

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KOMPOZİT MALZEMELERİN DİL VE OLUK TEKNİĞİ İLE
YAPIŞTIRMASINDA DİL GEOMETRİSİNİN YORULMA
DAYANIMINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

ÇİĞDEM ERSAN

DENİZLİ, HAZİRAN - 2020

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KOMPOZİT MALZEMELERİN DİL VE OLUK TEKNİĞİ İLE
YAPIŞTIRMASINDA DİL GEOMETRİSİNİN YORULMA
DAYANIMINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

ÇİĞDEM ERSAN

DENİZLİ, HAZİRAN - 2020

Bu tez çalışması PAUBAP tarafından 2014FBE039 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

ÇİĞDEM ERSAN



ÖZET

KOMPOZİT MALZEMELERİN DİL VE OLUK TEKNİĞİ İLE YAPIŞTIRMASINDA DİL GEOMETRİSİNİN YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ

**DOKTORA TEZİ
ÇİĞDEM ERSAN**

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. OLCAY ERSEL CANYURT)**

DENİZLİ, HAZİRAN - 2020

Bu tez çalışmasında, kalın kompozit malzemeler için dinamik yük altında çalışan bağlantılarda, dil/oluk birleştirme tekniği üzerinde uç profil tasarımının iyileştirilmesi ile yüksek dayanım sağlayacak en uygun optimum bağlantı tasarımlarının ve parametrelerinin elde edilmesi sağlanmıştır.

Literatürde, kalınlık boyunca açılı ve basamaklı alın yapıştırma bağlantıları teknikleri kullanılmıştır. Bu çalışmada dil/oluk şeklinde birleştirme ve dil üzerinde oluşturulan özel uç geometrisi ile yapıştırma sağlanmıştır. Kalın kompozit malzemelerde dil/oluk tekniği kullanılarak, malzemenin yük taşıma kapasitesi kalınlıkla birlikte artmıştır. Dil bölgesi üzerinde yapılacak özel uç profil tasarımların yük taşıma kapasitesi üzerine etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Uygun bir tasarım ile yapışma bölgesinin sorunlu bölge olması önlenmiştir. Elde edilen uygun tasarımlar ve sonuçları, kalın kompozit malzeme kullanan firmalara daha dayanıklı ürün üretmek için kullanabileceği yöntemler konusunda ışık tutacaktır. Dil/oluk tekniği kullanılarak birleştirilen kalın kompozit malzemelerin yorulma dayanımı konusunda literatüre katkıda bulunulmuştur.

Çalışmalar sonucunda, yapışma bölgesi için önerilen uç geometri tasarımlarının, düz uçlu dil/oluk bağlantılarına göre yorulma dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tasarımda ele alınan tırnak uzunluğu (a), tırnak genişliği (b) gibi geometrik parametrelerin bağlantı yorulma dayanımı üzerinde önemli etkisi olduğu görülmüştür. Dört farklı geometri (dörtgen, yamuk, beşgen ve sekizgen) üzerinde araştırma yapılmış ve yamuk uç tasarımının önerilen tasarımlar arasında en yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Dil-oluk bağlantısı, Yorulma dayanımı, Yapıştırma bağlantıları.

ABSTRACT

THE EFFECT OF TONGUE GEOMETRY ON THE FATIGUE STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS WITH ADHESIVE BONDING OF TONGUE AND GROOVE TECHNIQUE

PH.D THESIS

ÇİĞDEM ERSAN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:PROF. DR. OLCAY ERSEL CANYURT)

DENİZLİ, JUNE 2020

In this thesis, the optimum joint designs and parameters that provided high strength were obtained by improving the tip design on the tongue / groove joint technique on joints under dynamic loading for thick composite materials.

Adhesive bonding techniques of inclined and stepped joint configuration along the thickness have been used in the literature. In this study, tongue/groove joint technique and special geometric tip designs on the tongue were used in the adhesive joint. The load carrying capacity of the material increased with the thickness by using tongue/groove joint technique for thick composites. Tongue with the special tip profiles was examined parametrically for the load carrying capacity., The bonded section was prevented from being problem area with a suitable design. The proposed designs and results contribute the firms, that work with thick composite materials, the technique in order to produce high strength products. The fatigue strength of adhesively bonded joints for thick composite materials using tongue and groove technique was introduced to the literature.

According to study, the proposed tip geometry designs have higher fatigue strength than flat tip of tongue / groove connections. The geometric parameters, such as claw length (a), claw width (b) had an important influence on the joint fatigue strength. Four different geometries (rectangular, trapazoid, pentagonal and octagonal) were investigated and the trapezoid tip design showed the highest fatigue strength among proposed design.

KEYWORDS: Tongue-groove joints, Fatigue strength, Adhesively bonded joints.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Önemi	2
1.2 Literatür Özeti	3
1.3 Tezin Amacı	26
2. KOMPOZİT MALZEMELER	28
2.1 Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemeler.....	29
2.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler (PMC/FRP).....	29
2.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (MMC).....	30
2.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler (CMC).....	30
2.2 Takviye Malzemelerine Göre Kompozit Malzemeler	31
2.3 Kompozit Malzemelerde Yapıştırma	31
2.3.1 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Gerilmeler	33
3. MATERYAL VE METOT	35
3.1 Materyal.....	36
3.2 Yöntem ve Çalışma Planı	36
3.3 Tezde Kullanılan Dil ve Oluk Parametreleri	38
3.4 Yorulma Deney Parametreleri	42
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME	45
4.1 Kullanılacak Deney Numuneleri ve Hazırlanması	45
4.2 Yorulma Deneylerinin Yapılması	48
4.3 Yorulma Deneylerinin Değerlendirmesi	52
4.3.1 Tüm Tipler için Yorulma Değerleri.....	52
4.3.2 Önerilen 4 Tip Tasarım İçin Yorulma Değerlerinin Karşılaştırılması	59
4.3.3 Tasarlanan 4 Tip İçin S-N Grafiği Yorulma Değerlerinin Karşılaştırılması	66
4.4 SEM Analizleri ve Değerlendirmesi	68
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	76
6. KAYNAKLAR.....	78
7. ÖZGEÇMİŞ.....	89

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kompozit malzemede takviye tipleri.....	28
Şekil 2.2: Tek tesirli ve çift tesirli yapıştırma şekli.....	32
Şekil 2.3: Alın, açılı alın ve basamaklı yapıştırma şekli.....	32
Şekil 2.4: Dil-oluk yapıştırma üst görünüm.....	33
Şekil 2.5: Yapıştırma bağlantılarında gerilme tipleri a) Kesme gerilmesi b) Soyulma gerilmesi c)Çekme gerilmesi d) Açılma gerilmesi.....	34
Şekil 3.1: Instron 8801 statik-dinamik test cihazı.....	35
Şekil 3.2: Düz uç profilinde Dil-Oluk numunesi.....	37
Şekil 3.3: Ön deneylerde kullanılan 6 tip Dil/Oluk numunelerinin uç profilleri ve parametreleri.....	38
Şekil 3.4: Deneylerde kullanılan 4 tip uç profil tasarımı ve parametreleri.....	39
Şekil 3.5: Sinüsoidal kuvvet-zaman grafiğinde $F_{max}=1\text{ kN}$, $R=0,1$ için genlik değerinin gösterimi.....	43
Şekil 3.6: Beşgen tasarımının P02 parametresine göre F_{max} -Log(N) grafiği..	44
Şekil 4.1: Beşgen tip uç profili için yapıştırma öncesi P01 numune örnekleri.	45
Şekil 4.2: Beşgen uç profilinde belirlenen 9 parametreye ait numunelerin yapıştırılmış uç görüntüleri .	46
Şekil 4.3: Sekizgen uç profilinde belirlenen 9 parametreye ait numunelerin yapıştırılmış uç görüntüleri.	46
Şekil 4.4: Yamuk uç profilinde belirlenen 9 parametreye ait numunelerin yapıştırılmış uç görüntüleri	47
Şekil 4.5: Dörtgen uç profilinde belirlenen 9 parametreye ait numunelerin yapıştırılmış uç görüntüleri	47
Şekil 4.6: Dörtgen geometrisinden P09 parametrelerine ait numunenin deney öncesi yapıştırılmış hali.....	48
Şekil 4.7: Deney cihazında yapıştırıcı bağlantısı ayrılmış dörtgen uç profilinde numune örneği.....	49
Şekil 4.8: Yorulma deneyinde koparılan yapıştırma bağlantısında dil parçası tabakalara ayrılan numune	50
Şekil 4.9: Yamuk tip geometride yorulma deneyi esnasında dil bölgesinden kopan numune	51
Şekil 4.10: Yamuk tip geometride dil bölgesi Pre-preg cam elyafla güçlendirilmiş numune.....	51
Şekil 4.11: Beşgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü grafikleri	52
Şekil 4.12: Beşgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre N yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması...	53
Şekil 4.13: Sekizgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü grafikleri	54
Şekil 4.14: Sekizgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre N yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması	55
Şekil 4.15: Yamuk tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü grafikleri	56

Şekil 4.16: Yamuk tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre N yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması...	57
Şekil 4.17: Dörtgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü grafikleri	58
Şekil 4.18: Dörtgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre N yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması...	59
Şekil 4.19: Yorulma ömrü değerlerinin bağlantı tasarımına göre karşılaştırması, $a=10\text{mm}$	60
Şekil 4.20: Tırnak uzunluğu 10mm için en yüksek ve en düşük yorulma dayanımına sahip tasarım geometrileri	60
Şekil 4.21: Yorulma ömrü değerlerinin bağlantı tasarımına göre karşılaştırması, $a=14\text{mm}$	61
Şekil 4.22: Tırnak uzunluğu 14mm için en yüksek ve en düşük yorulma dayanımına sahip tasarım geometrileri	62
Şekil 4.23: Yorulma ömrü değerlerinin bağlantı tasarımına göre karşılaştırması, $a=18\text{mm}$	63
Şekil 4.24: Dört tip tasarım için yorulma ömrü değerlerinin tırnak uzunluğuna göre karşılaştırması, $b=1\text{ mm}$	64
Şekil 4.25: Dört tip tasarım için yorulma ömrü değerlerinin tırnak uzunluğuna göre karşılaştırması, $b=2\text{mm}$	65
Şekil 4.26: Dört tip tasarım için yorulma ömrü değerlerinin tırnak uzunluğuna göre karşılaştırması, $b=4\text{mm}$	66
Şekil 4.27: Beşgen, sekizgen, yamuk ve dörtgen uç tasarımına göre F_{\max} -Log (N) karşılaştırması (Parametre seti P02).....	68
Şekil 4.28: Hasarlı dil örnekleri a)Beşgen b)Sekizgen c)Yamuk d)Dörtgen uç tipi.....	69
Şekil 4.29: Beşgen tasarım kopma bölgesi SEM görüntüleri a)En güçlü numune b)En zayıf numune	70
Şekil 4.30: Beşgen tasarım en güçlü numune kopma bölgesi matris/lif yapısı SEM görüntüleri	70
Şekil 4.31: Sekizgen tasarım kopma bölgesi SEM görüntüleri a)En güçlü numune b)En zayıf numune	71
Şekil 4.32: Sekizgen tasarım en güçlü numune kopma bölgesi matris/lif yapısı SEM görüntüleri	72
Şekil 4.33: Yamuk tasarım kopma bölgesi SEM görüntüleri a)En güçlü numune b)En zayıf numune	73
Şekil 4.34: Yamuk tasarım en güçlü numune kopma bölgesi matris/lif yapısı SEM görüntüleri	73
Şekil 4.35: Dörtgen tasarım kopma bölgesi SEM görüntüleri a)En güçlü numune b)En zayıf numune	74
Şekil 4.36: Dörtgen tasarım en güçlü numune kopma bölgesi matris/lif yapısı SEM görüntüleri	75

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Deneyleerde kullanılan Loctite Hysol yapıştırıcının özellikleri.....	36
Tablo 3.2: Beşgen, yamuk ve dörtgen tip için uç profilleri ve uygulanan parametreler.....	40
Tablo 3.3: Sekizgen uç profili ve uygulanacak parametreler.....	40
Tablo 3.4: Dört uç tasarımının b=1mm için tırnak uzunluğuna (a) göre karşılaştırmalı geometrileri	41
Tablo 3.5: Dört uç tasarımının b=2mm için tırnak uzunluğuna (a) göre karşılaştırmalı geometrileri	41
Tablo 3.6: Dört uç tasarımının b=4mm için tırnak uzunluğuna (a) göre karşılaştırmalı geometrileri	42
Tablo 4.1: Ön deneyler sonucunda tespit edilen optimum kuvvete göre deney cihazına girilen değerler	49
Tablo 4.2: Maksimum kuvvet değişimine göre deney cihazına girilen değerler.....	67

SEMBOL LİSTESİ

a	: Tırnak uzunluğu (mm)
b	: Tırnak genişliği (mm)
c	: Sekizgen uçta sabit değer
CMC	: Seramik matrisli kompozit
F_{max}	: Maksimum kuvvet (kN)
F_{min}	: Minimum kuvvet (kN)
L₀	: Dil uzunluğu (mm)
MMC	: Metal matrisli kompozit
N	: Yorulma ömrü
PMC	: Polimer matrisli kompozit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope)
R	: Yükleme oranı
t	: Dil genişliği (mm)

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince karşılaştığım her zorluğu aşmamda yardımcı olan, bilgi ve tecrübeleriyle doktora sürecimde yolumu aydınlatan ve desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT'a ve tez çalışmamı maddi olarak destekleyen Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürü borç bilirim. Bu doktora tezi, yaşamı boyunca büyük manevi desteğini gördüğüm merhum kardeşim Okan ERSAN'ın anısına ithaf edilmiştir.

1. GİRİŞ

Metallerin birleştirilmesinde cıvata, perçin ve değişik çeşit kaynak teknikleri kullanılabilmesine karşın kompozit malzemelerde cıvata ve perçinin kullanılması malzeme dayanımını önemli ölçüde azaltmakta ve kaynak gibi teknikler de kompozit malzemelerde kullanılmamaktadır. Gerilmelerin yüzeye düzenli dağılımı, bağlantının geometrisini ve boyutlarını optimize etme imkânı, hafifliği ve yapıştırıcının yalıtım/sızdırmazlık özellikleri nedeniyle yapıştırma bağlantıları geleneksel birleştirme yöntemlerine göre tercih edilmektedir (Gay 2003). Son yıllarda kompozit malzemelerin kullanımı oldukça artmakta ve yapıştırma ile yapılan bağlantı teknolojilerinin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Ülkemizde Savunma Sanayi Başkanlığımız (SSB) 2019 yılında kompozit malzemeler ile ilgili teknoloji yol haritası (TYH) oluşturmuştur.

Kompozit malzemelerin yapıştırılmasında çoğunlukla, tekli/çiftli bindirme yapıştırma teknikleri kullanılmaktadır. Ancak kalın bir malzeme kullanıldığında, üst üste bindirme bağlantısı ciddi sorunlara yol açmaktadır. Örneğin aksel açıklık miktarının artması ile yapışma yüzeyinde yüksek kesme gerilmeleri oluşmakta ve yapışma bölgesinde malzeme dayanımı azalmaktadır. Ayrıca tabakalı kompozit malzemelerde hasar mekanizması en üst tabakanın sıyrılması yüzünden oluşmaktadır. Yani malzeme dayanımı yapışmaya maruz kalan en üst tabakada görülmektedir. Böylece malzeme dayanımı tabakalar arası dayanımla da sınırlı kalabilmektedir. Bu durumda malzemenin kalınlığının artması yük taşıma kapasitesi üzerine lineer bir katkı sağlayamamaktadır. Bu yüzden kalın kompozit malzemelerde kalınlık boyunca yapıştırmanın olması gerekmektedir. Dolayısıyla üst üste yapıştırma teknikleri yerine açılı, basamaklı alın birleştirme teknikleri kullanılmaktadır. Tez kapsamında uygulanması planlanan dil/oluk tipi yapıştırma tekniği, kalın kompozit malzemelerin yapıştırıcı ile bağlanmasında büyük avantaj sağladığı bilinmektedir (Dvorak ve diğ. 2001). Seçilen uç tasarımının kullanılması malzemenin dayanımını ve yük taşıma kapasitesini etkileyecektir.

Yapıştırırmalı bağlantılarda, eksenel çeki gerilmesi yüzünden, uç profilinde açılma, yanal yüzeylerde daralma, yapışkan bölgede kayma, çeki gerilmelerinin yanında açılma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler sebebiyle, yapışkan malzeme yüksek gerilmelere maruz kalmakta ve malzeme dayanımında düşüş görülmektedir. Yapıştırıcılar için açılma gerilmesi daha kritiktir; bu yüzden açılma gerilmelerinin azaltılması, bağlantı dayanımının artırılması için zaruridir. Tez kapsamında, dil/oluk bölgesinin uç bölgesinde yapılacak tasarım ile yapışma bölgesinde oluşacak hem bağlantının yapışkan ile oluşan açılma gerilmesi hem de katmanlar arası oluşan gerilme azaltılabilir ve bağlantı dayanımı yükseltilebilir.

Bir malzeme tekrarlı döngüsel bir yüke maruz kaldığında, malzemenin akma sınırından çok daha düşük bir gerilmede yorulma sebebi ile hasara uğrar (Case 1999). Dolayısı ile malzemenin yorulma davranışının belirlenmesi önem arz etmektedir. Dil/oluk bağlantı tekniği şeklinde birleştirilen tabakalı dokuma kumaş kompozit lamineler ile oluşacak malzemeye, eksenel yönde tekrarlı dinamik yüklemeler uygulanarak önerilen bağlantı tasarımlarının yorulma dayanımları incelenmiştir. Kuvvet etkisinde parçaların bağlantı yerlerinden kopmaması için gereken tasarım parametreleri belirlenerek bağlantı dayanımı üzerine etki eden faktörler ayrı ayrı incelenmiştir. Bu faktörlerin bağlantı dayanımına, dolayısı ile yük taşıma kapasitesi üzerine etkisi önemli bir boyuttur.

Tezde araştırılacak dil/oluk tipi birleştirme yönteminde dilin uç bölgesindeki geometrik tasarım değişikliğinin ve tasarım ile ilgili parametrelerin incelenmesi ile yapışkanlı bağlantının daha fazla yük taşıyabilmesi ve yorulma dayanımının yükseltilmesi sağlanacaktır. Oluşturulan tasarımların yük taşıma davranışı ve bozulma mekanizmaları üzerine etkileri tespit edilmiştir.

1.1 Tezin Önemi

Çağımızda teknoloji hızla gelişmekte, bu gelişme ile beraber kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin hafiflik ve yüksek dayanımı sebebiyle tercih edilen kompozit malzemelerin, havacılık, otomotiv ve askeri amaçlar için kullanıldığı alanlar genişlemektedir. Dolayısı ile bu malzemelerin bağlantılarında yapıştırma parametrelerine karşı gösterdikleri davranışların

belirlenmesi ve hasar mekanizmalarının tespiti önem kazanmaktadır. Yapıştırılmalı bağlantıların statik ve dinamik yüklere karşı verdiği tepkilerin belirlenmesi ile daha dayanıklı mamullerin yapılabilmesine olanak sağlanacaktır. Bu yüzden yapıştırma tekniklerinin/yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Tezde önerilen yapıştırma tekniği ile yapılan, kompozit-paslanmaz çelik parçaların birleştirilmesi; ilk defa tez danışmanının da içinde bulunduğu Amerikan deniz kuvvetlerine (Navy General) ait projede, Rensselaer Polytechnic Institute, New York, ABD’de incelenmiştir. Ancak bu çalışmada sadece statik yükleme durumunda dil uzunluğunun etkisi araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise kalın kompozit malzemelerin dil/oluk tipi bağlantı ile değişik tipte uç bağlantı bölgesi tasarımı ile birbirine birleştirilmesi incelenmiştir. Yapışılmalı bağlantıların kalitesini etkileyen, birleştirme bölgesi tasarım parametreleri detaylı bir şekilde analiz edilecek ve uygun tasarımlar deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Tez konusu ülkenin öncelikli teknoloji alanları olarak malzeme teknolojileri, esnek üretim alanlarında yer almaktadır. Bu çalışmada yapılması planlanan hedefleri maddeler halinde sıralamak gerekirse;

- Elde edilecek optimum tasarım ile tabakalı kalın kompozit malzeme bağlantısının taşıyabileceği toplam yük miktarının artırılması,
- Statik ve dinamik yüklemeye maruz yapışılmalı bağlantılarda tasarım değişikliğinin ne ölçüde önemli olduğu belirlenerek ve ilgili konuda literatür boşluğunun doldurulması,
- Yorulma dayanımının artırılması için kritik bağlantı bölgesine ait gerekli optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi,
- Daha hafif ve dayanıklı konstrüksiyonların elde edilmesi hedeflenmektedir.

