılan perçinlerin imalatında UD fiber laminalar kullanılmıştır. Kompozit perçin anizotropik bir yapıya sahiptir. Bu sebeple fiber yönelimine göre eksenlerde farklı elastisite modüllerine sahiptir.

Deneyde kullanılan CF/PEKK perçinde UD fiberlerin yönelimi perçin eksenine paralel şekildedir. Deneyde perçine uygulanan yükleme fiberlerin yönelim eksene dik yönde

uygulanmıştır. Malzeme veri setinden E_1 (0° yönünde çekme modülü), E_2 (90° yönünde çekme modülü) G_1 (düzlem üzerindeki kayma modülü (In-plane Shear Modulus)) değerleri alınmıştır. ASTM D3039 [15] standardı referans alınarak [Transverse Isotropic Behaviours] ν_{21} değeri hesaplanmıştır.

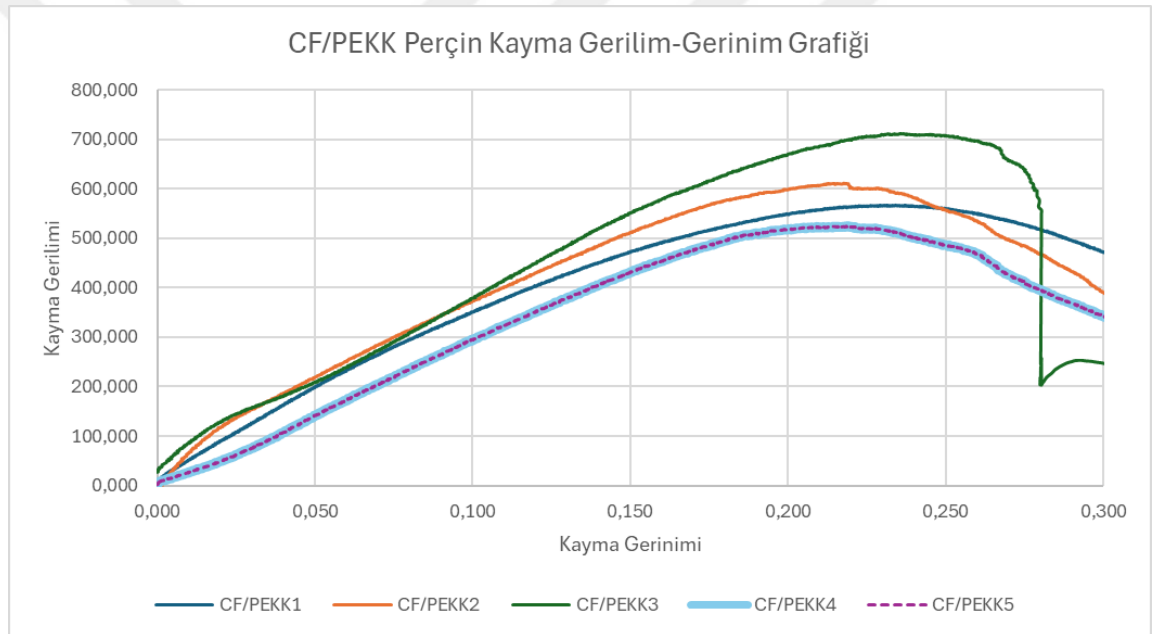
E_1 (Çekme Modülü 0°): 135 GPa

E_2 (Çekme Modülü 90°): 10 GPa

G_{12} (In-Plane Shear Modulus): 5.2 GPa

$\nu_{12} \approx 0.28$ [4]

$$\nu_{21} = \nu_{12} * \frac{E_2}{E_1} \quad (4.6)$$



Şekil 4.5. CF/PEKK Perçin Kayma Gerilim-Gerinim Grafiği

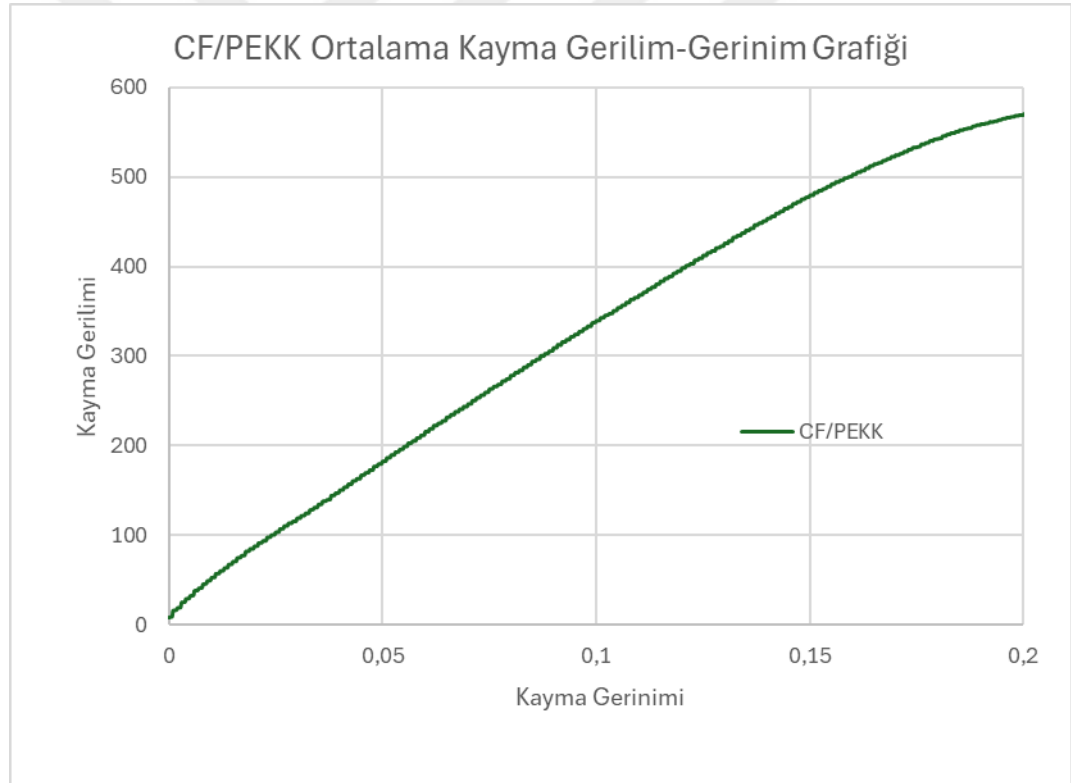
CF/PEKK malzemesinin gerilim-gerilim grafiği Şekil 4.5 üzerinde gösterilmiştir. Grafikte 5 farklı numunenin Gerilim-Gerinim eğrileri görülmektedir. Gerilim-Gerinim grafiği incelendiğinde malzeme yapısı bakımından göze çarpan özellik, kompozit perçinlerin “Sözde-sünek” (pseudo ductility) davranış göstermesidir. Bu davranışın görülme sebebi perçin içerisindeki fiber ve matris dağılımından kaynaklanabilmektedir.