1.2 Literatür Özeti

Kalın kompozit malzemelerin bağlantısında birçok problem ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birisi kompozit malzemenin tabakalar arası kayma gerilmesinin düşük olması ile yaşanmaktadır. Bağlantı bozukluğu, yapışan bölge yerine, en üst tabakanın sıyrılması şeklinde oluşmaktadır. Dolayısı ile, bağlantı

dayanımı, kompozit malzemenin en üst tabakasının tabakalar arası dayanımı ile sınırlı kalmaktadır. Malzeme kalınlığı ve yapışma yüzeyi arttırılsa bile malzemenin taşıyabileceği yük miktarında bir artış oluşmamaktadır (Adams ve diğ. 1997).

Literatürde kalınlık boyunca yapıştırmada açılı ve kademeli alın yapıştırma teknikleri kullanılmıştır. Literatürde dil /oluk tekniği ile ilgili ilk çalışma tez danışmanının içinde olduğu Amerikan Deniz kuvvetlerine (USA Navy General) ait proje ile yapılmıştır. Dil/oluk tekniği ile yapılan ilk çalışma ile ilgili sonuçlar 2001 tarihinde Composite Science and Technology dergisinde yayımlanmıştır (Dvorak ve diğ. 2001). Bu makale dil/oluk geometrisi ile birleştirme tekniğinin incelendiği ve literatüre kazandırılan ilk makaledir. Bu çalışmada dil/oluk tekniğinin diğer tekniklere göre daha verimli olduğu gösterilmiştir. Statik yükleme dayanımında dil boyunun ve yanal gerilmenin etkisi, yapışma yüzeyinde oluşan kayma gerilme dağılımları incelenmiştir. Yürüttükleri projede Canyon O.E. ve George J. Dvorak, gemi inşaa uygulamaları için kalın dokuma e-cam/vinyl ester kompozit levhaların, çelik veya diğer kompozit levhalarla yapıştırılarak birleştirilmesi ile ilgili yeni bir yaklaşım bulmuştur. Dvorak ve diğ. (2001) bu çalışmada, dil ve oluk birleştirme geometrisi kullanarak kalın dış çevre yüzeyleri arasına yapıştırıcı uygulamışlardır. Deneyle ve sonlu elemanlar metodu sonuçlarına göre; dil oluk birleştirme tekniği kullanılarak yapılan yapıştırma bağlantılarının güçlü olduğu ortaya konmuştur.

Tez danışmanının 2011'de başlattığı ve tamamlanmış Pamukkale Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) projesi kapsamında (2011FBE041) yapışma tasarım geometrisinin etkisi, kompozit/kompozit malzeme üzerinde statik yükleme altında incelenmiştir. Dil/oluk bağlantı dayanımının incelendiği çalışmada malzeme olarak kompozit ve dairesel/üçgensel tasarım kullanılmıştır. Dairesel ile üçgensel profil karşılaştırıldığında ise üçgensel profil geometrisinin yapıştırma dayanımının daha yüksek olduğu ve yapıştırma dayanımında dil uç geometrisinin etkili olduğu bu çalışmada ortaya konmuştur. Aynı yapıştırma uzunluğuna sahip düz uç geometrisi tasarımı ile dairesel uç geometrili tasarım arasında 1,8 kat, üçgensel uç geometrili tasarım arasında 2 kat daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmalarda hasar dil uç geometrisi bölgesinde tabakaların (kompozit katmanlar) arasındaki açılma sonucu oluşmuştur. İyi bir dil uç bölgesi tasarımı ile bu bölgede oluşan gerilmenin düşürülebileceği ve hasar modunun değiştirilebileceği görülmüştür. Elde edilen

sonuçlar ışığında bu tezde geliştirilebilecek uç tasarımlarının, yapışma yorulma dayanımı üzerinde de etkili olacağı düşünülmektedir (Kaplanseren 2013).

Bilindiği gibi; birçok makine parçası ve yapı elemanı kullanılmaya esnasında tekrarlanan gerilmeler (statik/dinamik yükler) ve titreşimler altında çalışmaktadır. Yorulma nedeniyle malzemenin kırılmasına neden olabilecek gerilmeler, çekme dayanımı miktarından çok daha düşük yaklaşık yarısı kadar seviyelerde olabilmektedir. Yani tekrarlanan gerilmeler altında çalışan parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olur. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin dönen aksam parçalarında görülen mekanik hasarların büyük bir kısmı yorulma sonucunda olmaktadır. Örneğin; Uçaklarda yorulma oldukça önemli bir problemdir. Tez çalışmasının yapılması ile beraber tasarım değişikliklerinin yapışkanlı bağlantıların yorulma dayanımı üzerine etkileri konusunda bilgi edinilebilecektir.

Tez danışmanı haricinde bir çalışma Melogranaa (2003) tarafından yapılmıştır fakat burada yorulma dayanımı incelenmemiştir. Dil/oluk tipi yapışkanlı bağlantı modeli araştırılmıştır. Bu amaçla deneysel olarak dokuz adet farklı geometrik şekilde dil/oluk tipi bağlantı karbon/epoksi kompozit malzeme ile paslanmaz çelik için incelenmiştir. Aynı yapışma uzunluğu ele alınarak strap (alın altına yapıştırılan parçalarda bağlantı alanının üzerine başka tabaka konularak birleştirilmesi) bağlantı tipi ile dil/oluk tipi bağlantı karşılaştırılmış ve tüm dil oluk tipi bağlantı geometrisine sahip bağlantıların daha güçlü olduğu belirtilmiştir.

Literatürde çok sayıda tek, çift bindirme, kalınlık boyunca açılı ve kademeli bağlantı tipi ile ilgili çalışma bulunmaktadır. Literatür incelenecek olursa dil/oluk bağlantı tekniği ile sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca dil/oluk bağlantı tekniği kullanılarak yapılan bağlantılarda yorulma konusunda sadece tez danışmanının TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında yaptığı bir çalışma bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada dil üzerindeki uç tasarım etkisi incelenmemiştir (Canyurt ve diğ. 2010).

Mouritz (2001) kompozit malzemelerin ileri teknoloji kullanımı için önemli bir malzeme olduğu ve bu amaçla donanmanın kullanacağı gemilerde ve denizaltılarında sağlam yapıların yapılabilmesi için çok güçlü bağlantıların olması gerektiğini

belirtmiştir. Güçlü yapılar için güçlü bir şekilde yapıştırmanın önemi üzerinde durulmuştur. Kompozit malzeme kullanımı ile yapının ağırlığının azaltılabileceği gibi korozyona karşı yüksek dayanımına sahip olduğunu göstermiştir.

Kalınlık boyunca yapıştırma Mortensen ve Thomsen (2002) tarafından incelenmiştir. Yapışkanlı bağlantı tiplerinin analiz ve tasarımında, yeni analitik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Kalın ortotropik kompozit plakalar ile eksenel yükleme ve moment etkisi dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Tekli yan scarf (yapıştırılan parçaların uç uca kalınlık boyunca açılı veya kademeli olarak yapıştırılması) bağlantı, tekli yan basamaklı bindirme bağlantı, çiftli yan basamaklı bindirme bağlantı ve çiftli yan scarf bağlantı şekilleri incelenmiştir. Kompozit tabakalar arasındaki yapıştırma bağlantılarındaki gerilmeler analitik olarak sonlu elemanlar yöntemi ve yüksek dereceli bir teori yaklaşımı kullanılarak hesaplanmış, her iki analizdeki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Krenk ve diğ. (1996), alüminyum malzemelerde tek taraflı bindirme yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımını, çatlak ilerlemelerini deneysel ve lineer olmayan sonlu elemanlar analizi ile incelemiştir. Yorulma deneylerinden S-N grafikleri elde edilmiştir. Statik deneylerde 0,3 mm yapıştırıcı kalınlığı kullanıldığında 0,1 mm yapıştırıcı kalınlığına göre daha düşük dayanım elde edilmiştir. Ancak, yorulma deneylerinde yapıştırma kalınlığının önemli bir etkisinin olmadığı, çatlak ilerlemesinin oluştuğu ve çatlak büyüme oranının neredeyse sabit kaldığı görülmüştür.

Dil/oluk tekniği kullanarak kalın kompozit/çelik yapıştırma üzerine momentin etkisi Matous ve Dvorak (2004) tarafından incelenmiştir. Dil ve olukları yapıştırmak için Dexter-Hysol 9338 yapıştırıcı kullanılmıştır. Bağlantı bölgesindeki gerilmeler incelendiğinde, gerilmelerin tabaka kalınlığına bağlı olmadığı görülmüştür. Bu dil-oluk bağlantılarının kalın tabakalı malzemelerde kullanılmasını destekleyen önemli bir avantaj olarak ortaya konmuştur.

Maheri ve Adams (2002), kalın plakaların yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcıların dinamik kayma modülünü ve farklı özelliklere sahip yapıştırıcılar ile dinamik yük altında bağlantıların dayanımını araştırmıştır. Titreşim altında inceledikleri malzemenin eksenel ve yanal yükler altında kayma modüllerini tahmin ederek ampirik olarak doğrulamışlardır.

Taib ve diğ. (2006), cam elyafı ile güçlendirilmiş vinyl ester kompozit malzemenin farklı bağlantı konfigürasyonlarının yapıştırma dayanımında etkili olduğu görülmüştür. Yapışma kalınlığı, malzemede bulunan kusur, nem, malzeme sertliği gibi parametrelerin çekme dayanımı etkilediği deneysel olarak araştırılmıştır.

Canyurt ve Zhang (2006) tabakalı kalın kompozit malzemelerin üst üste bindirme bağlantı tipi üzerinde ayrıca araştırma yapmışlardır. Bu bağlantı tipinde uygulanabilecek ön gerilme etkisi incelenmiştir. Yanal ön gerilmenin açılma gerilmelerini azalttığı ve dolayısı ile; ön yüklemeli durumda, yapışkan bağlantının daha yüksek çeki kuvvetlerine dayanabildiği deneysel ve analitik olarak gösterilmiştir.

Gunnion A.J.(2006) geçmeli bağlantıların performansını etkileyen çeşitli parametreleri incelemek için parametrik bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Yapışma hattı boyunca gerilme dağılımın, geçme eğim açısının değişimiyle ölçülen gerilmeler, yapışma, tabaka kalınlığı statik yük altında araştırılmıştır.

Aynı veya farklı tipte iki adet yapıştırıcının karıştırılması ile elde edilen yapıştırıcının düşük ve yüksek sıcaklık durumlarında yapışma dayanımına etkisi Da Silva L.F.M. (2007) tarafından araştırılmıştır. Titanyum/kompozit, Titanyum/titanyum malzeme, çiftli bindirme tipi bağlantı tekniği kullanılarak incelenmiştir.

Da Silva ve Adams (2007) kompozit yapışma bağlantılarında, numunenin uç bölgesinde açılı bağlantılar kullanarak soyulma gerilmesini azaltmaya çalışmıştır. Malzemede yapılan geometrik değişikliklerin ve sıcaklık etkisinin yapışma dayanımına etkisi statik yükleme durumunda araştırılmıştır.

Campilho, R.D.ve diğ. (2009) karbon/epoksi kompozitlerin tek ve çift takviyeli yapıştırma bağlantılarının gerilme davranışlarını analiz etmiştir. Farklı bindirme uzunlukları ve kalınlığın, hasar modu, rijitlik ve hasar yüküne etkisi araştırılmıştır. Çekme gerilmesine maruz Mod I , kesme gerilmesine maruz Mod II durumunu ele alarak, sünek yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde karışık modlu kohesif hasar modelini içeren kohesif (moleküller arası çekime sahip) elemanlar kullanmıştır.

Kalınlık boyunca yapıştırma olarak basamak tipi bağlantı yöntemiyle yapıştırılmış farklı malzemelerin eğilme momenti altındaki gerilme dağılımlarını kontrol edebilecek faktörler (yapıştırma kalınlığı, kademe sayısı vb.) etkileri Ichikawa ve diğ. (2009) tarafından incelenmiştir. Uygulama kalınlığı azaldıkça ve adım sayısı arttıkça yapıştırıcının Young modülünün ve dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde ettikleri sonuçları doğrulamışlardır.

Goeiju ve diğ. (1999), kompozit yapıştırma bağlantılarının tekrarlı yükler altında gösterdiği davranışın analitik ve deneysel olarak araştırmasını yapmışlardır. Metallerle göre Kompozit malzemelerdeki yorulma mekanizmasının daha farklı gelişmesinin sebebini kompozit malzemelerdeki mikro anizotrop yapının ve bölgesel heterojen yapının sebep olduğu, tabakalar arası veya tanecikler bağlı gerilme yığılmaları olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca aynı örnekler için hem statik gerilme hem de dinamik yüklemeyle yorulma deneyleri yapmışlar bunlar sonucunda elde ettikleri sonuçlara göre; yapıştırma şeklinin, yapıştırıcı kalınlığının, yapıştırıcı malzemenin yükü sönmleme özelliğinin, üretimden kaynaklı mikro çatlakların, tabakalar arası bağların statik yüklemelere oranla dinamik yüklemelerde daha fazla önem taşıdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca tabakalı kompozit malzemelerde üst üste yapıştırma bağlantısının dayanımının tabakalar arası bağların dayanımıyla sınırlı olduğunu ve kolay hasara uğradığını ortaya koymuşlardır.

He (2001), 200'den fazla kaynak inceleyerek yaptığı değerlendirmelerde, yapıştırma bağlantılarında yorulma davranışının araştırılması ve iyileştirilmesinin önemini vurgulamıştır. Yapıştırma kalınlığı, yapışan yüzey kalınlığı ve geometrik parametrelerin yapıştırma bağlantısının yorulma ömrüne etki ettiğini söylemiştir. Sonlu elemanlar analizleriyle, tabakalı kalın kompozitlerin üst üste bindirmeli, yapıştırma bağlantısında yorulma dayanımının düşük olduğu belirtilmiştir ayrıca yapıştırma bağlantılarında dinamik yüklemeyle yorulma konusunda öngörülerini doğrulayabilmek için deneysel çalışmaların gerekliliğinden bahsedilmiştir.

Marcadon ve diğ. (2006), bir geminin yapısal bir parçası için vinilester yapıştırıcı ile yapıştırılan T bağlantısını incelemişlerdir. Bağlantı statik ve yorulma yükü altında test edilerek çatlak mekanizmalarının numune geometrisine büyük ölçüde bağlı olduğu ifade edilmiştir. T bağlantılı yapıştırılmalarda yorulma ömrünün üçte biri hasarın başlaması, kalan üçte ikisi hasarın yayılma aşaması olduğunu ifade etmişlerdir.

Yorulma hasarı öncesi 2 milyon döngüye maruz numune ile deneye tabi tutulmamış numunenin yakın statik değerler vermesi nedeniyle, yorulma dayanımının akma sınırına benzer olduğu ve yüksek yorulma yüklerinde yorulma ömrünün frekanstan yüksek ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir.

Tekne gövdelerinde yaygın kullanıma sahip cam elyaf takviyeli plastikler, nem ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin olduğu ortamda tekrarlı yükten dolayı çevresel yorulmaya maruz kalmaktadır. Neşer ve Altunsaray (2006), deniz araçlarının imalatında kullanılan yapıştırma ve cıvata bağlantılarının yorulma performansını incelemiştir. 5 mm ve 11 mm olarak iki farklı kalınlıkta, polyester matrisli E-cam elyafli el yatırma metoduyla üretilmiş panellerden 0° doğrultusunda kesilmiş numunelerle deney yapmışlardır. Kontrol amaçlı düz numuneler, cıvata ile bağlanmış numuneler ve yapıştırma bağlantılı numuneler hazırlamışlar ve bunları atmosferik ve denizel olmak üzere iki farklı ortamda deneye tabi tutmuşlardır. İki farklı çevresel ortamda gerçekleştiren deneylerde gerilme eğrilerine bakıldığında, döngüsel yorulma deneyinde her iki hasarın da aynı karakteristikte olduğu fakat deniz suyu ortamında yorulma ömrünün daha az olduğu ve hasar mekanizmasının daha çok elyaf kırılmasıyla başladığı tespit edilmiştir.

Ulçay ve diğ. (2002) parametre olarak labortuvar ortamında hazırladıkları aynı tip reçinenin miktarı, kullanılan kumaşı tipi, çevresel ortamı ve kürleşme sürelerini dikkate alarak çalışma yapmışlardır. Özellikle mikrodalga ve radyo frekans ile fırın ve atmosfer ortamlarının birbiri arasındaki farkı gözlemlemişlerdir. Beş tip farklı kumaş ve kumaşları etüvde tutarak fazla nemden kurutarak kullanmışlardır. Çekme deneyleri incelenerek malzeme olarak naylon ve polyester malzemedan yapılan kompozitlerin en yüksek mukavemeti verdiği, ortam olarak radyo frekans yönteminin dayanımı artırdığını, yapıştırıcı olarak pamuk gibi zayıf liflerde reçine miktarını artırmanın faydalı olmadığını ve kürleşme olarak aşırı ısıtmanın özellikle doğal elyafli kompozitlerin mukavemetini olumsuz yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Isıtma ve kurutma işlemlerinde malzemenin yapısını bozmayacak uygun sıcaklık ve sürelerin tespit edilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Sezgin ve diğ. (2006), cam elyaf takviyeli (0°/90°) tabakalar arasına polipropilen esaslı bal peteği ara tabakasını yerleştirerek sandviç kompozit malzemeler oluşturmuşlardır. Sandviç yapının kalınlığını değiştirerek, oluşturulan kompozit

malzemenin mekanik özelliklerini yanal basma, yüzeysel basma, üç nokta eğme ve kırılma deneyleri ile belirlemişlerdir. Ara petek tabakasının kalınlığı arttıkça basma mukavemetinin arttığı, kalınlık artışının ara tabaka kayma gerilmesini düşürdüğü, sandviç yapının bası dayanımının ara petek yapısının tek başına gösterdiği bası dayanımına yakın olduğu belirtilmiştir. Yüzeysel basma deneylerinde bal peteği hücre duvarlarının katlandığı, yanal basma deneylerinde ise yüzey plakalarının eğildiği ve daha yüksek yüklerde bu plakaların kırıldığı gözlemlenmiştir.

Keskes ve diğ. (2007), yüksek sertlik yüksek yorulma dayanımı ve düşük ağırlık nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde tercih edilen petek sandviç panellerin imalat hatası veya hasar durumunda yorulma davranışını, tabakanın ortasında bir kör delik oluşturarak simüle ederek araştırmışlardır. Akustik emisyon izleme ile statik ve yorulma testleri gerçekleştirilmiş, yük/yer değiştirme ve S-N diyagramları oluşturularak analiz edilmiştir. Statik yük durumunda deliğin bir hasar etkisi gözlemlenmemiş fakat yorulma deneylerinde yorulma ömrünün hızla azaldığı, hasarsız numuneye göre hasarlı malzemenin ömrü yaklaşık %80'i civarında olduğu görülmüştür.