CF/PEKK perçinlerin numunelerinden elde edilen değerler Tablo 4.2 gösterilmiştir.

Tablo 4.2. CF/PEKK Perçin Deney Sonuçları

Numune numarası	Kayma Akma(τ_y) (MPa)	Mak. Kayma Gerilmesi(τ_{max}) (MPa)
CF/PEKK 1	472,65	567,51
CF/PEKK 2	507,34	610,29
CF/PEKK 3	561,23	708,34
CF/PEKK 4	474,33	522,76
CF/PEKK 5	478,23	523,76
Ortalama	498,76	586,53

Kompozit perçinlere ait ortalama Gerilim-Gerinim eğrisi Şekil 4.6 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.6. CF/PEKK Ortalama Kayma Gerilim-Gerinim Grafiği

Deney sonucunda elde edilen grafik incelendiğinde kompozit perçinde akma gerilimini aşma noktasına kadar depolanan ortalama enerji;

$$U_e = \int_0^{\gamma_y} \tau d\gamma = 42,6 \text{ MJ/m}^3 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Alüminyum perçinde elastik bölgede depolanan enerji $4,15 \text{ MJ/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. CF/PEKK perçin ile Alüminyum perçin kıyaslandığında, CF/PEKK perçinde elastik bölgede depolanan enerji yaklaşık 10 kat daha büyüktür.

Kompozit perçinlerin ortalama yük kapasitesinin alüminyum perçinlerden daha yüksek olduğu görülmektedir.

$$U_t = \int_0^{\gamma_f} \tau d\gamma = 164,7 \text{ MJ/m}^3 \quad (4.7)$$

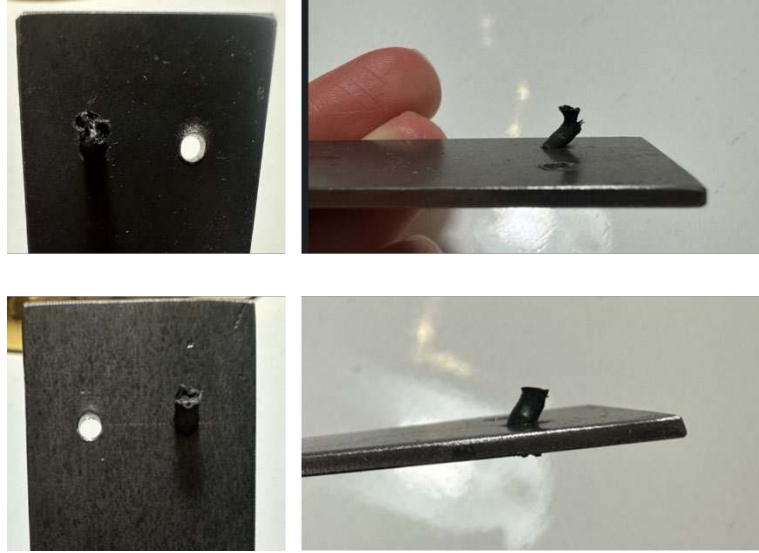
Ancak kompozit perçinlerin Alüminyum perçinlerle aynı gerilim değerlerinde daha yüksek kayma gerinimine sahip olduğu görülmüştür.

Perçinlere ait grafikler incelendiğinde, kompozit perçinler aynı malzemeden imal edildiği halde eğrilerde numunelerin kendi içlerinde de farklı yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların perçin imalat yöntemindeki hassasiyet ve montaj işçiliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Çekme Testi Sonrası CF/PEKK Numuneleri

Kompozit perçinli deney numunelerinde birbirinden farklı mekanik hasarlar gözlemlenmiştir. Şekil 4.7 görselindeki numunelerde perçinlerde gözle görülür bir deformasyon oluşmuştur. Perçinlerden yataklarına aktarılan yükleme sebebiyle yataklarda da deformasyon meydana gelerek yatak yapısında ezilme gerçekleşmiş ve perçinin delikten çıkmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.8. CF/PEKK Perçinlerdeki Plastik Deformasyon

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 görsellerinde 1,2,3 numaralı test numunelerindeki perçinlerde plastik deformasyon oluşarak şekil bozukluğu meydana gelmiş ancak fiberlerde delaminasyon görülmemiştir.