Doğanay ve Ulcay (2007), cam elyaf taviyeli polyester kompozitlerde farklı lif oranlarının ve deniz suyunun yorulma davranışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında takviyesiz, %1 takviyeli, %3 takviyeli ve %6 takviyeli olmak üzere dört farklı oranda polyester reçine numuneleri deniz suyunda bekletilmiş, yorulma deneyine tabi tutulmuş ve akabinde numunelerin maksimum uzamaları ölçülmüştür. Deneyler sonucunda takviye oranına bağlı olarak uzamada önemli bir farklılık görülmemişken, deniz suyunda bekletme süresi arttıkça uzama değerinde düşüş olduğu görülmüştür.

Jen ve Ko (2010), alüminyum malzemelerde epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek taraflı bindirme bağlantıların yorulma mukavemetini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı bindirme uzunluğuna ve yapışkan kalınlığına sahip tek taraflı bindirme bağlantıları hazırlanarak yapıştırma bağlantı boyutlarının yorulma dayanımına etkisi belirlenmiştir. Sabit kayma gerilmesi altında yapışkan kalınlığının artması yorulma dayanımını olumsuz etkilemiştir. Yapışkan ve yapışan yüzey arasındaki lokal gerilmeler sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Yapışkan boyutlar ile ilişkili üç parametrenin (maksimum ara yüzey soyulma gerilmesi,

maksimum kayma gerilmesi ve ikisinin doğrusal bir kombinasyonu) yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilediğini tespit etmişlerdir. Tek taraflı bindirme bağlantılarında maksimum ara yüzey soyulma gerilmesinin yorulma hasarı için önemli bir etken olduğunu ortaya koymuşlardır.

Jen (2012), açılı alın yapıştırma (scarf) tekniğiyle yapıştırdığı numunelerin yapıştırma bağlantısı ömürlerini deneysel olarak analiz etmiştir. Deneysel sonuçlarına göre bu bağlantı tipinde yapışma yüzeyinin açısının yorulma dayanımını önemli ölçüde artırdığını tespit etmiştir. Bu deneylerde oluşan hasar modlarını tespit etmiştir. Yapışma yüzeylerinin parça eksenine açısını 0 dereceden başlatıp 60 dereceye kadar yükselterek yapıştırmış bu şekilde yapışma yüzey alanını artırarak deneylerini yapmıştır. 700.000'e yaklaşan yük tekrarları ile yaptığı deneylerinde, yüzey açısı arttıkça yapıştırma bağlantısının dayanımının arttığını bulmuştur. Bu deneyleri sonlu elemanlar analiz programı ANSYS'te de modellemiş ve deneysel çalışmalarıyla karşılaştırmıştır.

Turan ve Kaman (2010), karbon fiber takviyeli epoksi reçine matrisli tabakalı kompozit iki levhayı tek taraflı bindirme bağlantısıyla yapıştırarak statik yük altında oluşan hasarı deneysel ve sonlu elemanlar çözümünde ANSYS programını kullanarak sayısal metotlarla incelemişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığı, bindirme uzunluğu ve yapıştırma genişliğinin bağlantı mukavemetine etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Yapışma yüzey alanını değişiminin hasar yükü üzerinde etkili olduğu, ancak yapıştırıcı kalınlığının 0,1mm'den 0,4 mm'ye artırılmasına karşın hasar yüklerinin aynı oranda artmaması, yapıştırıcı kalınlığının çok fazla etkili olmadığını göstermiştir.

Fidan ve diğ. (2011), cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemelerde tekrarlı düşük hızlı darbe deneyleri sonrasında ortaya çıkan içyapı hasarlarını deneysel olarak Instron Dynatup 9250 HV darbe test cihazı kullanarak incelemişlerdir. Malzeme tam delininceye kadar 5 J enerjiyle tekrarlı darbeye maruz bırakılmıştır. Deneylerin sonucunda elde edilen grafikler ve mikro bilgisayarlı tomografi ile çekilen görüntüler incelenerek ve analiz edilerek malzemenin iç yapısında, matris çatlağı, delaminasyon, fiber kırılmaları şeklinde üç farklı tip hasar tipinin oluştuğu görülmüştür. Kompozit malzeme 150. darbeden sonra kuvvet taşıma kapasitesinde düşüş göstermiş ve kritik darbe tekrar sayısının 150 olduğu ve malzemenin darbe yorulması neticesinde 172. tekrardan sonra tamamen delindiği ifade edilmiştir.

Karahan ve diğ. (2013), üç boyutlu dokuma karbon epoksi kompozit malzemelerin dinamik çekme yükü altında yorulma davranışını incelemişlerdir. Oluşturulan kompozit malzemelerin 3.000.000 yük tekrarı sonunda kopmaması nedeniyle sonsuz yorulma ömrü olarak yük seviyesi 27,5 kN olarak tespit edilmiştir. Mikro yapı incelemelerinde bir milyon devir sonrasında atkı doğrultusunda çatlakların yayılmak yerine derinleştiği görülmüş ve bu derinleşmenin yorulma ömrünün düşmesine neden olduğu belirtilmiştir. Kompozit malzemenin iç tarafında z-iplikleri ile atkı ipliklerinin kesiştiği yerde hasarın başladığı/ yayıldığı, bu kesişim yerlerinin atkı ipliklerini sıkıştırdığı ve hasar oluşumunu kolaylaştırdığı, lokal delaminasyonlar dışında yapı bütünlüğünü, yük taşıma kapasitesini bozacak boyutta delaminasyon oluşmadığı görülmüştür.

Thevenet ve arkadaşları (2013), numunelerindeki yapıştırırmalı bağlantılarında gerilme yığılmalarının etkilerini azaltmayı amaçlayarak yük tekrarlı yorulma deneyleri yapmışlardır. Deneylerinde, kuvvet değerlerini maksimumlarda uygulamış ve yük tekrar sayılarını düşük tutmaya çalışmışlardır. Yapıştırıcı kalınlığının etkisini, bağlantı dayanımını incelemiş ve bir ekstensiometreyle hasar gelişimini ölçmüşlerdir. Ayrıca tekil yükleme ve tekrarlı yüklemeleri karşılaştırmışlardır. Yapıştırma bağlantısının dayanımının çekme yüklemeleri için düşük olduğunu kaymaya karşı böyle olmadığını tespit etmişlerdir. Çalışmada anlatılan yük tekrarları 84 ile 12286 gibi çok geniş bir aralığa sahiptir. Düşük yük tekrarları ile çok sayıda deneysel çalışma yaparak, çeki-bası yorulma deneylerinde doğru yükler seçme ile deney sayısının azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Tang ve diğ. (2013), kalın tabakalı kompozitlerde yapıştırma bağlantılarının statik ve dinamik yüklemeyle yorulma davranışlarını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Kompozit malzeme olarak tabakalı cam elyaf takviyeli epoxy kalın kompozit malzeme kullanmışlardır. Bindirmeli tip (lap) yapıştırma uygulayıp kuvvet uyguladıkları numunelerde tabakalar arası açılma görmüşlerdir. Yapıştırma kalınlığını yüksek tutarak yapıştırıcının bağlantı dayanımındaki etkisini artırmışlardır. Ortalama yükü ve genliği düşürdükçe 400.000'e varan yük tekrarları uygulamışlardır. Yük dağılımının bu tip bağlantıda tek tarafta toplandığını belirlemiş ve geometrik tasarımın yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımına etkisinin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Kadioglu ve Adams (2015), otomotiv yapılarında kullanılan metallerin, plastiklerin veya ikisinin kombinasyonlarından oluşan kompozit yapının tek taraflı bindirme yapıştırma bağlantısıyla birleştirilmesi durumunda, darbe yükü altında esnek Viskoelastik yapıştırıcı SBT 9245 bant'ın davranışını incelemişlerdir. Yapıştırıcı bant'ın darbe yükü altında yarı statik deneyden çok farklı sonuçlar verdiğini ve darbe yükü dayanımının diğer yapısal yapıştırıcıların davranışına yakın olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chowdhury ve diğ. (2016), kalın kompozitlerde bindirmeli bağlantı tipinde yapıştırma ve cıvatayla mekanik birleştirme yöntemi ile karma bağlantı tipinin statik ve dinamik analizini yapmış yorulma direncini incelemişlerdir. Analiz için mekanik bağlantı şekillerini değiştirerek farklı kombinasyonlarda bağlantı şekilleri denemişlerdir. Yaptıkları çalışmada statik test sonuçları, mekanik ve yapıştırma bağlantısı ile karma bağlantı dayanımı arasında fazla fark göstermezken yorulma testleri karma bağlantıların en yüksek dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Numuneleri ABAQUS programında modellemişler ve benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Deneylerinde R yükleme oranı değerini 0,1 olarak almışlardır. Hazırlanan numunelerin 8.000-400.000 aralığında ömre sahip olduğunu belirlemişlerdir. Fakat yaptıkları sonlu elemanlar modellemesinde cıvata bağlantılarının etrafında yüksek gerilme yığılmaları tespit etmişlerdir ve numuneleri bu deliklerin açıldığı bölgelerden hasar görmüştür.

Olajide (2017) çalışmasında, uçaklarda kullanılan kompozitlerin hasarlarının onarımında kullanılan yapıştırma bağlantılarının statik ve dinamik mukavemetlerini incelemiştir. Statik mukavemetin yapıştırma bağlantılarındaki yorulma ömrünü tahmin etmek ve değerlendirmek için yeterli olmadığını, üretim yöntemindeki farkların yorulma ömründe %11 civarında fark yaratabildiğini tespit etmiş ve yorulma ömrüne etki eden kriterleri şu şekilde sıralamıştır; (1) Yapıştırma tabakasındaki gözeneklilik (2) Yapıştırma bağlantı bölgesinde yapışmamış alan kalması (3) Yapıştırıcı tabakasında hiç yapışkan olmaması (4) Eşit olmayan yapıştırıcı tabaka kalınlığı (5) Yapışkan bölge çevresinde düzensiz yüzey olması. Olajide ayrıca yapışkan malzemenin sertliğini ve etkilerini de çalışmasında incelemiştir.

Olajide ve Arhatari (2017), uçak yapılarında scarf yapıştırma bağlantılarının fiziksel özelliklerine bağlı olarak, sabit ve değişken genlik değerleriyle hasar

mekanizmalarının analizinde bir metodoloji geliştirmeye çalışmışlardır. Yorulma deneyleri sonucu üç farklı hasar bölgesi olduğu, bağlantının yapıştırma bölgesinde sertlik değerleri incelenerek, sertliğin homojenliğinin bozulmasına ve hasara sebep olduğu tespit edilmiş yorulma ömürleri dikkate alınarak hasar metodolojisi geliştirilmiştir. Bölgeler arası yorulma ömürlerinin birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür. Yapıştırma bağlantısına sahip numunelerin yorulma ömrünün orijinal numunelere göre 66 ± 9 olduğu bulunmuştur.

Lyubimova ve diğ. (2016), C49-1 camın ve St3sp karbon çeliğinin difüzyon kaynağı ile oluşturulan bir çelik/cam kompozit malzemeler üzerine yarı statik ve tekrarlı yorulma deneylerinin yanında korozyon testleri ile ilgili araştırma yapmışlardır. Sabit genlik ve kademeli yük artış deneyleri ile dayanım sınırı, çekme mukavemetinin yaklaşık %40'ı 70 MPa olarak tespit edilmiştir. Kompozit malzemenin korozyon hızının St3sp karbon çeliğinin korozyon hızından dört kat daha yüksek olduğu görülmüştür.

Bingöl ve Çavdar (2016), yüksek mukavemetli parçaların seri olarak üretildiği, başta otomotiv olmak üzere pek çok alanda kullanılan termoset bir polimer kompozit yöntemi olan sac kalıplama bileşikleri (Sheet Molding Compounds) sıcak pres kalıplama yöntemi üzerine araştırma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada dayanımı artırmak için dokuma cam fiberler kullanmışlardır. Rastgele dizilen cam fiber malzemenin çekme gerilmesi değeri ortalama 67 MPa iken, aynı şartlar ve ağırlık oranında cam dokuma elyaf takviye malzemesinde bu değer iki katına, 137 MPa değerine çıktığını göstermişlerdir. Hasarlı kompozitler üzerinde SEM analizleri yapılarak, kompozit malzemenin mukavemet artışına takviye malzemesinin yol açtığını tespit etmişlerdir.

Ramesh ve diğ. (2013), sisal ve jüt gibi doğal elyafları cam elyaf kompozitlerle birleştirerek kompozitlerin çekme ve eğilme gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Tek başlarına cam elyaftan daha düşük dayanıma sahip olan, sisal ve jüt organik katkısının mekanik özelliklere olumlu katkı sağladığı, sisal/cam elyaf takviyeli numunelerin çekme mukavemetinin yükselttiği, jüt/cam elyaf takviyeli

numunelerin ise eğilme dayanımını yükselttiği gösterilmiştir. Hasar gören numunelerin kopma yüzeyleri SEM ile analiz edilmiştir.

Chen ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, otomotivde kullanılan yapıştırma bağlantıları için bindirmeli ve CP (koç kabuğu) tipi yapışma bağlantılarının yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada yorulma ömrü tahmini için sonlu elemanlar modelleri oluşturmuş, hasar bölgesinde bilinen değerlerle kurulan integral bağıntısıyla hasarın ne kadar ilerleyeceğini tahmin etmek için kullanılan analitik J-integral çözümü yöntemi kullanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yorulma ömrü tahminlerini yorulma deney sonuçlarıyla doğrulamışlardır.

Sonia ve diğ. (2018) deniz araçlarında kullanılan cam elyaf/vinylester kalın kompozit malzemenin yapışma bağlantılarındaki dinamik performansını test etmişlerdir. Tabaklı kompozit malzemeyi Hopkinson bası çubuğu modeli kullanarak eksenel yönde dinamik bası testine maruz bırakarak mekanik davranışlarını ve hasar kinetiğini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda gerilme oranlarındaki değişimin malzemenin dinamik özelliklerini etkilendiğini ve eksenel yöndeki yüklerin delaminasyona ve lif kırılmalarına yol açtığını tespit etmişlerdir.

Saraç ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, nanoparçacıklar içeren yapıştırma bağlantılarının statik ve yorulma dayanımlarını incelemişler, nanoparçacık içermeyen bağlantılarla karşılaştırmışlardır. Tekli bindirme bağlantısında, DP460 epoksi yapıştırıcı ile güçlendirilmiş farklı nanoparçacıklar (nano- Al_2O_3 , nano- TiO_2 ve nano- SiO_2) ve paslanmaz çelik kullanmışlardır. 10 Hz frekansta ve 0,1 yükleme oranında yapılan yorulma deneyleri sonucunda, yapıştırıcıya nano- Al_2O_3 ve nano- SiO_2 ilavesinin yapıştırma bağlantılarında yorulma mukavemetini artırdığı, nano- TiO_2 ilavesinin ise yorulma mukavemetini azalttığını gözlemlemişlerdir.

Bernardin ve diğ. (2013), dönme yüküne maruz silindirik iki çelik parçayı çevreleyen kompozit bir boru ile yapıştırarak oluşan bağlantının dayanımını ölçmüşlerdir. Numunenin ebadı ve bağlantı şekli makine endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri temel alınmış, Spabond 345LV5 yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Zwick Roell Z050 test cihazında yapılan statik çekme deneyleri ile kuvvet-yer değiştirme diyagramları oluşturulmuş, sonuçların ABAQUS simülasyon

programı kullanılarak elde edilen sayısal veriler ile örtüştüğü gösterilmiştir. Çalışmada bağlantı tipinde uygun hasar ve yapışma bağlantısı parametreleri elde edilmiştir.

Demirel ve Muratoglu (2011), metal matrisli Cu/Ni₃Al kompozitleri ve GCr15 çelik malzeme arasında kayma yüzeyindeki sürtünme ve aşınma davranışını araştırmışlardır. Cu/Ni₃Al kompozitler ağırlıkça %5, %10 ve %15 olarak toz metalurjisi ile hazırlanarak, kompozit malzemenin aşınma davranışı 0,4m/s sabit kayma hızında 83-150 N yük uygulanarak incelenmiştir. Uygulanan yükler altında %15 oranında Cu katkı ile elde edilen numunelerin en yüksek aşınma oranına sahip olduğu, ağırlıkça Ni₃Al oranının artması metal matrisli kompozitler için sürtünme katsayısının artmasını sağladığı gösterilmiştir.

Moreira ve diğ. (2015), onarılmış Karbon elyaf takviyeli polimer tabakaların tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üç nokta eğilme ve yorulma davranışını deneysel ve nümerik olarak analiz etmişlerdir. Ölçülen bir hasar parametresi ile yarı statik ve yorulma hasarını göz önüne alarak karışık modla bir modelleme yaparak nümerik yaklaşım kullanmışlardır. Hesaplanan yorulma ömrü deneysel olarak ölçülen yorulma ömrü ile uyumlu olduğu bulunmuştur. Nümerik modellemenin yanısıra yükleme geometri ve malzeme özelliklerinin yorulma davranışı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Yapıştırıcının kalınlığının yorulma ömrü üzerinde az etkili olduğu ve üst üste bindirme uzunluğunun arttırılmasının yorulma ömrünü belli bir seviyeye kadar yükselttiği, çok fazla arttırılmasının hiçbir avantaj sağlamadığı belirtilmiştir.

Kang ve diğ. (2015), araç yapılarında kullanılan yapısal yapıştırıcılar ve punta kaynak ile üretilmiş bağlantıları incelemişlerdir. Çelik numunelerin bağlantı düzlemine 45° derecelik bir açıyla dinamik yükleme yaparak malzemelerin gerilme-ömür eğrisi (S-N) oluşturulmuştur. Punta kaynağının yorulma ömrüne etkisini tahmin edebilmek için, punta kaynağı olan ve olmayan yapıştırma bağlantılarını inceleyen bir yapısal gerilme yöntemi geliştirilmiş ve numune geometrisinden bağımsız olarak yapıştırma bağlantılarının yorulma ömründe çok isabetli tahminler yapılmıştır.

Ferreira ve diğ. (2002), E-cam elyaf ve polipropilenden üretilen kompozit tek taraflı bindirme yapıştırma bağlantısında, tabaka açıları, bindirme uzunluğu ve suya daldırmanın yorulma dayanımı açısından inceleme yapmışlardır. Kauçuk ve plastik sınıfı bir yapıştırıcı (Bostik 7452) kullanarak yapıştırılan numuneler 20°C, 40°C, 70°C

sıcaklıklarda ve 90 güne kadar periyotlarla suya daldırılmış; 20 °C'de 15-45 gün suya daldırma statik mukavemette %30'luk bir kayba, 40 °C'deki suya 15 günden daha az bir daldırma benzer oranda bir statik mukavemet kaybına sebep olduğu ve 70 °C suya maruz kalması yapışkan bağlantısının ömrünü önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir.

Reis ve diğ. (2015), çelik malzemelerin yapıştırma bağlantılarında yüklem frekansının yorulma davranışına etkisini incelemişlerdir. Sabit genlikte ve 2 Hz-40 Hz frekans aralığında yorulma deneylerinden elde edilmiş S-N diyagramları temel alınarak değişken frekanslar için yorulma ömrü öngörülmüştür. 2 Hz'de yapılan yorulma deneylerinde yorulma ömrü düşük ölçülmüş ve 10 Hz'e kadar ömrün arttığı frekans 10 Hz'e geldiğinde tekrar azaldığı fakat 2 Hz için ölçülen değerlerden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Öngörülen yorulma ömürleri ile ölçülen deneysel sonuçlar arasında iyi bir korelasyon elde edilerek, yüksek gerilme değerlerinde frekansın marjinal bir etkisi olduğu ve düşük gerilmelerde frekans seviyesinin yapıştırma bağlantılarında yorulma ömrüne önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

Fu ve diğ. (2000), kısa cam elyaf/polipropilen ve kısa karbon elyaf/polipropilen kompozitlerin mukavemet değerleri lif hacmi fraksiyonu ve lif uzunluğunun etkileri analitik olarak incelenmiştir. Lif uzunluğu ve elyaf hacmi arasındaki ilişki bir üstel fonksiyonla tanımlanan yaklaşımda, artan lif hacmi fraksiyonu ile mukavemet değerlerinin azaldığı, kısa cam elyaf/polipropilen kompozitlerin, kısa karbon elyaf/polipropilen kompozitlere göre daha yüksek verimlilik sergilediği ve her iki kısa elyaf (cam/karbon) katkısının kompozit malzemenin ömrüne olumlu etkisi olduğu gösterilmiştir.