Şekil 4.9. CF/PEKK Perçinlerde Deney Sonrası Hasar

Şekil 4.9'te bulunan 4 ve 5 numaralı numunelerde test sonucunda perçin fiberlerinde delaminasyon meydana gelmiş. Bu numunelerde kullanılan CF/PEKK malzemeden yapılmış

perçinlerde kopma davranışı daha rahat gözlemlenebilmiştir. Perçin içerisindeki fiberler hem matris malzemesinden ayrılmış hem de karbon fiberlerde kopma meydana gelmiştir.

Şekil 4.9’de gösterilen 4 ve 5 numaralı numunelerin ortak noktası yataklardaki tutunma oranının, Şekil 4.7’deki 1,2,3 numaralı numunelere göre daha yüksek olmasıdır.

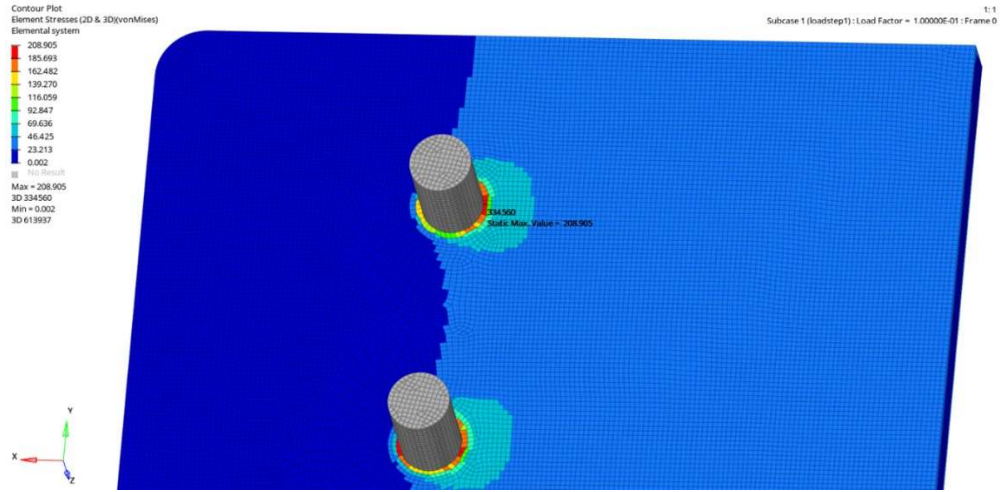


Şekil 4.10. Deney Sonrası Numunelerde Meydana Gelen Yatak Hasarları

Şekil 4.10’de yatak hasarları yakından gösterilmiştir. Kompozit perçine sahip numunelerde yatak hasarı daha net gözlemlenmiştir. Kompozit perçinin yük depolama kapasitesinin büyüklüğünden dolayı perçin yataklarında daha çok hasara neden olduğu gözlemlenmiştir.

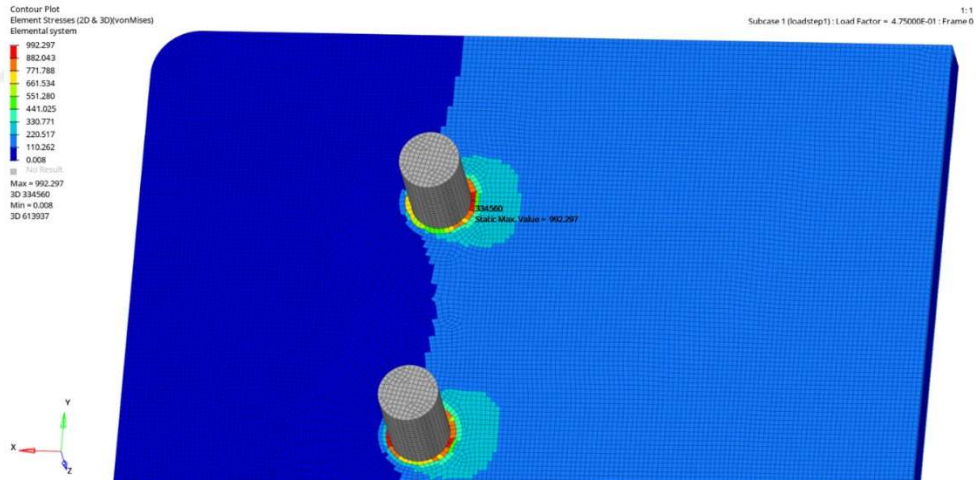
4.2. FEM Analizi Sonuçları

FEM analizi sonucunda pim ve plakaların üzerinde elde edilen yük aktarım mekanizmaları, gerilme, deplasman değerleri incelenmiştir. Gerilme değerlerinde ve yayılma mekanizmalarında malzeme iç yapısı, fiber yönü, parçalar arası temas tanımı etkili olmuştur.