Alia ve diğ. (2016), gemi yapılarında kullanılan çelik-poliüretan-çelik sandviç malzemeyi, deniz ortamında ve gerilme modları altında incelemişlerdir. İlk deney grubu yedi gün boyunca deniz suyuna ikinci deney grubu damıtılmış suya daldırılmış ve numuneler 0° ile 90° derece arasında yedi farklı yük modunda incelenmiştir. Damıtılmış suya daldırılan numunelerin soyulma gerilmesine ve kesme gerilmesine karşı daha dayanıklı, deniz suyuna batırılmış bağlantıların ise teğet ve normal gerilmelerinin çok düşük olduğu görülmüştür.

Yüzeyi nanokil takviyeli, epoksi cam elyaf kompozitler mekanik mukavemet, sertlik süneklik ve yorulma ömrü açısından incelenip takviyesiz malzeme ile

karşılaştırılmıştır (Withers ve diğ. 2015). Takviyeli malzeme diğer kompozit malzemeye göre tüm özellikler için ortalama %11 civarında iyileşme göstermiştir ve 60°C çalışma sıcaklığında takviyeli malzemenin çalışma ömrünün 10 yıl daha uzun olacağı simülasyonla görülmüştür. Nano takviyelerin, epoksi matrisi ve kompozit içindeki fiber-matris arayüzlerini güçlendirdiği görülmüştür. Elektron mikroskopuyla çekilen hasar bölgesi fotoğraflarında nanokillerin epoksi matris ve epoksi cam elyaf kumaşlarda yaygın olarak dağıldığı görülmüştür.

Tarfaoui ve Moumen (2018), denizcilik uygulamalarında sıkça kullanılan sertleştirilmiş uzun fiberli E-cam elyaf takviyeli balsa kompozit panellerden oluşan bir sandviç yapıyı incelemişlerdir. Malzemenin denizcilik uygulamalarında kullanılması nedeniyle yapıların ve yapıştırıcının mekanik özelliklerinin bozulmasına yol açtığı ifade edilerek dinamik darbe testleri yapılmış, numuneler tamamen hasar görene kadar deneye devam edilmiş ve darbe hızlarının yük-yer değiştirme ve şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkileri incelemişlerdir. Darbe testlerine göre hız etkisi arttıkça dinamik sertliğin azaldığını ifade etmişlerdir.

İmak ve diğ. (2016), hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışlarını karbon-epoksi reçine ve cam-epoksi reçine olmak üzere toplam 120 adet numune ve 8 farklı dizilim için deneysel olarak incelemişlerdir. 6 karbon 6 cam elyaf olmak üzere 12 tabakalı malzemelerin yorulma deneyleri sonucunda, en yüksek yorulma gerilmesi [karbon tek yönlü(0°)/cam tek yönlü(0°)] dizilimli numunede 710 MPa, en düşük yorulma gerilmesi 56MPa olarak [karbon tek yönlü(45°)/cam tek yönlü(45°)] dizilimli numunede görülmüştür.

Turan (2016), örgü cam elyaf takviyeli epoksi kompozit levhalarda yapıştırma bağlantılarının üzerine yama olarak eklenen fiber takviye açısının etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Fiber takviyelerin açıları 0°, 15°, 30° ve 45° olarak, yama uzunluğu 25,4, 38,1, 50,8 mm ve yapıştırıcı kalınlığı 0,2, 0,6 ve 1,0 mm olarak seçilerek, statik çekme deneyine maruz numunelerde yamadaki takviye açısının, yama uzunluğunun ve yapıştırıcı kalınlığının etkilerini gözlemlenmiştir. Yama uzunluğunun artması bağlantı dayanımını %10-%45 artırmış, tek taraflı yerine çift taraflı takviye hasar dayanımını %73-%160 artırmış ve yapıştırıcı kalınlığının artırılmasıyla hasar yüklerinin %11-%30 oranlarında azaldığını tespit etmiştir.

Yoo ve diğ. (2016), dış yüzey üzerine harici tabaka yapıştırılarak yama ile onarılan karbon-epoksi tabakalı kompozit malzemelerin statik ve yorulma dayanımı geri kazanım oranlarını incelemiştir. 1,9°-11,3° derecelik scarf açıları için, onarılan tabaka üzerinde üç değişken parametre; scarf açısı, bağlantı üzerine yapıştırılan dış plaka uzunluğu ve hasar boyutu ile statik mukavemet testleri gerçekleştirilmiş ve sonra en yüksek dayanım gösteren yapıştırma açıları için yorulma deneyleri yapılmıştır. Hasar görmemiş bir örneğe kıyasla, onarılmış yapışkan bağlantılar 1/5, 1/10, 1/20 ve 1/30 scarf oranlarında sırasıyla %19,9, %51, %79,1 ve %83,6 oranlarında statik dayanım kazanımı sağlanmıştır. Sonuç olarak, statik ve yorulma dayanımlarına bakıldığında, onarılmış numuneler arasında 1/30 scarf oranına sahip numunelerin en yüksek dayanımı verdiğini ve yapıştırma bağlantısının üzerine yapıştırılan dış plaka uzunluğunun önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.

Boutar ve diğ. (2018) otomotiv endüstrisinde otobüs yapılarında yapıştırma bağlantılarının yapışma yüzeyinde uygun bir yüzey işlemleriyle çok iyi bir ara yüz yapışması sağlayarak yorulma ömrünü incelemişler ve yapışma yüzeyinin mekanik hazırlığının bağlantı performansını doğrudan etkilemesi nedeniyle yapıştırıcı kalınlığının seçiminin önemini araştırmışlardır. Alüminyum alaşım numunenin yapışma yüzeylerinde 0,6-1,5 µm arasında dört farklı R_a değerlerinde yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 0,3 mm'den 2 mm'ye kadar dört farklı yapışkan kalınlığında tek yönlü yapıştırılmış bağlantılar hazırlanarak bu değerlerin otobüsün çeşitli parçalarındaki yorulma davranışına etkisini incelemişlerdir. Yapıştırma bağlantısının yorulma ömrü üzerinde önemli etkileri olan bu değerlerden optimum yüzey pürüzlülüğü R_a≈0,6 µm, optimum yapışkan kalınlığı e=1 mm olarak tespit etmişlerdir.

Schneider ve diğ. (2018), yapıştırma bağlantılarının yorulma hasarında birleşik farklı genlik değerleri ile sıcaklık değişiminin etkilerini araştırmışlardır. Sabit genlik değeriyle deneyler yaparak S-N eğrileri oluşturulmuş, artan genlik değerinin yorulma dayanımını azalttığı gözlemlenmiştir. Sonra değişken genlik değerleri kullanarak sabit sıcaklıkta ve farklı sıcaklıklarda deneyler gerçekleştirilmiş, değişken genlik değerlerinde -10°, 23° ve 50° derecelik sıcaklıklarda çalışılmıştır. -10° ve 23° derece sıcaklıklarda yorulma hasarının geciktiği 50° derece sıcaklıkta ise hasarın daha hızlı olduğu, sıcaklık farklılığının hasar modu üzerinde bir etkisi olmadığı tespit

edilmiştir. Yorulma ömürleri, toplam hasarın tekil hasarların tek tek birleşimiyle oluştuğunu kabul eden matematiksel bir yaklaşım metodu (Weitzenböck, 2012) olan Miner doğrusal hasar birikme yöntemiyle hesaplanmış, bu yöntem ile tahmin edilen ömürler sabit sıcaklık için iyi bir korelasyon vermiş ancak değişken sıcaklık koşullarında beklenenden çok daha alt yorulma dayanımlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Bir malzemenin yorulma davranışına yönelik S-N yaklaşımının dezavantajı, çatlak başlatma aşaması ile çatlak yayılma aşaması arasında bir ayırım yapılamamasıdır (Chawla 2012).

Khashaba ve diğ. (2017), Karbon fiberle güçlendirilmiş epoksi kompozit yapılarda scarf yapıştırma bağlantılarının, SiC ve Al₂O₃ nanofillerin Epocast 50-A1/946 epoksiye ultrasonik olarak karıştırılmasıyla yorulma performansının artırılması konusunda çalışmışlardır. Yapıştırma bağlantıları beş farklı scarf açısında üretilmiş, yorulma deneyleri sabit yük genliği, 10 Hz frekans ve 0,1 gerilme oranıyla 36 MPa yorulma yükü ile gerçekleştirilmiştir. Nano katkılı bağlantılarda en yüksek yorulma ömrü Al₂O₃ katkılı yapıştırma bağlantılarında gözlemlenmiştir. Khashaba, Najjar (2018) ile yaptığı çalışmada, çok cidarlı karbon fiber/epoksi kompozit nanotüplerin yapıştırma bağlantılarının, yapıştırma kalınlığı 0,17 mm ve 0,25 mm, scarf açıları 5° ve 10° derece olması halinde çekme ve yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ekstensometre ve strengeli numuneler kullanarak, yapışma yüzeyine paralel yer değiştirmeyi ölçmek için deneysel/analitik model geliştirilmiş, ölçülen değerler yük altında yapıştırılan tabakaların gerilmelerini, düzlemsel kayma gerilmelerini ve young modüllerini belirlemek için kullanılmıştır. 5° derece scarf açısında diğerlerinden 2-3 kat daha yüksek young modülü, scarf açısının 10° dereceden 5° dereceye düşürülmesi ve yapıştırma kalınlığının 0,25 mm'den 0,17 mm'ye düşürülmesi ile en iyi yorulma dayanımı elde edilmiştir.

Mariam ve diğ. (2018), AA7075 alüminyum alaşımlı ve cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerde; mekanik olarak cıvatayla (Huck cıvatası) tutturulmuş bağlantılar, araldite epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar ve hem yapıştırıcı hem cıvata ile birleştirilmiş hibrit bağlantılar olmak üzere üç farklı bağlantı kullanarak çekme ve yorulma dayanımı özelliklerini araştırmışlardır. Kullanılan Huck cıvatası, tork cıvatası olarak da bilinir, yüksek titreşim veya gerilmeye maruz bağlantılarda kullanılmak üzere tasarlanmış bir cıvata (Duffy ve Wright, 2016). Yorulma

deneyleri $R=0,1$ gerilme oranıyla ve farklı genlik değerleri için gerçekleştirilmiş, S-N eğrileri elde edilmiştir ve hibrit bağlantıların diğer bağlantı tiplerine göre daha yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Kırık yüzeyler SEM ile incelendiğinde ise hasar modlarının lif kırılması, geniş çaplı delaminasyon ve matris çatlaklarıyla oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Polat ve diğ. (2018), naylon 66 (N66) matris malzemesini nanofiber grafen takviyesiyle değiştirerek, alüminyumla tek yönlü yapıştırılmış bağlantıların, yorulma yüküne maruz kaldığında ani kırıklara neden olan hasar mekanizmalarını önleme üzerine çalışmışlardır. Elektrospinning yöntemiyle ağırlıkça %1, %3 ve %5 grafen katkılı nanoplaklar üretilmiş, tek eksenli periyodik yükleme ile yapıştırma bağlantılarının yorulma testleri maksimum kesme mukavemetinin %20'si, %30'u, %40'ı, %50'si ve %60'ı olmak üzere beş farklı yük seviyesinde gerçekleştirilmiş ve bağlantıların yorulma ömrü çizilen S-N eğrileri üzerinden değerlendirilmiştir. Grafen içeriğinin miktarı sistematik olarak arttıkça nanofiberleri daha dayanıklı hale getiren yüzde kristallik de artmıştır ve matriste nanofiber grafen içeriğinin artmasının yapıştırma bağlantılarında kesme dayanımını ve yorulma ömrünü artırdığını tespit etmişlerdir.

Türkmen ve Köksal (2013), cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemeler, değişken cam elyaf tabaka sayılarında el yatırması yöntemiyle üretilip mekanik özellikleri incelenmiştir. Tabakalı kompozit malzemelere çekme ve üç nokta eğme deneyleri yapılarak mukavemet değerleri tespit edilmiş, düşük hızlı darbe deneyi ile malzemelerin darbe dayanımları incelenmiştir. Cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemenin tabaka sayısına bağlı olarak çekme dayanımı elastisite modülü ve eğilme dayanımında artış görülmüştür. Deneyler öncesi ve sonrası SEM ile fotoğrafları alınıp metalografik açıdan malzemeler incelenmiş ve el yatırması yönteminde reçine oranının ayarlanamaması sonucu yapı içinde büyük ve çok sayıda hava boşlukları görülmüş ve bu hava boşluklarının dayanım açısından negatif etki ettiği tespit edilmiştir.

Machado ve diğ. (2018), kompozit tabakaların erken delaminasyonunu önlemek için deneysel olarak incelenmiş kompozit yapıştırma bağlantılarının yarı statik ve darbe dayanımı performansını simüle edebilen sayısal modelleme geliştirmişlerdir. ABAQUS kullanılarak geliştirilen yarı statik modeller deney

şartlarını oldukça iyi simüle etmeyi sağlamış ve bağlantıların farklı yükler karşısında davranışlarını modelleyebilmiştir. Karışık yapıştırıcı tekniği kullanılmış ve tekil kullanıma göre çok daha iyi mekanik performans elde edilmiştir.

Annamalai ve Ramasubbu (2018), cam elyaf takviyeli polimer kompozit ile doğal bir elyaf olan pamuk kabuğu liflerini birleştirerek düşük maliyetli ve çevre dostu bir malzemenin mekanik özelliklerini incelemiştir. Reçine ağırlığı optimum bir seviyede sabit tutularak cam elyafı ve pamuk kabuğu liflerini farklı ağırlık yüzdelerinde altı farklı oranda karıştırarak kompozit malzemeler hazırlanmıştır. ASTM standartlarına göre kütlelerinin %15'i cam elyafı ve %10'u pamuk kabuğu lifinden oluşan polimer kompozit malzeme en iyi mekanik özellikleri vermiş ve elde edilen mekanik değerler matematiksel olarak elde edilen sonuçlarla örtüşmüştür. Pamuk kabuğu partiküllerinin yüzey morfolojisi ve numunelerin kırık yüzeyleri SEM ile de incelenmiş pamuk kabuğu katkısının %10'a kadar önemli ölçüde matris malzemesiyle bağlanmada etkisi olduğu görülmüştür.

Sonia ve diğ. (2018), denizcilik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen yapıştırma bağlantısıyla birleştirilmiş cam/vinilester kompozit malzemelerde 1, 2, 3 ve 4 bar basınçlarda dinamik bası testleri uygulayarak, bağlantıların dinamik karakterizasyonunu incelemiştir. Bağlantının mekanik davranışını ve hasar kinetiği üzerindeki etkisi için Hopkinson basınç çubuğunu kullanılmıştır. Hopkinson basınç çubuğu testi malzemenin yüksek hız ve deformasyon özelliklerini belirlemek için kullanılan bir tekniktir, uzun çubuklarda tek yönlü elastik dalga geçiş prensibi temelinde geliştirilen metodu ile yüksek hızlarda kayma, basma, çekme ve eğilme testleri yapılmaktadır (Güden 2015). Hasar ilerlemesini takip etmek için saniyede 50.000 görüntü tarayan yüksek hızlı kamera kullanılmıştır ve deneyler dinamik özelliklerin gerinim hızındaki değişime göre değiştiğini göstermiştir. Fiber burkulması ve delaminasyon (tabakaların ayrışması) düzlem içi basınç testlerinde ana hasar kriterleri olduğundan bu çalışma yapıştırma bağlantılarında dinamik bası altındaki tepkilerini anlamının yanında malzeme tasarımı için deformasyon hızına bağlı hasar modelleri oluşmasını da sağlamıştır.

Arumugam ve diğ. (2018), kompozit malzemelerde üç boyutlu örgü kumaşların kullanımında oluşan tabaka içi kesme davranışını incelemiş ve kompozit üretimine uygun 3D örgü tekstil yapısını incelemiştir. Tabakaların ayrılma nedenlerini

araştırmak için statik çekme uygulanan numunelerde alan yer değiştirmeleri ve kesme aalarını incelenmiş ve bir MATLAB programı geliştirilmiştir. Araştırma sonucunda, i yüzey ve ara tabakanın kalınlığına, yüzey yapısına ve ara liflerin özelliklerine bağlı olarak 3D rglerde hasarın geliştiği tespit edilmiştir.

Polimer nanokompozitler geleneksel malzemelere göre daha iyi fonksiyonel özelliklere, hafifliğe, aşınma direncine ve daha uzun ömüre sahiptir ve pek çok mühendislik alanında onların yerine geçmiştir. Vijaykiran ve diğ. (2019), E-cam elyaf takviyeli grafen oksit nanoplate bazlı polimer nanokompozit malzemeleri el yatırma tekniği ile üretmiş SEM analizi ile nano dolguların reçineyle nasıl etkileşime girdiğini incelemişler ve gerilme, sertlik, tokluk ve eğilme testleri gerçekleştirmişlerdir. Epoksi malzemeye dört farklı ağırlık yüzdesinde (%0,5, %1, %1,5 ve %2) nanopartikül eklenmiş, yapılan takviyeyle gerilme mukavemeti (10,25, 14,97, 16,26 ve 18,64 yüzdelik oranında) ve basınç dayanımının (1,97, 3,46, 5,65 ve 11,56 yüzdelik oranında) arttığı, ayrıca %4 oranında nanopartikül eklendiğinde bileşenler çok esnek hale geldiğinden kürlenme sresinin arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen verilere göre geliştirilen malzemenin rzgr türbini kanatlarında ve rotor kanat malzemesi olarak, ayrıca havacılık, savunma ve otomotiv gibi endüstriyel alanlar için de kullanımı tavsiye edilmiştir.

Kırkayak (2019), kompozit malzemelerde yapıştırma bağlantılarının bağlantı bölgesinde oluşan soyulma ve kayma gerilmelerini azaltmak ve gerilme yığılmasını önlemek amacıyla yapılan çalışmada, tek taraflı bindirme bağlatısında farklı geometrik tipte ve iki farklı yapıştırıcının hibrit kullanımının, gerilme dağılımına etkisini sonlu elemanlar metoduyla incelemiştir. Geliştirilen bağlantı tipi soyulma ve kayma gerilmelerini düşürmüş, gerilme yığılmalarını %40 oranında azaltmış, hibrit yapıştırma sisteminde daha üniform bir gerilme dağılımı elde ederek yorulma ömrüne olumlu katkı sağlanmış ve yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımı üzerinde etkili olduğu grlmştir.

Oguma ve Naito (2019), gerilme oranının yapıştırma bağlantılarındaki kırık mekanizması üzerindeki etkisini araştırmak için farklı gerilme oranlarında kırılma deneyi ve kırık yüzey incelemesi yapmışlardır. Deneylerde cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit plaka ve akrilik bazlı bir yapısal yapıştırıcı kullanmışlardır. Tek taraflı bindirme bağlantıları ile elektro-hidrolik yorulma testiyle yorulma deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Frekans 10 Hz ve gerilme oranları -1, -0,5, 0,1, 0,5, 0,7 ve 0,9 alınmıştır. Ortalama kuvvetin etkileri yüksek gerilme oranları için incelenmiş $R > 0,5$ olduğunda 107 döngüde yorulma mukavemeti önemli ölçüde azalmıştır.