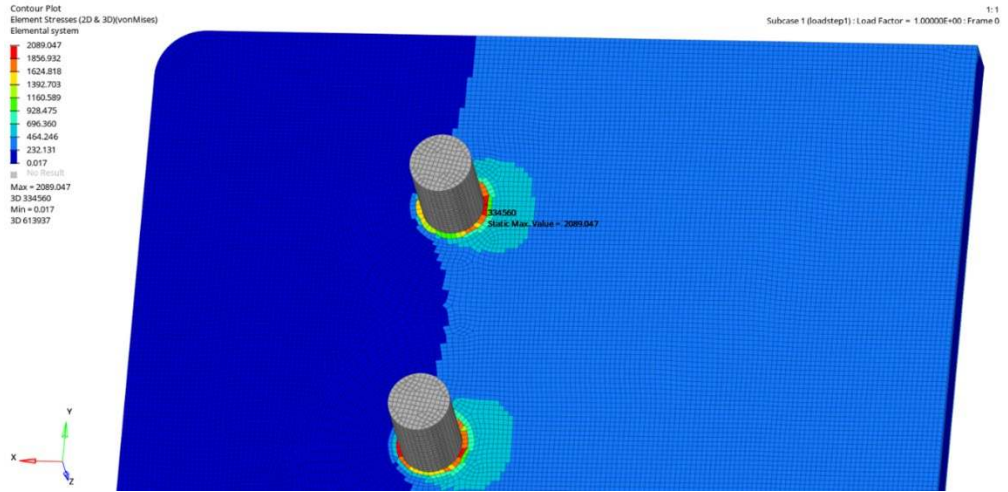


Şekil 4.11. Plaka Üzerinde 1. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı

Yüklemenin ilk aşamasının sonucunda plakada oluşan gerilmeler gösterilmiştir (Şekil 4.11). Gerilim değerlerinin delik çevresinden yayılmaya başladığı görülmektedir. Deliğe en yakın olan bölgeden başlayarak elemanlar üzerinde düzenli biçimde yükün aktarıldığı görülmektedir.

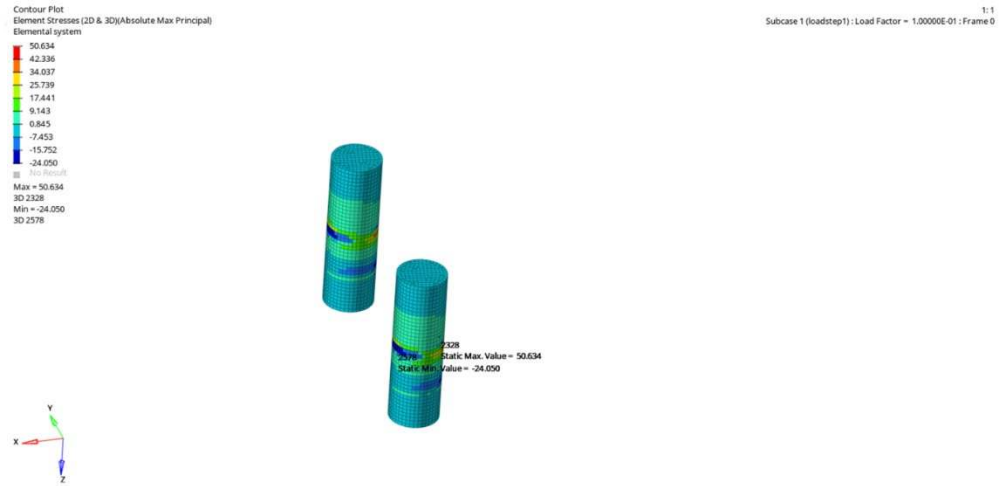


Şekil 4.12. Plaka Üzerinde 3. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı



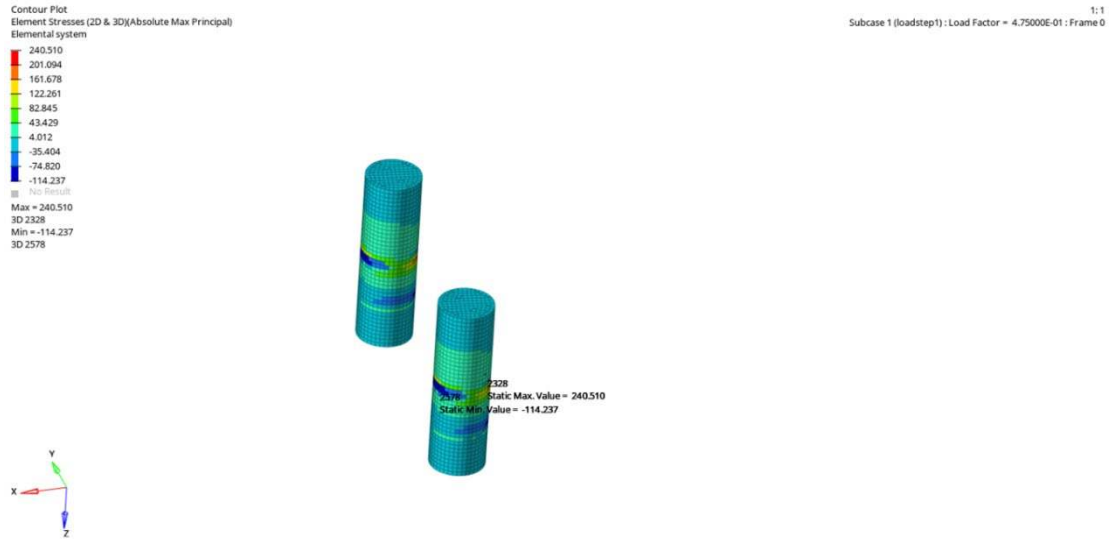
Şekil 4.13. Plaka Üzerinde 5. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 incelendiğinde gerilim yayılması ve birikimin gerçekleştiği elemanlar görülmektedir. Yükleme miktarının artışı gerilme alanlarının belirginleşmesine sebep olmuştur. Perçin deliği çevresinde deformasyon ve ezilmeler meydana gelmiştir. Analiz üzerinde görülen bu davranış deneyde görülen plastik deformasyonun görüldüğü bölge ile benzerlik göstermektedir.

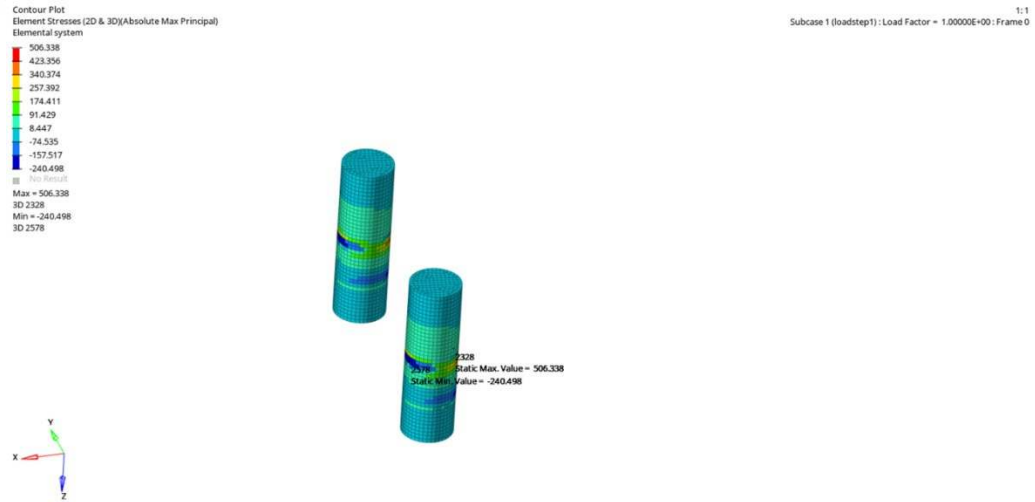


Şekil 4.14. Pim Üzerinde 1. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı

Yükleme başladıktan sonra CF/PEKK perçin pimi üzerinde ilk aşama sonrasındaki değerler ve yayılım Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Temas bölgelerindeki yük dağılımı simetrik olarak başlamıştır. Modelin sınır koşullarının doğru tanımlandığı görülmektedir.

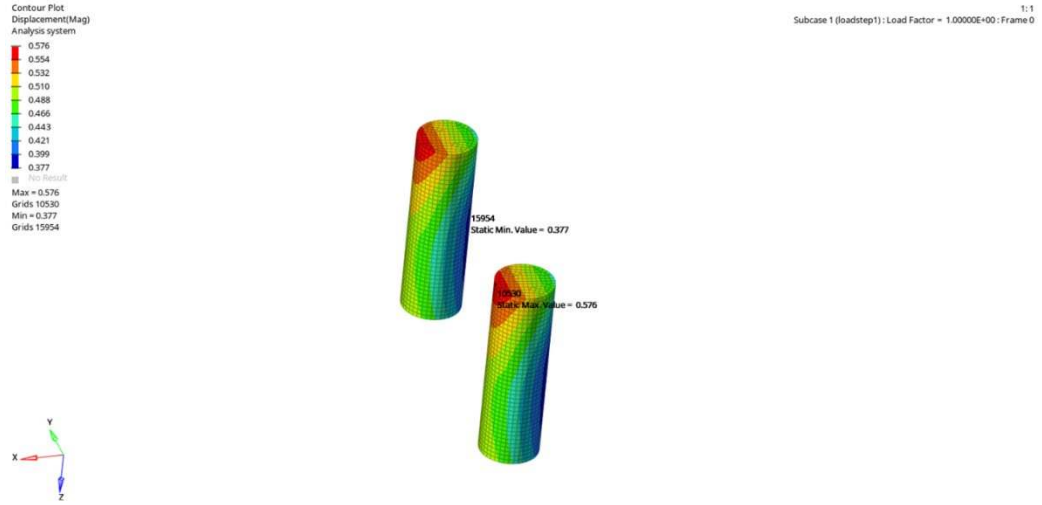


Şekil 4.15. Pim Üzerinde 3. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı



Şekil 4.16. Pim Üzerinde 5. Step sonucunda Görülen Gerilim Dağılımı

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde gerilim yayılması ve birikimin gerçekleştiği elemanlar görülmektedir. Uygulanan yükün artışıyla birlikte perçinlerde oluşan gerilimler plaka ile temas yüzeylerinden yayılıma başlamıştır. Perçine uygulanan kuvvet fiberlere dik ekseninde bir gerilme meydana getirmiştir. Pimlerde plakaların hareketi doğrultusunda bir yüzeyde basma bir yüzeyde çekme gerilimi oluşturmuştur. Yükleme matris yardımıyla fiberlere aktarılmış ve lokal gerilme yığılmaları oluşmuştur. Bu alanlar hasar başlangıç noktaları olarak kabul edilmektedir. CF/PEKK kompozit perçinlerde ani bir kopma gözlemlenmemiştir. Fiberlerin yönelimi doğrultusunda enerji sönmülmüş ve perçinde kademeli deformasyon meydana gelmiştir. Analiz sonucunda CF/PEKK perçinde maksimum gerilme değeri 506.338 MPa elde edilmiştir.