Tsai ve diğ. (2019), yaygın olarak kullanılan fakat çok kırılğan olan, termoset polimer matrisli fiber kompozitlerin dayanıklılığını artırmak için iki fiber boyutunu modifiye ederek silika nanopartiküller kullanmışlar, takviye edilen kompozitler üzerinde yorulma çatlakları ve iç tabaka kırığı testleri yapılmıştır. Silika nanopartiküllerin eklenmesi yorulma çatlakları büyüme oranında bir değişiklik yaratmamış, eklenen takviye malzemenin tokluğunu artırdığı görülmüştür. Kompozite eklenen silika nanopartiküller ağırlıkça %0,89 olmasına rağmen, kırılma enerjisini %33 artırmış ve silika nanopartiküllerin kompozitin yorulma ömrüne önemli bir katkısı olmadığı görülmüştür.

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler havacılık, savunma ve otomotiv uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Vedrtnam (2019), bu çalışmada karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin tek yönlü bindirme bağlantılarında ara yüz güçlendirmesiyle yorulma ömrünü ortalama %96,56 artıran yeni bir yöntem geliştirmiştir. Özel tasarlanmış bir kalıplama tekniği ile sıkıştırılarak el yatırma yöntemiyle hazırlanmış, cam tozu ve polivinyl asetat yapıştırıcı karbon fiberlerin hazırlanması için kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş, deformasyon ve gerilmeleri elde etmek üzere COMSOL ile analiz edilmiş ve gerilme-deformasyon-ömür ilişkileri kurulmuş ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelenmiştir. Daha düşük yüklerde (daha yüksek R) yapılan güçlendirme işleminin etkisi belirgin olarak ortaya çıkmış, işlenmiş numunenin işlenmemiş örneklerden %96,56 daha yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu görülmüştür. İzlenen güçlendirme yöntemi, basit ve ucuz bunun yanında karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin mukavemeti ve yorulma ömrünün artırılmasında çok etkili bir yöntem olarak tespit edilmiştir.

Moreira ve diğ. (2020), karbon-epoksi kompozitlerde 10° derecelik scarf açısına sahip, yapıştırma bağlantısıyla onarılmış malzemelerin üç nokta eğme statik yükü ve yorulma yükü altında hasarını incelemiştir. Sayısal bir model oluşturularak sonlu elemanlar analizleri yapılmış, scarf açısının statik yük ve yorulma ömrü üzerindeki etkisini değerlendirmek için oluşturulan model açının azaltılması durumu

incelendiğinde olumlu sonuçlar ortaya konmuştur. Önerilen sayısal model bu tip onarımların tasarımında ve yorulma ömürleri ile ilgili çeşitli parametrelerin tanımlanmasında önemli bir araç olarak belirlenmiştir.

Morgado ve diğ. (2020), yapıştırma bağlantılarında kompozit malzemelerin delaminasyonu bağlantının erken hasar görmesine sebep olduğundan, ilave yapışkan tabakalar ekleyerek tek taraflı bindirme bağlantısında karbon fiber takviyeli kompozitlerde delaminasyonu azaltmak için analizler yapmışlardır. 50 mm üst üste bindirme uzunluğu ve 3,2 mm yapıştırma kalınlığı ile çalışılmış, yarı statik ve 3 m/s'de darbe deneyleri yapılmış ve yarı statik koşullar için delaminasyon hasarını önlerken dinamik koşullar için hasar başlangıcını geciktirmiştir. Her iki durum için yük dayanımının arttığı görülmüş, sonlu elemanlar analizi için ABAQUS kullanılmış ve sayısal bir model geliştirilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kolombiya'da yapılan ilk askeri uçak Calima T-90 Kolombiya Hava Kuvvetlerinin ilk uçuş eğitim uçağı olarak kullanılmaktadır ve bu nedenle sık sık sert yüklere maruz kalmaktadır. Calima T-90 temel olarak kompozit malzemelerden oluşmakta ve bu birleşenlerin yapıştırılmasında ana yöntem olarak farklı kalınlıklarda yapışma bağlantıları kullanılmaktadır. Bautista ve diğ. (2020), yaptıkları çalışmada kompozitlerin bu yapıştırma bağlantılarında yapışkan kalınlığının, bağlantıların mekanik performansları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir ve tek taraflı bindirme numuneleri yarı statik yükleme ve darbe yorgunluğu için analiz edilmiştir. Bağlantının tüm yapıştırma kalınlıkları için bu parametreler incelenmiş ve bir hasar ömrü tahmin modeli oluşturulmuş, yapışkan kalınlığı arttıkça darbe yorulma ömrünün azaldığı görülmüştür.

Jiang ve diğ. (2020), cam elyaf takviyeli polimer/çelik çift taraflı bindirme yapıştırma bağlantısının yorulma davranışını deneysel olarak incelemişler ve hasar modu, F-N eğrisi, sistem hasarı, çatlak başlangıcı ve yayılma açısından sonuçları değerlendirmişlerdir. Yorulma yükü altında lineer ve lineer olmayan hasar modelleri ve çatlak büyüme hızının matematiksel bir modeli geliştirilmiştir. Çatlak başlangıç ömrü ile yorulma ömrü arasındaki oranın uygulanan maksimum yükün azalmasıyla arttığı ve polimer/çelik yapıştırma bağlantısının yorulma yükü altında ara yüz bozulma hızı ve ara yüz çatlak yayılma oranı polimer/polimer bağlantıya göre daha büyük olduğu görülmüştür.

Pascoe ve diğ. (2020) tarafından, epoksi FM94 film yapıştırıcıda yapışkan kalınlığının yorulma çatlağı büyümesi üzerindeki etkisi, deneylerle ve sayısal modelleme yaparak araştırılmıştır. Artan yapışkan kalınlığı çatlak büyüme oranının artmasına sebep olduğu görülmüş, birim çatlak büyümesinin yapışkan kalınlığına bağlı olmadığı tespit edilmiş ve sayısal analiz bunu doğrulamış ve plastik enerji dağılımının kalınlıkla arttığını göstermiştir. Deneysel sonuçlar, bu plastisite artışının çatlak büyüme oranı arttıkça olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Delzendehrooy ve diğ. (2020) tarafından, yaptıkları araştırmada yapıştırma bağlantılarını güçlendirmek için ağacın dört farklı bölümünden alınan hurma lifleri ile takviye etmişler ve takviyenin boyutu, tipi ağırlık oranı gibi bazı parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. Elyafın etkisini araştırmak için ham lifler iki farklı konsantrasyonda sulu NaOH çözeltisi ile işlenmiş ve boyut etkisini incelemek için, 0,5-2 mm'lik kısa elyaf ve 30 mm'lik uzun elyaf ayrı ayrı yapıştırıcıya eklenmiştir. Maksimum bağlantı kuvvetini tespit edebilmek için hurma lifleri üç farklı oranda (%2, %5 ve %10) tek taraflı bindirme bağlantıları deneysel olarak incelenmiş, bağlantı dayanımı, ağırlıkça %6 NaOH çözeltisi ile hazırlanmış %10 ağırlık oranındaki kısa lifler kullanılarak %118 artmıştır. Çözelti konsantrasyonunun artmasının bağlantı dayanımını artırdığı görülmüş ve takviye liflerinin boyut değişiminin önemli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bağlantı dayanımındaki en yüksek gelişme, ağırlıkça %6 NaOH çözeltisi ile hazırlanmış ağırlıkça %2 kısa lif kullanılarak %141 olarak elde edilmiştir.

1.3 Tezin Amacı

Bu tezde kalın örgü tabakalı kumaş kompozit malzemelerin dil/oluk yöntemiyle birleştirilmesi durumunda dil uç bölgesi üzerinde yapılacak tasarım ile bu bölgede oluşan gerilmeler azaltılarak veya başka bölgelere dağıtılarak yapışkanlı bağlantının dinamik yük taşıma kapasitesinin ve dayanımının artırılması amaçlanmıştır.

Deneysel sonuçlar incelenerek malzemenin kritik bölgelerindeki yorulma ömrü analiz edilmiştir. Bu işlemler yapılırken, dayanım üzerine önemli rol oynayan, dil/oluk yapıştırma bağlantısında uç tasarımları parametrik olarak incelenmiştir.

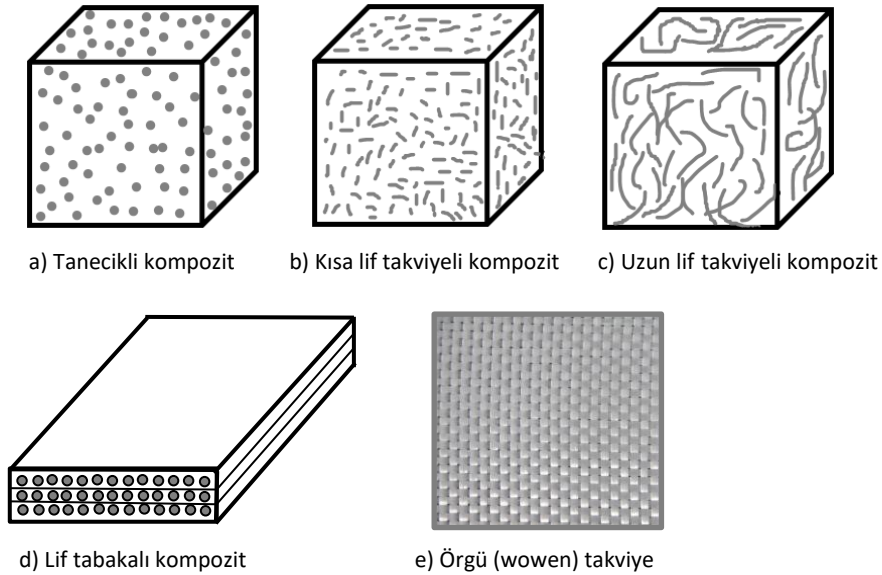
Daha önce ifade edildiği gibi, yapıştırma bağlantıları uygulamada statik olarak yük taşımasının yanında, dinamik yüklemeler ile de karşı karşıya kalmaktadır. Dolayısı ile yapışkan bağlantıların dayanımı ve dayanımını etkileyen faktörlerin, bozulma mekanizmalarının, iyi bir şekilde analizi gereklidir.

Kompozit malzemeler için uygun yapıştırma tekniği kullanılması ile havacılık, uzay, deniz taşıtları, otomotiv gibi sanayi sektörlerinde kompozit malzemelerin kullanımı arttırılabilir. Kompozit malzemelerin kullanımını sınırlayan en büyük sorunlar kopma ve bozulmanın yapıştırma bölgelerinde oluşmasıdır. Bağlantı bölgelerinin mukavemeti, iyi bir yapışma bölgesi tasarımıyla arttırılabilir. Bu şekilde kompozit malzemeler yaygın kullanım alanlarına sahip olabilir. Bu nedenle, özetle bu çalışmada dil-oluk bağlantılarında dinamik yükleme durumunda uç (Tip) geometrileri parametrik olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Mühendislik tasarımlarında kullanılan malzemeler metaller, plastikler, seramikler ve kompozit malzemeler olarak ayrılırlar. Birbiri içinde çözünmeyen en az iki malzemenin yeni özellikler oluşturmak için makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşan malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompozit malzemeler mekanik özelliklerini oluşturan takviyelerden ve bunları bir arada tutan matris malzemelerinden oluşur. Kompozit malzemelerde takviye malzemesi rijitlik ve mukavemet gibi yapısal özellikleri, matris malzemesi takviyenin birbirine bağlanması, yükün malzemeye eşit dağılması, takviye malzemesinin kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını ve şekillenmesini sağlar (Zor 2018).

Kompozitlere katılan takviye tipleri tanecikli, sürekli veya süreksiz lif şeklinde veya örgü tabakalar halinde olabilir. Bunların dışında bir de nanokompozitler vardır. Nanokompozitler, nanometre (10^{-9} m) ölçeğinde olan malzemelerden oluşur. Nanokompozit olarak sınıflandırılacak malzeme için kabul edilen aralık, bileşenlerden birinin 100 nm'den az olmasıdır (Kaw 2006). Şekil 2.1'de bu takviye tiplerine örnekler verilmiştir.



Şekil 2.1: Kompozit malzemede takviye tipleri

Takviye malzemesinin süreksiz (kısa) lifli olanları düzenli ya da rastgele olarak ayrılır. Sürekli takviyeler ise Şekil 2.1 d'de görüldüğü gibi tek yönlü sürekli lif,

tabakaların farklı açılarda yerleştirilmesiyle iki veya daha çok yönlü sürekli lif olabildiği gibi Şekil 2.1 e’de görüldüğü gibi takviyeler örgü (woven) halde tabakalardan oluşabilir.

2.1 Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemenin türünü belirleyen pek çok özellik vardır. Takviye malzemesinin özellikleri, matris malzemesinin özellikleri, matris içinde takviyenin oryantasyonu ve geometrisi ve takviye/matris oranı gibi özellikler kompozitleri sınıflandırmada kullanılmaktadır. Kompozitleri matrislerine göre ayırdığımızda kompozit malzemeler 3 temel grupta incelenebilir;

- Polimer matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler

2.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler (PMC/FRP)

Polimer matrisli kompozitler 1940’lı yıllarda çelik ve alüminyum gibi geleneksel yapı malzemelerinin yerine daha düşük ağırlıklı malzeme ihtiyacı doğrultusunda havacılık sektöründe kullanılmak üzere geliştirilmeye başlanmıştır. Aşınma dayanımı, ağırlık, darbe dayanımı, korozyon direnci, düşük ısı iletkenlik, yeterli optik özellikler, düşük elektriksel iletkenlik gibi pek çok avantajı yüzünden zamanla otomotiv sektörü, savunma sanayisi, uzay teknolojisi ve denizcilik yapılarında öncelikli malzeme tercihi olmuştur (Cheremisinoff 1995).

Gemi yapımında polimer matrisli Kompozit kullanımı çelik yapılara göre en az yarı yarıya hafiflik avantajına sahip olduğu gibi özellikle donanma gemilerinde aranan özelliklerden biri olan manyetik malzeme olmaması ile de caziptir. Polimerik kompozitler, sönmüleme kabiliyetinden dolayı özellikle dinamik yüke maruz bölgelerde kullanılmaktadır (Evcin 2017).

Polimer matrisli kompozit malzemeler de kendi içinde üçe ayrılır:

- Termoset polimerler
- Termoplastik polimerler
- Elastomerler

Termosetler ısıtılarak şekillendirildiğinde mikroyapıları değiştiğinden geri dönüşümü mümkün olmamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler. Polyester, epoksi, alkiter ve aminler bu gruptadır.

Termoplastikler düşük sıcaklıklarda kullanılır ısıtılınca şekil alır soğuduğunda sertleşirler. Naylon, polietilen, akrilik ve vinyl termoplastiklere örnek verilebilir.

Elastomerler aşırı esnek bükülebilir plastiklerdir, kolay deforme olmazlar ve yalıtım özellikleri iyidir. Kauçuk ve lateks ile örneklenebilir.

2.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (MMC)

Daha çok havacılık ve otomotiv alanlarında kullanılan MMC'ler sıcak presleme ya da vakum gibi sıcak işleme yöntemleriyle üretilirler. Eklenen takviyeye göre mukavemet değerleri istendiği gibi geliştirilebilir fakat matris ve takviye arasındaki bağ iyi sağlanmalıdır. Ağırlıklı olarak matris malzemesi olarak Al-Si alaşımları kullanılır. Al, Ti, Mg ve alaşımlarının kullanımı yaygındır.

2.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler (CMC)

Seramik matrisli kompozit malzemeler ısı dayanımı yüksek olduğundan yüksek sıcaklığa maruz parçalar için tercih edilir. Diğer matris yapılarına göre gevrekliği ve tokluğu yüksektir. Korozyon dayanımı ve ısı direnci yüksek olduğundan roket motorlarında, uzay araçlarının ateşleme sistemlerinde ve fren diskleri gibi önemli yerlerde tercih edilirler.

2.2 Takviye Malzemelerine Göre Kompozit Malzemeler

Kompozitlere ilave edilen takviyenin malzemesine göre, boyutlarına göre ve birleştirme şekline göre farklı sınıflandırmalar yapılabilir. Takviye boyutlarına göre parçacıklı takviyeli kompozitler, lif takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler ve dolgulu kompozitler olarak incelenebilirler. Lif takviyeli kompozitlerde lifler sürekli ve süreksiz olarak ayrılır. Tabakalı kompozitlerde ise tabakalar eşit olabildiği gibi karma tabakalardan da oluşmaktadır. Mevcut lifler şöyle sayılabilir; Cam elyaf, grafit/karbon, aramid, polietilen, bor, silikon nitrür, silika, alümina ve silikon karbür (Peters 1998).

Takviyenin malzemesine göre ise bu elyaflar 3'e ayrılır:

- Doğal elyafli kompozitler (keten, bambu elyafli vb.)
- Sentetik organik elyafli kompozitler (karbon, polietilen, aramid elyafli vb.)
- Sentetik inorganik elyafli kompozitler (cam, bor, keramik, metal elyafli vb.)

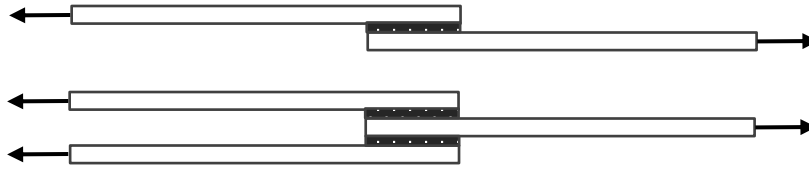
En yaygın kullanıma sahip kompozitlerden bir tanesi inorganik sentetik elyaflılardan cam elyafli kompozitlerdir. Cam elyafli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan elyaf türleri C-cam (C-glass), E-cam (E-glass) ve S-cam (S-glass) olarak sayılabilir. E-cam yüksek elektriksel direnci nedeniyle ("e"lektrik), S-cam yüksek gerilme mukavemeti nedeniyle ("s"tructural) bu şekilde adlandırılmıştır (Tuttle 2004). Bunlar ihtiyaca göre kullanım alanlarına sahiptir. Örneğin en yaygın kullanıma sahip olan E-cam elektrik yalıtımı ve düşük su emme özelliklerine, C-cam yüksek kimyasal dayanıma (depolama tanklarında kullanılır), S-cam ise yüksek dayanım (maliyeti yüksek olduğundan uçak teknolojilerinde kullanılır) özelliklerine sahiptir.

2.3 Kompozit Malzemelerde Yapıştırma

Gelişen teknolojilerle geleneksel imalat yöntemlerinin bazıları teknolojik yenilenmeye gitmiş bazıları ise yeni yöntemlerin avantajları karşısında yenilmiştir. Malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan yöntemlerden perçin ve cıvata gibi

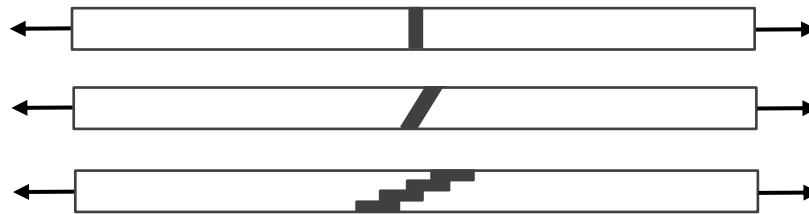
yöntemler malzemenin birleşme noktasındaki dayanımını düşürdüğü için kaynak gibi yöntemler ise her malzemeye uygulanamadığı için yapıştırma teknolojilerindeki araştırmalar hız kazanmıştır.

Kompozit malzemelerde yapıştırma genelde tek taraflı bindirme veya çift taraflı bindirme şeklinde yapılmaktadır. Bu yapıştırma şekli, tabakalı kalın kompozitlerde yapışma tabakasının yükün eşit dağılmamasından kaynaklı olarak alt tabakalardan ayrılması/soyulması gibi erken hasarlara yol açtığı görülmüştür. Şekil 2.2’de iki parça arasında tek taraflı (üstte) ve çift taraflı (altta) yapışma şekli görülmektedir.



Şekil 2.2: Tek tesirli ve çift tesirli yapıştırma şekli

Bu sebeplerden tabakalı kalın kompozitlerde malzeme kalınlığının yükü eşit olarak aktardığı alın yapıştırma tercih edilmekte ve bu yöntemin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Şekil 2.3’te iki malzemenin üstte alın yapıştırma, ortada açılı alın yapıştırma ve altta da basamaklı yapıştırma şekli gösterilmiştir. Bu yapıştırma şekilleri tabakalı kalın kompozit malzemelerde kalınlık boyunca yapıştırmayı dolayısıyla yükün tüm tabakalara eşit olarak aktarılmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.3: Alın, açılı alın ve basamaklı yapıştırma şekli

Alın alına yapıştırmada yapışan yüzeylerin açılı veya basamaklı olarak şekillendirilmesinin amacı yapışma yüzeyini büyütürken kayma yüzey alanını genişletmektir. Açılı yapıştırma bağlantısı, yük taşıma kabiliyeti olarak çift taraflı bindirme bağlantısından 3,5 kat daha fazladır (Vinson 2004).

Trafik, rüzgârdan kaynaklı titreşim yükleri, devirli hareket eden makine parçaları, dalgaya maruz gemi gövdesi, hava darbesine maruz uçak yapıları vb. gibi hızla değişen, tekrarlı sürekli ya da darbeli iç kuvvetlere maruz kalan yapısal elemanlarda yorulma hasarı meydana gelebilir (da Silva 2006). Bu nedenle, yapışma bağlantılarının geliştirilmesi konusundaki arayışlar özellikle dinamik yüke maruz kaldığı ve daha yüksek bağlantı dayanımına ihtiyaç duyulan durumlar için yapıştırma teknolojisinde yapışan yüzeylerde bağlantı yüzeylerinin tasarımını zorunlu kılmıştır. Bu ihtiyaç doğrultusunda dil-oluk yapıştırma bağlantıları ortaya çıkmıştır. Şekil 2.4'te görülen düz uçlu bir dil-oluk yapıştırma bağlantısının üst görünüşüdür. Yapışan iki yüzey kalınlık boyunca biri dil şeklinde diğeri oluk şeklinde tasarlanıp karşılıklı yapıştırılarak bağlantı tasarımı yapılmaktadır.

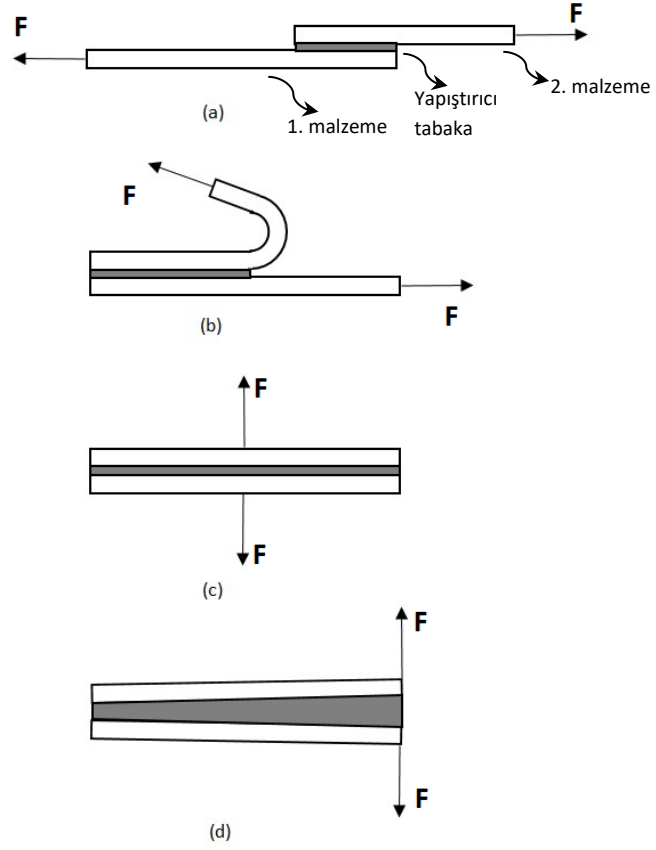


Şekil 2.4: Dil-oluk yapıştırma üst görünüm

2.3.1 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Gerilmeler

Yaptıkları çalışmada Adams, R.D. ve diğ. (1997) , yapıştırıcıların yükler karşısında farklı davranış gösterdiğini, çekme kuvveti uygulandığında maruz kaldıkları soyulma ve açılma gerilmelerinin en çok hasara neden olan gerilmeler olduğunu tespit etmişlerdir. Kesme gerilmesinin daha az etkilediği ve dağılımının daha düzgün olduğunu, bu yüzden yapışma tasarımının kesme gerilmelerine maruz kalacak şekilde yapıştırma şeklinde yapılmasının uygunluğunu göstermişlerdir. Ayrıca bu çalışma farklı açılarda tabakalı kompozit malzemelerin izotrop malzemelere göre kayma gerilmesi dayanımı daha düşük, aksenal yönde gerilme dayanımı daha iyi olduğunu belirtmiştir.

Şekil 2.5'te yapıştırma bağlantılarına uygulanan kuvvetlerin yönleri oklarla gösterilmiştir. Buna göre bağlantıların maruz kaldıkları gerilmeler Şekil 2.5-a'da kesme, Şekil 2.5-b'de soyulma, Şekil 2.5-c'de çekme ve Şekil 2.5-d'de açılma şeklinde görülmektedir. Yapıştırılan malzemeler ve yapışkan tabaka, hepsinde Şekil 2.5-a'da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.5: Yapıştırma bağlantılarında gerilme tipleri a) Kesme gerilmesi b) Soyulma gerilmesi
c) Çekme gerilmesi d) Açılma gerilmesi

Tabakalı kompozitlerin yapıştırma bağlantılarının çekme yüküne maruz kaldıklarında yapıştırma tasarımı önemlidir, tabakaların soyulmasını önleyecek şekilde ve yükün tüm tabakalara eşit dağıtıldığı yapıştırma tasarımları yapılması gerekmektedir. Bu şekilde tabakalara eşit yük dağılımı için alın yapıştırma tercih edilir.

3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasında incelenecek numunelerin deneylerinde kullanılan cihaz INSTRON 8801 Statik-Dinamik test cihazıdır. Bu deney cihazı ve yapıştırma işlemi sonrası yüzey temizleme işlemleri için PAÜ Makine Mühendisliği Bölümü Ar-Ge laboratuvarlarında mevcut teçhizat kullanılmıştır. Şekil 3.1’de deneylerin gerçekleştirildiği Instron 8801 test cihazı görülmektedir.



Şekil 3.1: Instron 8801 statik-dinamik test cihazı

Çalışma kapsamında tasarlanıp yorulma dayanımları karşılaştırılacak yapıştırma bağlantılarının seçimi için geometriler ve parametreler belirlenip PAÜ-BAP doktora projesi kapsamında malzeme ve hizmet alımları yapılmıştır. Dinamik yüklemeye ön yorulma deneylerinde kullanılmak üzere ilk ön deney numuneleri, dil/oluk bağlantı tekniği kullanılarak dil uç bölgesinde oluşturulacak parametrik tasarıma uygun olarak hazırlanmış ve statik/dinamik yükleme ile ön deneylere başlanmıştır.

Ön deneyler neticesinde üzerinde çalışılacak dört tip uç geometrisi seçilmiş ve statik çekme deneyi ve yorulma deneyleri ile başlanmıştır.

Tezde farklı parametrelerin değişik seviyeleri arasından optimum değeri elde etmeye dayalı parametrik bir yöntem olan Taguchi Metodu kullanılarak uygun deneysel tasarım sistematiği oluşturulmuştur. Deneysel veriler ışığında kompozit malzemelerde yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımı incelenmiştir.


3.1 Materyal

Kullanılan malzemeler tabakalı kalın kompozit olarak cam elyaf takviyeli örgü kumaş tipi malzemedir. Kompozit malzemede kullanılan epoksi reçine Polires 840 ve sertleştirici olarak Polidur 875 karıştırılarak 1,0/0,8 (epoksi/sertleştirici) oranlarında polimer matris malzemesi oluşturulmuştur.

Bağlantılarda yapıştırıcı olarak Tablo 3.1’de özellikleri verilen 9000 serisinden olan Loctite Hysol 9466 tip yapıştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 3.1: Deneyslerde kullanılan Loctite Hysol yapıştırıcının özellikleri.

Loctite Hysol 9466 Mekanik ve Fiziksel Özellikleri	
Çalışma/Sabitlenme Süreleri	60 min/180 min
Çekme Dayanımı	32 N/mm ²
Viskozite	35 Pa-s
Soyulma Dayanımı	8 N/mm
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-55°C - +120°C
Türü	2K Epoxy, Dolgu

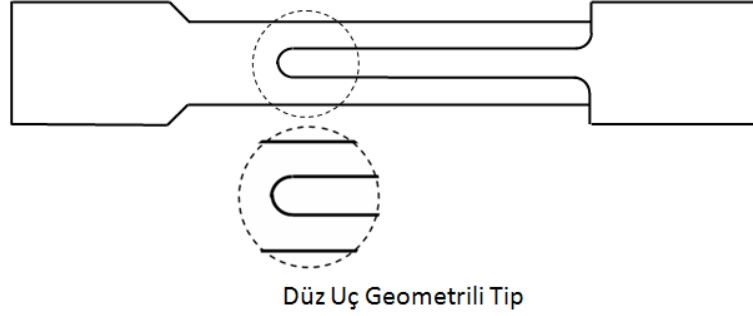


Tez için yapılacak dinamik yüklemeye yorulma deneylerinde kullanılmak üzere belirlenen dört tip deney numuneleri, dil/oluk bağlantı tekniği kullanılarak parametrik tasarıma uygun olarak hazırlanmış, mekanik ve fiziksel özellikleri verilen yapıştırıcı ile birleştirilerek kürlenme sonrası temizleme işlemleri sonrasında bağlantı parçası deneye hazır hale getirilmiştir

3.2 Yöntem ve Çalışma Planı

Şekil 3.2’de verilen uç profillerinden düz geometrili tip daha önce tez danışmanı tarafından çeşitli proje ve tez çalışmalarında statik ve dinamik olarak

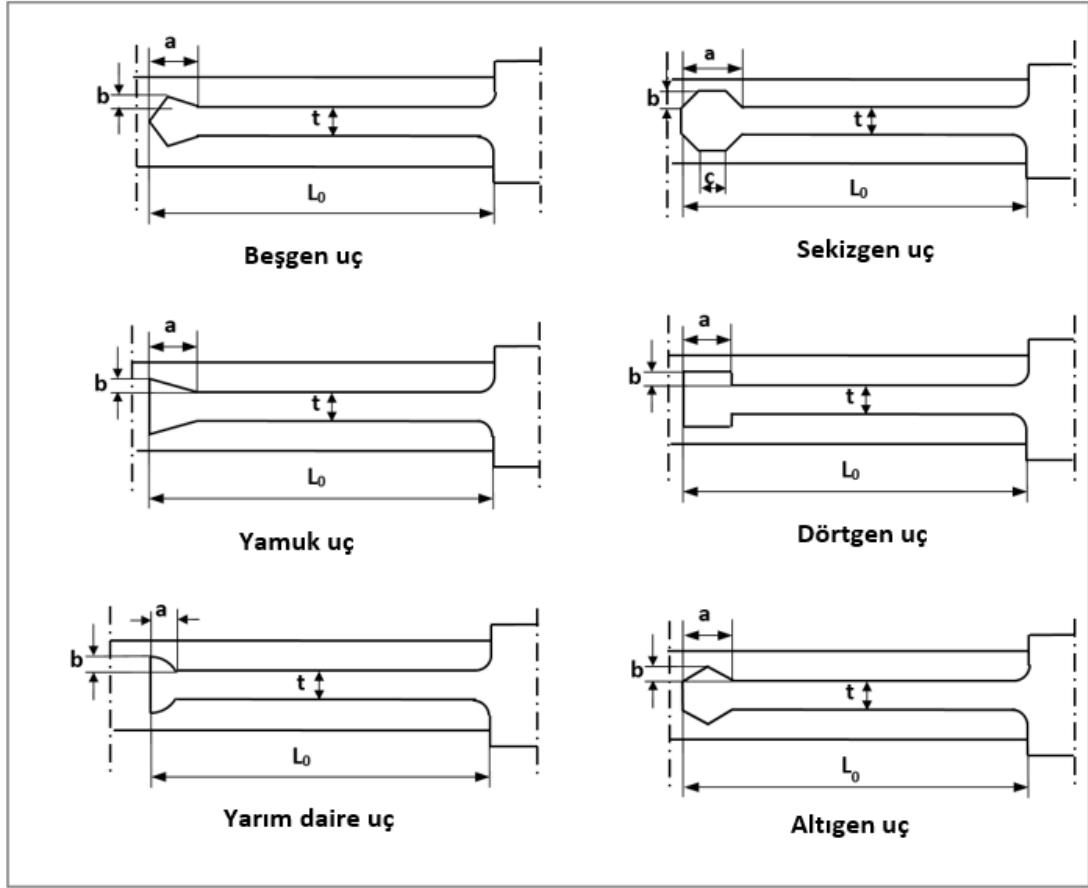
incelenmiş olup, yapılan tez çalışması ile yeni tasarlanan 4 tip uç profili ilk defa yorulma dayanımı kapsamında incelenmiştir.



Şekil 3.2: Düz uç profilinde Dil-Oluk numunesi

Başlangıç olarak dil-oluk numunesinin uç profili 6 farklı tipte tasarlanarak bu tasarımlara ait ön yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda incelenen ve çalışılabileceği öngörülen 6 tip arasından 4 tip dil uç profili seçilerek parametrik olarak deneylere devam edilmiştir. Her bir parametre için en az 3 deney yapılmıştır.

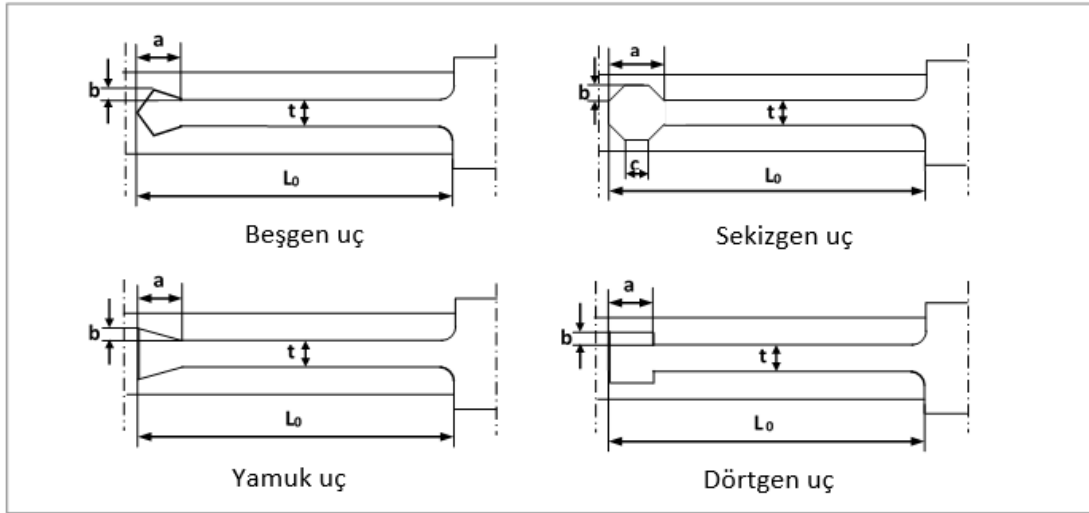
Çalışılacak numunelerin L_0 olarak gösterilen toplam dil uzunlukları ve t olarak gösterilen dil genişlikleri hepsinde eşit alınacak olup, dil bölgesinde tasarlanan uç profilleri için tırnak uzunluğu (a) ve tırnak genişliği (b) parametreleri belirlenmiştir. Tez çalışmasında planlanan 6 tip uç profili Şekil 3.3'te değişken parametreleri ile birlikte verilmiştir. Sekizgen uç tipi hariç parametreler tırnak uzunluğu, tırnak genişliğine bağlı olarak belirlenmiş, sekizgen tipte c parametresi sabit olarak 10 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.3: Ön deneylerde kullanılan 6 tip Dil/Oluk numunelerinin uç profilleri ve parametreleri

3.3 Tezde Kullanılan Dil ve Oluk Parametreleri



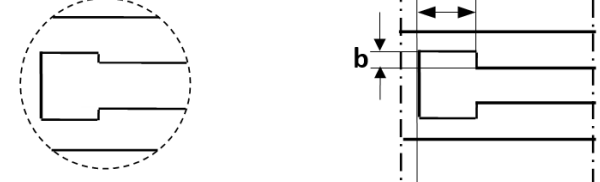
Ön deneyler sonucunda çalışılması planlanan dört tip uç geometrilerine ait parametreler belirlenmiş ve numuneler bu parametrelere uygun olarak üretilmiştir. Tasarlanan uç profilleri, geometrik yapılarına göre; **beşgen**, **sekizgen**, **yamuk** ve **dörtgen** olarak adlandırılmıştır. Şekil 3.3'te gösterilen yarım daire uç profili imalatının ve uygulanabilirliğinin zor olmasından dolayı ve altıgen uç profili ise sekizgen geometrili uç tasarımına çok yakın dayanım değerleri vermesinden dolayı bu iki tasarım çalışma kapsamından çıkarılmıştır. Tez kapsamında incelenmesine karar verilen dört tip tasarım Şekil 3.4'te gösterilmiştir.




Şekil 3.4: Deneysel olarak kullanılan 4 tip uç profil tasarımı ve parametreleri

Çalışılacak numunelerin L_0 olarak gösterilen toplam dil uzunlukları ve t olarak gösterilen dil genişlikleri hepsinde eşit alınmış olup, tasarlanan uç profilleri için uzunluk ve genişlik olarak değişken parametreler belirlenmiştir. Tasarlanan geometrilerin uç bölgesine ait a ve b parametreleri farklı her tip için aynı şekilde belirlenmiştir. Seçilen a parametresi dil uzunluğunun uç kısmında kalan baş bölgesi diye tabir ettiğimiz kısmın toplam boyunu, seçilen b parametresi ise baş bölgesindeki tırnakların sabit dil genişliğinden (t) tek bir yöne doğru ne kadar dışarı çıktığını ifade eder. Tanımlanan a ve b parametreleri her dört profil için belirlenmiş, ancak sekizgen uç için baş kısmının geometrisinden dolayı bir sabit üçüncü bir parametreye (c) ihtiyaç duyulmuştur. Tablo 3.2’de beşgen, yamuk ve dörtgen uç tipine ait parametreler (a ve b), Tablo 3.3’te sekizgen tipe ait parametreler verilmiştir.