Şekil 4.17. CF/PEKK Perçinde Meydana Gelen Yer Değiştirme Dağılımı

Analiz koşulu olarak bir plakadan uygulanan çekme yüklemesi sonucunda perçin üzerinde meydana gelen toplam yer değiştirme dağılımı Şekil 4.17’da gösterilmiştir. Maksimum yer değiştirme değeri perçinin uç noktasında elde edilip 0.576 mm değerine sahiptir. Minimum yer değiştirme değeri perçinin sabit plaka ile temas içerisinde olduğu bölgede 0.377 mm olarak elde edilmiştir. Yer değiştirme dağılımı incelendiğinde, deplasmanın yükün uygulandığı üst plaka bölgesinde ve temas yüzeylerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Analize bakılarak yük aktarımının pim boyunca homojen olmadığını, plaka ve pim arasındaki temas yüzeylerinde daha yüksek deformasyon oluştuğu gözlemlenmektedir.

CF/PEKK malzemenin anizotropik yapısı nedeniyle fiber yönünde rijitlik yüksek iken, fiberlere dik yönlerde yer değiştirme miktarı daha yüksek elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen bu yer değiştirme (deplasman) dağılımı, deneysel çalışmada gözlemlenen deformasyon bölgeleriyle uyumluluk göstermektedir.

4.3. Deneysel Sonuçların ve FEM Analizinin Karşılaştırılması

Bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışma sonuçları karşılaştırıldığında büyük ölçüde benzerlik görülmektedir. FEM analizinde, çekme yükünün artışıyla plaka–perçin temas yüzeylerinde gerilme artışları meydana gelmiştir. Analizde görülen gerilme yoğunlaşması olan bölgeler, deneysel testlerde gözlemlenen yatak hasarı ve

plastik deformasyon alanlarıyla örtüşmektedir. Analiz ve deneysel sonuçların karşılaştırılması Tablo 4.3. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 4.3. CF/PEKK FEM Analizi ve Deneysel Sonuç Kıyaslaması

	FEM	Deneysel Sonuç	Fark(%)
Maksimum Gerilme (MPa)	506,30	586,50	13,67

CF/PEKK perçin için verilen tablodaki sonuçlar incelendiğinde FEM analizi ve deneysel sonuç arasında maksimum kesme gerilmelerinde değerleri yaklaşık %13,6 sapma meydana gelmiştir. Deneysel sonuç daha yüksek çıkmıştır.

FEM analizi sonucunda plakadan elde edilen gerilme değerleri, perçin delik çevresinde maksimum değere ulaşmış ve yükün bu bölgelerden aktarıldığını görülmüştür. Deneysel çalışmada perçin ve plaka temas bölgelerinde plaka yüzeyinde; ezilme ve delik deformasyonu, CF/PEKK perçinde ise matris ayrışması ve plastik deformasyon tespit edilmiştir. FEM analizi için tasarlanan modelde tanımlanan sınır ve temas koşullarının fiziksel davranışı doğru yansıttığı görülmektedir.

Deneysel çalışmada CF/PEKK kompozit perçinlerde gözlemlenen pseudo-ductile (yarı sünek) davranış, sayısal analiz sonuçlarında da gözlemlenmiştir. Numunelere uygulanan çekme yüklemesi altında fiber yönündeki rijitlik etkisiyle, CF/PEKK malzeme ani kopma göstermemiş; enerji absorbe ederek kademeli deformasyon sergilemiştir. FEM analiz sonuçları ayrıca, fiberlere dik yönde oluşan gerilme konsantrasyonlarının deneysel çalışmadaki delaminasyon bölgeleriyle uyumlu gözlenmiştir.

5. SONUÇ

Havacılık endüstrisinde kullanılan bağlayıcılar hava aracının toplam ağırlığında önemli bir yer tutmaktadır. Hava araçlarında yapısal ağırlığın azaltılması ve malzeme dayanımının artırılması açısından alternatif çalışmalar yapılmaktadır. Günümüzde havacılık endüstrisinde metalik bağlayıcılar yerine daha hafif olan termoplastik kompozit bağlayıcıların kullanılması değerlendirilmektedir. Bu tez kapsamında, yapılarda kullanılan mekanik bağlantı elemanlarının mekanik davranışları deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) aracılığıyla incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, termoplastik CF/PEKK kompozit perçinlerin metal perçinlerle kıyaslanarak bağlantı bölgelerindeki yük aktarımı ve hasar gelişimini incelemektir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmada, CF/PEKK ve alüminyum perçinli bağlantılar aynı çekme yükleme koşullarında teste tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, CF/PEKK kompozit perçinli numunelerin dayandığı ortalama maksimum gerilim dayanımı 586 MPa, alüminyum perçinli numunelerin ise ortalama 573 MPa olarak ölçülmüştür. Bu fark, kompozit perçinlerin yaklaşık %2,5 oranında daha yüksek dayanım sağladığını göstermektedir. Yao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da termoplastik bağlayıcıların metal bağlayıcılara göre yaklaşık %3-6 daha yüksek oranda yük taşıdığı belirtilmiştir [8]. CF/PEKK perçinin ortalama kayma akma gerilimi 498 MPa, Al perçinin ise 464 MPa'dır. Kompozit perçinlerin kayma akma gerilimlerinin daha büyük olduğu deney ile gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan benzer çalışmalardaki sonuçları destekler yönde sonuç elde edilmiştir [7,8].

Perçinler deney esnasında uygulanan yük sonucunda meydana gelen gerilme değerlerinde CF/PEKK perçinde meydana gelen gerilim değeri Al perçinden daha büyüktür [1,19]. Tüm test numunelerinde gerilim-gerinim eğrileri incelendiğinde CF/PEKK perçinin ortalama gerilim gerinim eğrisi altında kalan alan daha büyüktür; bu alanın büyüklüğü ile CF/PEKK malzemesinin daha fazla enerji sönümlendiği görülmüştür. Bu Çalışma kapsamında malzeme davranışları incelendiğinde, Fortier ve Lebel'in çalışmasındaki [9] termoplastik kompozit davranışına benzer şekilde, CF/PEKK malzemesinin yarı sünek (pseudo-ductile) bir davranış sergilediği görülmektedir [9].

Deneysel çalışma sonucunda, alüminyum perçinli numunelerde delik çevresinde plastik deformasyon ve bölgesel ezilmeler meydana geldiği görülmüştür. Kompozit perçinli numunelerde perçinlerde fiberlerde kopma, matris ayrışması ve delaminasyon meydana

geldiği, plakadaki deformasyonların alüminyum perçinli numunelerin deformasyonundan büyük olduğu görülmüştür. Kompozit numunelerde kırılma ani değil, kademeli deformasyon biçiminde gerçekleşmiştir. Bu davranış, Absi ve Lebel'in CF/PEKK perçin üzerine yaptığı çalışmadaki hasar mekanizmaları ile uyum içerisindedir [7]. Bu kademeli deformasyona geçişi CF/PEKK perçinin enerjiyi bir anda boşaltmak yerine sönümleme kabiliyetine sahip oluşu ile değerlendirilmiştir. Bu özelliğin havacılıkta kaza-kırma sebep olacak perçin bağlayıcı komponentler açısından önemli olduğu değerlendirilmektedir.

FEM analizleri, deneysel bulguların güvenilirliğini doğrulamak ve doğrulanmış bu FEM model üzerinden farklı çap, boy ve malzemeden yapılmış perçin simülasyonlarını yapabilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

FEM analizi sonucunda, kompozit pim üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri 506 MPa, maksimum yer değiştirme 0.44 mm olarak elde edilmiştir. Analiz sonucunda görülen gerilmelerin özellikle plaka-perçin temas yüzeylerinde yoğunlaştığı, fiberlere dik doğrultuda matris bölgelerinde yığıldığı görülmüştür. Bu gerilme yoğunlaşması bulunan bölgeler, deneylerde tespit edilen deformasyon alanlarıyla örtüşmektedir. Fiber yönündeki yüksek rijitlik sayesinde, yük transferi fiber doğrultusunda dengeli, matris doğrultusunda ise sınırlı şekilde gerçekleşmiştir.

FEM sonuçlarında görülen deplasman dağılımı, deneysel çalışma verilerindeki yer değiştirme görülen bölgelerle büyük ölçüde uyumludur. Yük artışının etkisiyle birlikte plaka üzerinde maksimum yer değiştirmeler belirginleşmiş ve bu bölgeler deneysel çalışmada gözlemlenen ezilme alanlarıyla örtüşmüştür.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında %90'a yakın bir uyum sağlanmıştır. Bu benzerlik, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin fiziksel davranışı doğru temsil ettiğini ve CF/PEKK kompozit perçinlerin mekanik performansının güvenilir şekilde simüle edilebildiğini göstermektedir. Bu sebeple benzer bir akademik çalışmada FEM analizi modelinin kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Kompozit perçinler, metal perçinlere kıyasla daha yüksek akma dayanımına, yüksek enerji sönümleme kapasitesine ve yarı sünek (pseudo-ductile) davranışa sahiptir. Kompozit perçin daha yüksek akma dayanımına sahiptir ancak yüksek akma değerine ulaştığında Al perçinden daha yüksek bir deformasyona da sahip olmaktadır [1,6,7,9].

Tez kapsamında elde edilen bulgular, CF/PEKK perçinlerin özellikle havacılık ve uzay yapılarında ikincil bağlantı elemanı olarak kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışmanın sınırlılığı olarak görülebilecek ve ilerleyen dönemde araştırılabilecek konular olarak farklı fiber yönelimlerinin, perçin geometrilerinin ve sıklık