Tablo 3.2: Beşgen, yamuk ve dörtgen tip için uç profilleri ve uygulanan parametreler

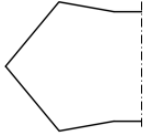
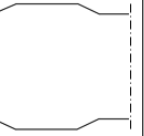
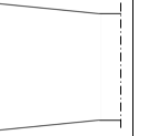
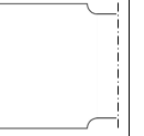
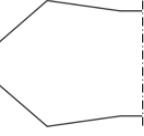

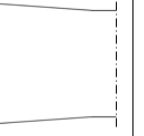
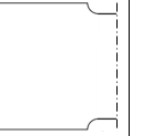
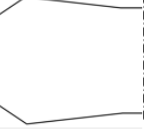
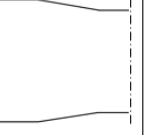
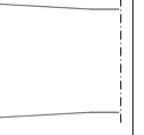
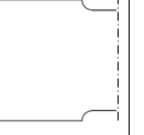
		Numune Grubu
Beşgen uç tipi		A Grubu
Yamuk uç tipi		B Grubu
Dörtgen uç tipi		C Grubu
Parametreler (P)	<p>P01: a=10 b=1 (numune A01, C01, D01) P02: a=10 b=2 (numune A02, C02, D02) P03: a=10 b=4 (numune A03, C03, D03) P04: a=14 b=1 (numune A04, C04, D04) P05: a=14 b=2 (numune A05, C05, D05) P06: a=14 b=4 (numune A06, C06, D06) P07: a=18 b=1 (numune A07, C07, D07) P08: a=18 b=2 (numune A08, C08, D08) P09: a=18 b=4 (numune A09, C09, D09)</p>	

Tablo 3.3: Sekizgen uç profili ve uygulanacak parametreler

		Numune Grubu
Sekizgen uç tipi		D Grubu
Parametreler (P)	<p>P01: a=10 b=1 c=6 (numune B01) P02: a=10 b=2 c=6 (numune B02) P03: a=10 b=4 c=6 (numune B03) P04: a=14 b=1 c=6 (numune B04) P05: a=14 b=2 c=6 (numune B05) P06: a=14 b=4 c=6 (numune B06) P07: a=18 b=1 c=6 (numune B07) P08: a=18 b=2 c=6 (numune B08) P09: a=18 b=4 c=6 (numune B09)</p>	

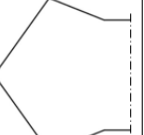
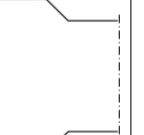
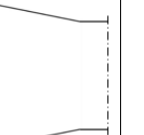
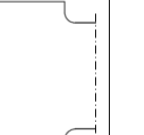
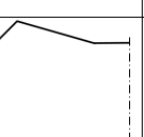
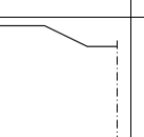
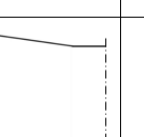
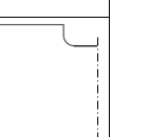
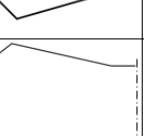
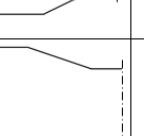

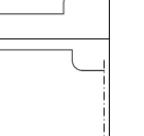
Belirlenen parametrelere göre seçilen geometriler karşılaştırmalı olarak gösterildiğinde, tırnak genişliği $b=1$ mm seçildiğinde tırnak uzunluğu $a=10$ mm, $a=14$ mm ve $a=18$ mm için karşılaştırmalı uç tasarımları Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Dört uç tasarımının $b=1$ mm için tırnak uzunluğuna (a) göre karşılaştırmalı geometrileri

$b=1$ mm için	Beşgen	Sekizgen	Yamuk	Dörtgen
$a=10$ mm				
$a=14$ mm				
$a=18$ mm				
				Ölçek: 4/3

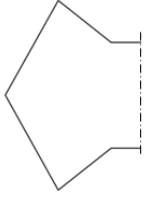

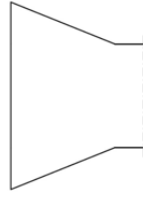
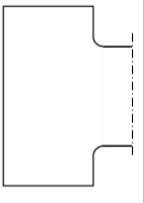
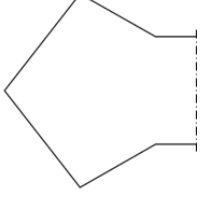
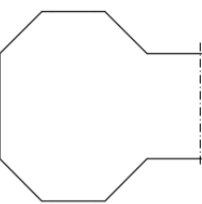
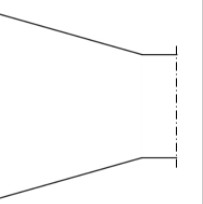
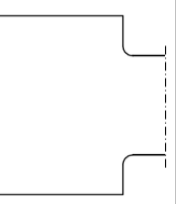
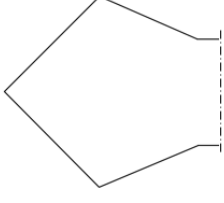
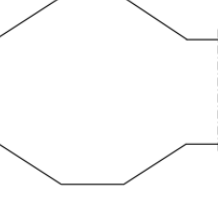
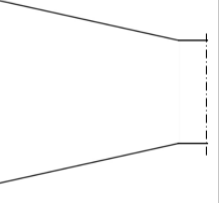
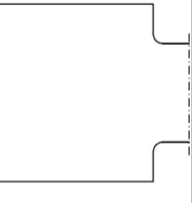
Tırnak genişliği $b=2$ mm seçildiğinde beşgen, sekizgen, yamuk ve dörtgen profillerin tırnak uzunluğuna göre karşılaştırmalı geometrileri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5: Dört uç tasarımının $b=2$ mm için tırnak uzunluğuna (a) göre karşılaştırmalı geometrileri

$b=2$ mm için	Beşgen	Sekizgen	Yamuk	Dörtgen
$a=10$ mm				
$a=14$ mm				
$a=18$ mm				
				Ölçek: 4/3

Beşgen, sekizgen, yamuk ve dörtgen uç tasarımları $b=4$ mm tırnak genişliği için $a=10$ mm, $a=14$ mm ve $a=18$ mm tırnak uzunluklarına göre incelendiğinde geometrik yapıları Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6: Dört uç tasarımının $b=4$ mm için tırnak uzunluğuna (a) göre karşılaştırmalı geometrileri

$b=4$ mm için	Beşgen	Sekizgen	Yamuk	Dörtgen
$a=10$ mm				
$a=14$ mm				
$a=18$ mm				

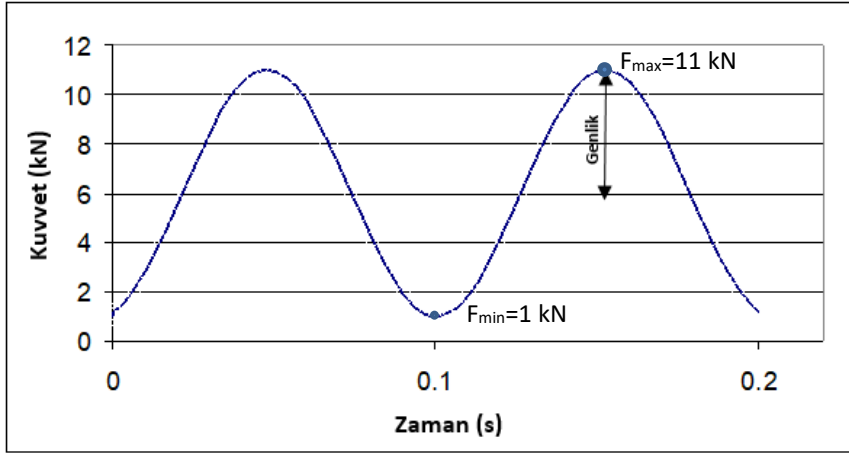
Ölçek: 4/3

Burada görüldüğü gibi toplamda 36 farklı profil ve uç tasarımı yapılmıştır. Parametrik deney tasarımı yapıldığından, tırnak uzunluğu, tırnak genişliği ve geometrik yapıya göre gruplanarak değerlendirmeler yapılmıştır.

3.4 Yorulma Deney Parametreleri

Deney cihazına girilmesi gereken değerlerin tespiti için yapılan ön statik deneylerde kopma mukavemeti belirlenmiş ve maksimum kopma mukavemetinin %60’i, ön yorulma deneylerinde maksimum yük olarak belirlenmiştir. Daha sonra beşgen uç tasarımı için S-N grafiği elde edilerek tırnak uzunluğu ve tırnak genişliği parametrelerin yorulma dayanımı etkilerini incelemek amacı ile optimum maksimum yük değeri belirlenmiştir. Minimum ve maksimum yük oranı $R=0,1$ olarak belirlenmiştir. Genlik değeri maksimum ve minimum kuvvetlerin farkının yarısına eşit

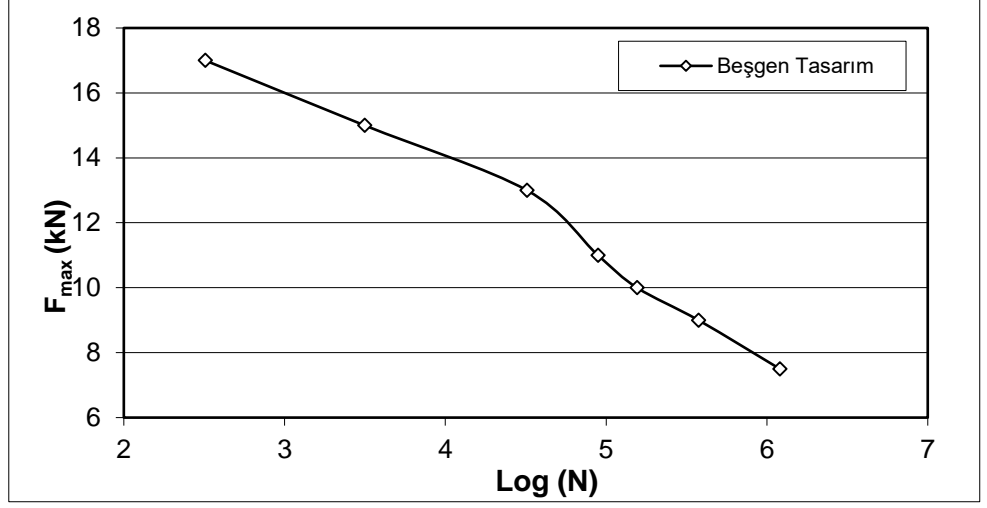
olan değerdir. Deneylerde F kuvveti t zamanı ifade etmek üzere Şekil 3.5'te gösterilen sinüsoidal dalga formu kullanılmıştır.



Şekil 3.5: Sinüsoidal kuvvet-zaman grafiğinde $F_{max}=11$ kN, $R=0,1$ için genlik değerinin gösterimi

Ön yorulma deneyleri tüm numunelere uygulanacak kuvvet ve frekans değerlerinin tespit edilmesi için yapıldığından ilk yapılan deneyde numunenin hasar durumu takip edilerek farklı yüklemeler yapılmıştır. Ön deneylerde en yüksek $F_{max}=18$ kN en düşük $F_{max}=7$ kN olmak üzere beşgen uç tasarımı üzerinde deneyler yapılmıştır. Ön yorulma deneylerinde yüksek kuvvetlerde malzemenin düşük yorulma tekrarlarında hasar aldığı görülmüş buna karşılık F_{max} değeri 7 kN alındığında yorulma tekrarının bir milyonu aşmasıyla deneyler durdurulmuş ve hasar gerçekleşmediği görülmüştür.

Beşgen tasarım için S-N grafiği Şekil 3.6'de gösterilmiştir. Grafik incelenerek tırnak uzunluğu ve tırnak genişliği parametrelerinin yorulma dayanımı üzerine etkisini incelemek için ideal maksimum yorulma kuvvet değeri $F_{max}=11$ kN olarak tespit edilerek tüm tipler için kullanılmıştır.

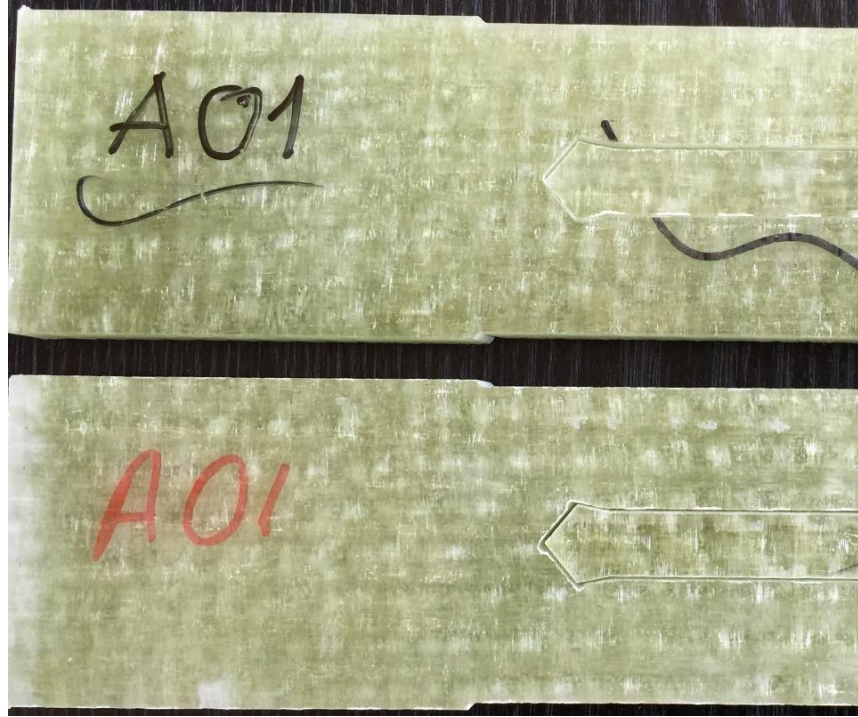


Şekil 3.6: Beşgen tasarımının P02 parametresine göre F_{max} -Log (N) grafiği

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME

Çekme basma (dinamik yüklemeye yorulma) deneyleri için kullanılacak yükleme değerlerini (yükleme periyodunu, seçilen kuvvet değerlerini), uç geometrilerinin ve parametrelerin uygunluğunu tespit etmek için ön dinamik deneyler yapılmıştır.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, çalışmalarda en az 3 deney yapılacak şekilde numuneler hazırlanmış, sonrasında dinamik yüklemeye yorulma deneyi için uygun yük değerlerini bulana kadar 4 farklı numune üzerinde yükleme yapılmıştır.

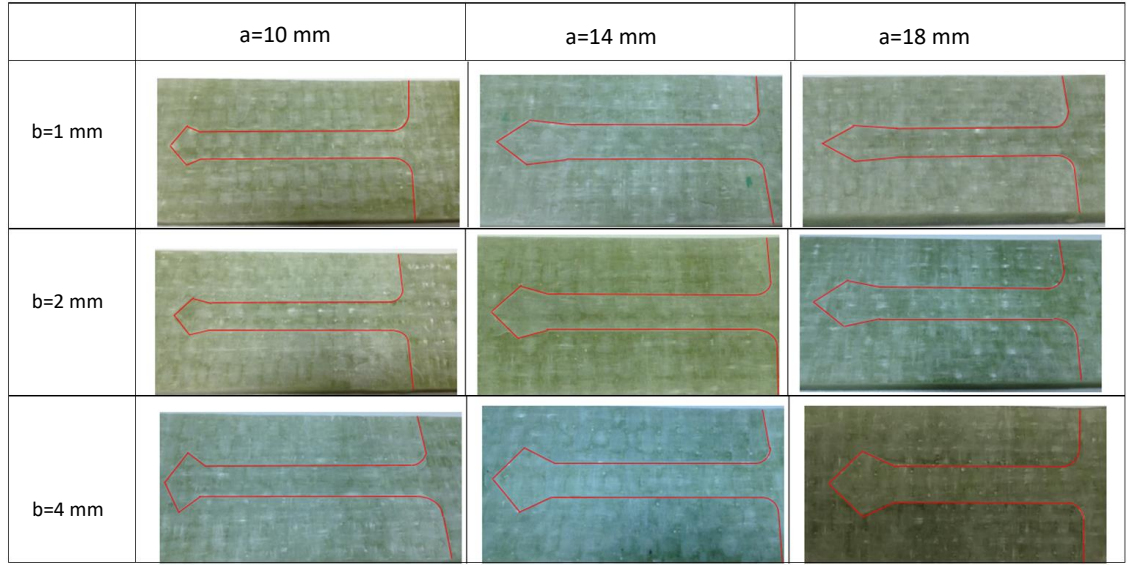


Şekil 4.1: Beşgen tip uç profili için yapıştırma öncesi P01 numune örnekleri

4.1 Kullanılacak Deney Numuneleri ve Hazırlanması

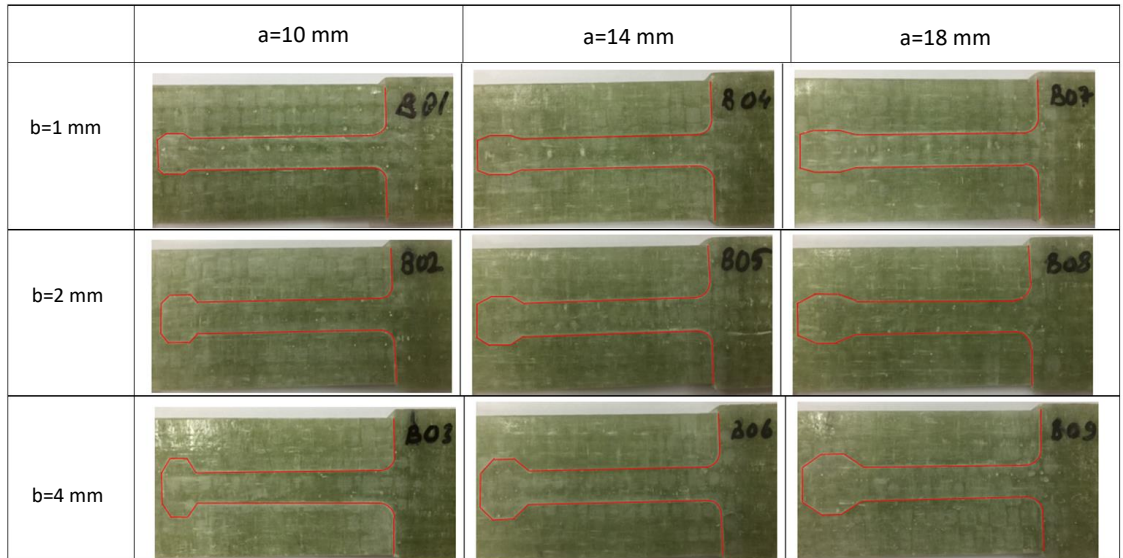
Yorulma deneyleri için her tipten 9 parametrede Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te görülen numuneler hazırlanmış ve uç geometrisinin en dar olduğu P01 parametreleri ile yorulma deneylerine başlanmıştır.

Şekil 4.2’de beşgen tip için hazırlanan deney numunelerinin 9 parametresi için yapıştırılmış halde görüntüleri verilmiştir.



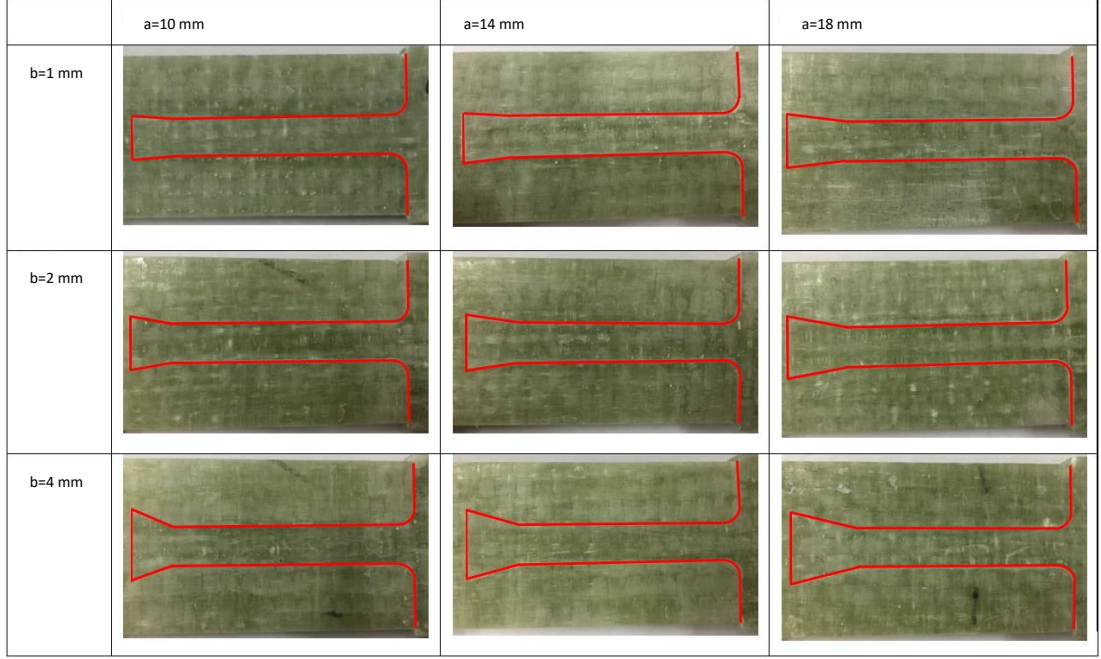
Şekil 4.2: Beşgen uç profilinde belirlenen 9 parametreye ait numunelerin yapıştırılmış uç görüntüleri

Şekil 4.3’te Sekizgen tip için hazırlanan 9 farklı parametredeki numunelerin yapışmış hali görülmektedir.