oranlarının bağlantı dayanımına etkilerinin incelenmesi; ayrıca nem, sıcaklık ve yorulma gibi çevresel etkenlerin dahil edilmesi, malzemenin uzun dönemli performansının daha detaylı şekilde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışma kapsamında metalik perçinin tek kesme bindirme deneyi kapsamında gerilme dayanımı ile termoplastik kompozit perçinin mekanik performansları incelenmiştir. Havacılık sektöründe gün geçtikte kompozit malzemenin kullanım oranı ve kullanım alanı çeşitliliği artmaktadır. Bu çalışmayla bağlantılı olarak ileriye dönük kompozit bağlayıcılar yeni bir çalışma alanı olarak düşünülebilir. Yüksek dayanım/ağırlık oranları, korozyon dirençleri, enerji sönümleme kabiliyetleri sayesinde kompozit malzemeler bağlayıcı tasarımları için yeni birer aday olmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] X. Li, S. Kumar, D.-W. Hwang, D.-H. Shin, S.-Y. Bae, and Y.-H. Kim, “Geometry and temperature effects on tensile properties and failure behaviors of open-hole and bolted-joint CF/PEKK composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 185, art. 108336, 2024, doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108336.
- [2] L. Yang, X. Wang, Y. Huang, X. Zhang, X. Guo, and Z. Li, “Strength characteristics analysis and unified model establishment of bonded, riveted, and adhesive–rivet hybrid CFRP joints,” *Engineering Structures*, vol. 322, art. 119121, 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.119121.
- [3] E. P. DeGarmo, J. T. Black, and R. A. Kohser, *Materials and Processes in Manufacturing*, 12th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019
- [4] S. D. Thoppul, J. Finegan, and R. F. Gibson, “Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review,” *Composites Science and Technology*, vol. 69, pp. 301–329, 2009, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.09.037.
- [5] H. Mulazimoglu and L. Haylock, “Recent developments in techniques to minimize lightning current arcing between fasteners and composite structure,” in *Proc. Int. Conf. on Lightning & Static Electricity (ICOLSE)*, Oxford, U.K., 2011.
- [6] W. Li, S. Guo, I. K. Giannopoulos, M. Lin, Y. Xiong, Y. Liu, and Z. Shen, “3D-printed thermoplastic composite fasteners for single lap joint reinforcement,” *Composite Structures*, vol. 282, art. 115085, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.115085.
- [7] C. Absi, N. Alsinani, and L. L. Lebel, “Carbon fiber reinforced poly(ether ether ketone) rivets for fastening composite structures,” *Composite Structures*, vol. 280, art. 114877, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114877.
- [8] C. Yao, Z. Qi, W. Chen, and C. Zhang, “Experimental study on CF/PEEK thermoplastic fastener: Effects of fastener matrix crystallinity and fiber content on the strength of single-lap joint,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 213, art. 108737, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108737.

- [9] V. Fortier, J.-E. Brunel, and L. L. Lebel, “Fastening composite structures using braided thermoplastic composite rivets,” *Journal of Composite Materials*, vol. 54, no. 6, pp. 801–812, 2020, doi: 10.1177/0021998319867375.
- [10] W. Li, S. Guo, I. K. Giannopoulos, S. He, and Y. Liu, “Strength enhancement of bonded composite laminate joints reinforced by composite pins,” *Composite Structures*, vol. 236, art. 111916, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111916.
- [11] S.-S. Yao, F.-L. Jin, K.-Y. Rhee, D. Hui, and S.-J. Park, “Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 142, pp. 241–250, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.007.
- [12] C. Yao, Z. Qi, and W. Chen, “Lightweight and high-strength interference-fit composite joint reinforced by thermoplastic composite fastener,” *Thin-Walled Structures*, vol. 179, art. 109471, 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.109471.
- [13] V. G. Belardi, P. Fanelli, and F. Vivio, “Analysis of multi-bolt composite joints with a user-defined finite element for the evaluation of load distribution and secondary bending,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 224, art. 109378, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109378.
- [14] G. G. Marannano and B. Zuccarello, “Numerical–experimental analysis of hybrid double lap aluminum–CFRP joints,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 71, pp. 28–39, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.11.025.
- [15] ASTM International, *ASTM D1002-10 (Reapproved 2019): Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019, doi: 10.1520/D1002-10R19.
- [16] U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, *FAA Advisory Circular AC 43.13-1B: Acceptable Methods, Techniques, and Practices – Aircraft Inspection and Repair*, Washington, DC, USA, 2001.

- [17] ASTM International, *ASTM D3039/D3039M-17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017, doi: 10.1520/D3039_D3039M-17.
- [18] D. Ray, H. Pérez-Martín, A. Baidak, P. Mackenzie, and C. M. Ó Brádaigh, “Microstructural and micromechanical property characterisation of CF/PEKK composites using nanoindentation,” *Materials & Design*, vol. 234, art. 112359, 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.112359.
- [19] X. Li, S. Kumar, D.-W. Hwang, D.-H. Shin, and Y.-H. Kim, “Pin-loaded tensile behavior and failure analysis of CF/PEKK composites under extreme temperature,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 175, art. 107823, 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107823.
- [20] Altair Engineering, “CHEXA Bulk Data Entry — Reference Guide (OptiStruct 2021),” Altair Engineering Inc., 2021.
- [21] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, “Chapter 7 – Elasticity: Two- and Three-Dimensional Finite Elements,” in *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7th ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013, pp. 169–213, doi: 10.1016/B978-1-85617-633-0.00007-4.
- [22] Altair Engineering, *OptiStruct Nonlinear Static Analysis — User Guide (2025.1)*, Altair Engineering Inc., 2025.
- [23] R. Aniello, V. Acanfora, A. Sellitto, C. Palumbo, and F. Di Caprio, “A comparative numerical–experimental investigation on the tensile behaviour of bonded, rivetted and hybrid composite joints configurations,” *Composite Structures*, 2023, art. 117114, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117114.
- [24] Battelle Memorial Institute, *MMPDS-11: Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS)*, FAA Report No. 11, Washington, DC, USA, 2016, pp. 507–516.
- [25] Toray Advanced Composites, *Toray Cetex® TC1320 PEKK Product Data Sheet (v4.0)*, Technical Report, 2022.