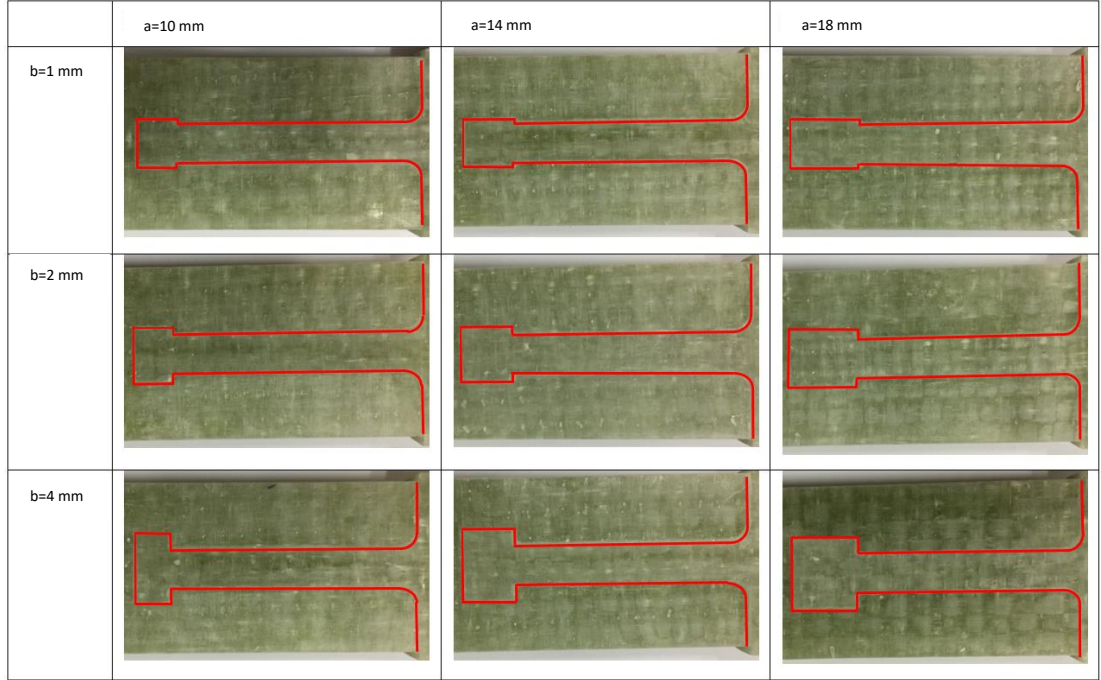
Şekil 4.3: Sekizgen uç profilinde belirlenen 9 parametreye ait numunelerin yapıştırılmış uç görüntüleri

Şekil 4.4’te deneyi yapılan numunelerden C grubu olarak incelenen yamuk tip uç için hazırlanan her 9 parametreye ait numuneler yapışmış halde görülmektedir.



Şekil 4.4: Yamuk uç profilinde belirlenen 9 parametreye ait numunelerin yapıştırılmış uç görüntüleri

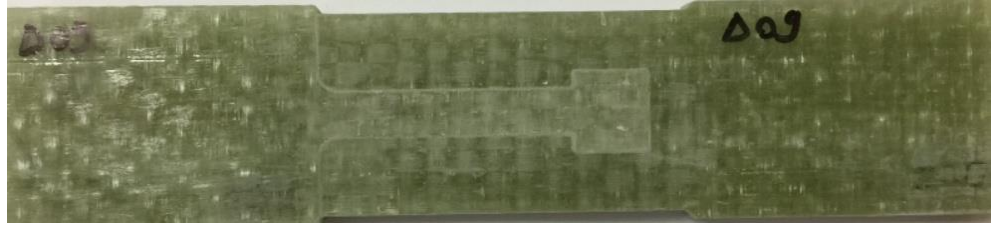
Şekil 4.5'te D grubu olarak adlandırdığımız dörtgen tip için hazırlanan 9 farklı parametredeki numunelerin deney öncesi yapışmış hali görülmektedir.



Şekil 4.5: Dörtgen uç profilinde belirlenen 9 parametreye ait numunelerin yapıştırılmış uç görüntüleri

Deney numuneleri hizmet alımı yapılarak özel bir firmada su jeti ile kestirilmiş dil genişlikleri sabit tutulmuş oluk genişliği ise optimum yapıştırıcı kalınlığı 0,2 mm (Canyurt 2010, Canyurt 2012) olacak şekilde kesilmiştir. Uygun boşlukla tasarlanmış bu numuneler, Loctite Hysol 9466 yapıştırıcı ile birleştirilmiş, kurlenmesi sağlanmış ve yapıştırıcı fazlalıkları temizlenerek numuneler deneye hazırlanmıştır.

Şekil 4.6’da dörtgen tipe ait bir deney numunesinin yapıştırılmış hali görülmektedir.



Şekil 4.6: Dörtgen geometrisinden P09 parametrelerine ait numunenin deney öncesi yapıştırılmış hali

Dinamik deneylerin yanında, yorulma deneyinde uygulanacak en yüksek değeri öngörebilmek için statik deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde elde edilen kopma dayanımı dinamik ön yorulma deneyleri için kullanılacak maksimum kuvvetin alt sınırını belirlemede yardımcı olmuştur.

4.2 Yorulma Deneylerinin Yapılması

Öncelikle deney numunesi dil ve oluk profilleri arasında bırakılan boşluğun yapıştırıcı ile doldurulması ve fazlalıkların temizlenmesi ile yapıştırma işlemi tamamlanarak deneye hazır hale getirilmiştir. Numune deney cihazının çeneleri arasına yerleştirilmiş, dil parçasının alt çeneye tutturulması şeklinde sabitlenmiştir. Ayrıca harici bir sabitleme aracına gerek duyulmamıştır. Deney cihazındaki yerleşimi, deney esnasında Şekil 4.7’deki gibi görüntülenmiştir.



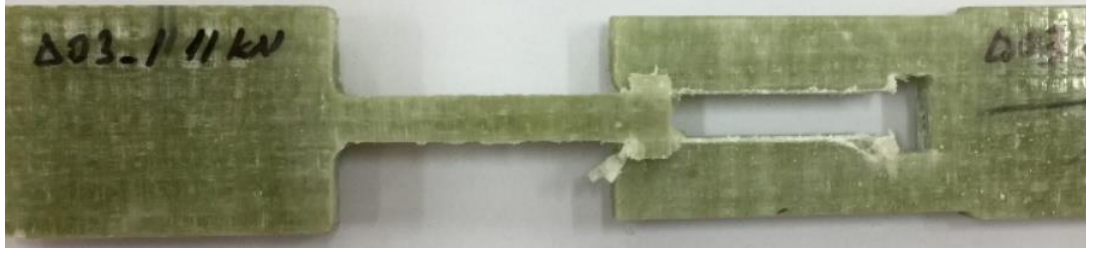
Şekil 4.7: Deney cihazında yapıştırıcı bağlantısı ayrılmış dörtgen uç profilinde numune örneği

Ön deneyler ve beşgen uç tasarımı için elde edilen Şekil 3.6 dikkate alınarak deney cihazına girilmesi gerekli parametreler Tablo 4.1'deki gibi belirlenmiş ve Instron 8801 Statik – Dinamik Test cihazına, yorulma deneyi için gerekli olan maksimum Kuvvet, Genlik ve Frekans değerleri girilerek deneyler tamamlanmıştır.

Tablo 4. 1: Ön deneyler sonucunda tespit edilen optimum kuvvete göre deney cihazına girilen değerler

	R	Frekans (Hz)	F_{max} (kN)	F_{min} (kN)	F_{ort} (kN)	Genlik (kN)
Optimum	0,1	10	11,00	1,10	6,05	4,95

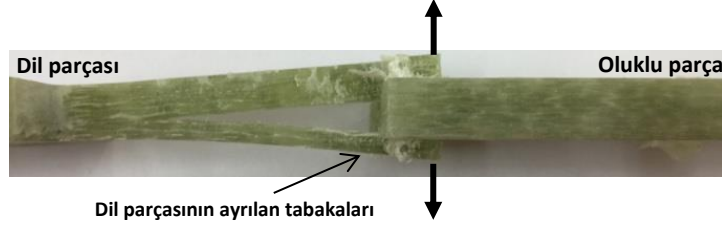
Uygulanan bu yüklemeler sonucunda yorulma deney numuneleri yapıştırıcıdan ayrılarak hasara uğramıştır. Şekil 4.8'de P03 parametrelerine sahip (b parametresinin en büyük olduğu) bir yorulma deneyi numunesinin oluk kısmından çıkan dil parçasının kafa kısmının kopma esnasında tabakalara ayrılmış hali görülmektedir.



(Kopan numune üst görünüş)



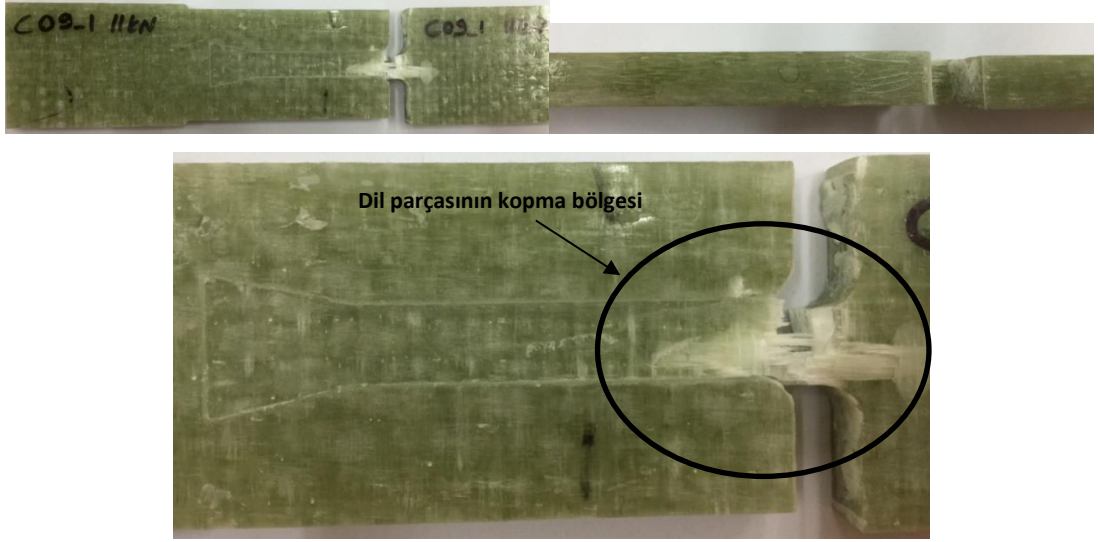
(Kopan yapıştırma bölgesi üst görünüş)



(Kopan yapıştırma bölgesi yan görünüş)

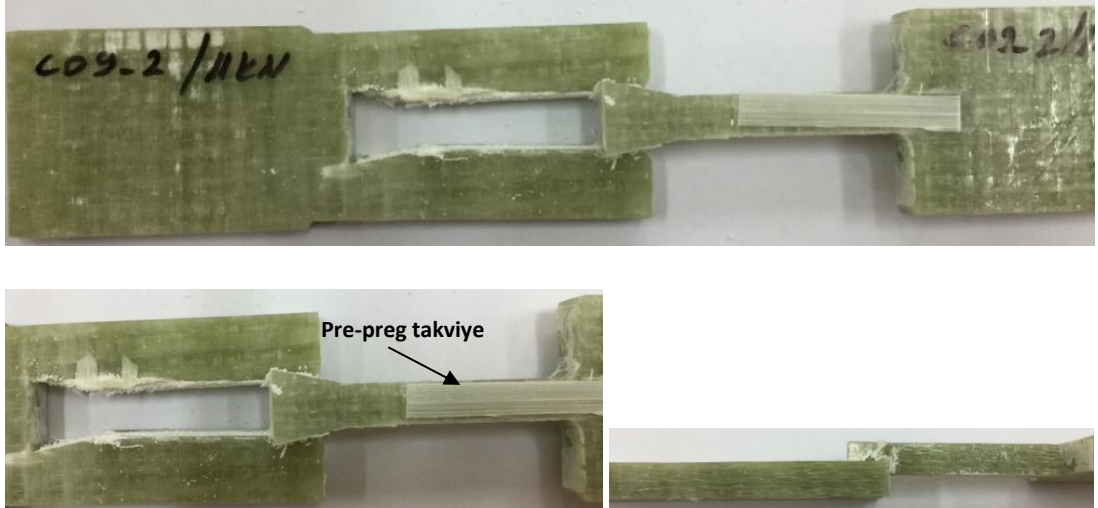
Şekil 4.8: Yorulma deneyinde koparılan yapıştırma bağlantısında dil parçası tabakalara ayrılan numune

Yamuk tip geometri kullanıldığında kopma bölgesinde değişim gözlenmiştir. Kopmanın yapışma bölgesi yerine ana dil malzemesinde olduğu görülmüştür. Şekil 4.9'da dil bölgesinden kopan hasarlı numune görülmektedir.



Şekil 4.9: Yamuk tip geometride yorulma deneyi esnasında dil bölgesinden kopan numune

Tez kapsamında yapışma geometrisine ait dayanım incelendiği için bu deney grubunda, dil bölgesi üzerine takviyeli doğrusal pre-preg (önceden reçine emdirilmiş karbon, cam ya da aramid elyaf) cam elyaf yapıştırılarak dil bölgesi üzerindeki hasar oluşumu önlenerek deneyler yapılmıştır. Bu şekildeki hasar bölgesi dilden yapışma bölgesine kaydırılmıştır. Şekil 4.10'da dil bölgesi güçlendirilerek, planlandığı şekilde yapışma bağlantısından hasara uğramış numune gösterilmiştir.

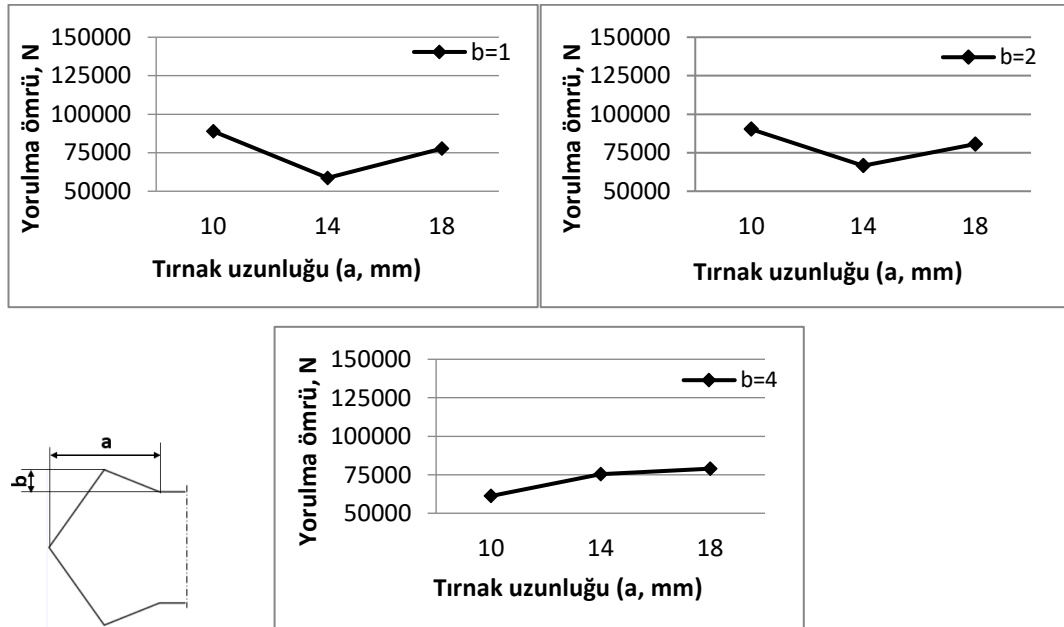


Şekil 4.10: Yamuk tip geometride dil bölgesi Pre-preg cam elyafı ile güçlendirilmiş numune

4.3 Yorulma Deneylerinin Değerlendirmesi

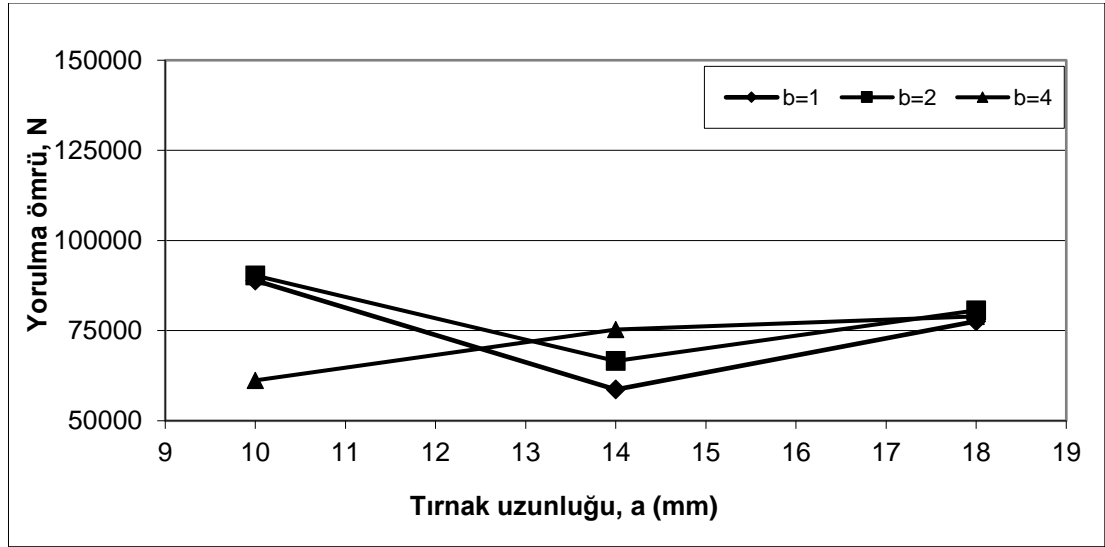
4.3.1 Tüm Tipler için Yorulma Değerleri

Şekil 4.11'de beşgen tip bağlantıda tırnak genişliği $b=1$ mm, $b=2$ mm ve $b=4$ mm parametreleri için tırnak uzunluğu (a) değerinin yorulma dayanımına etkileri grafiklere yansıtılmıştır. Her bir a değeri için grafikler ayrı ayrı elde edilmiştir. Tırnak genişliği $b=1$ mm ve $b=2$ mm için tırnak uzunluğu değerinin en küçük olduğu $a=10$ mm'de bu uç tasarımı birbirine yakın ve yüksek yorulma ömrüne sahiptir. Tırnak genişliği $b=4$ mm'ye çıktığında ise yorulma ömrü düşmüştür. Burada dil parçasının uç bölgesinde, tırnak uzunluğun en düşük tırnak genişliğinin en yüksek parametresi olması sebebiyle tırnakların yük altında ezilerek oluk içinden dilin sıyrılarak ayrılmasına sebep olduğu ve yorulma ömrünün düştüğü görülmüştür. Tırnak uzunluğu değerini 14 mm'ye getirildiğinde, tırnak genişliği $b=1$ mm ve $b=2$ mm için yorulma ömrü düşerken $b=4$ mm için yükselmiş ve her üç b değeri için birbirine yakın yorulma ömürleri elde edilmiştir. Tırnak uzunluğu değerini 18 mm'ye çıkarıldığında yapışma yüzeyinin artmasından dolayı tüm numunelerde yorulma ömrü artmıştır.



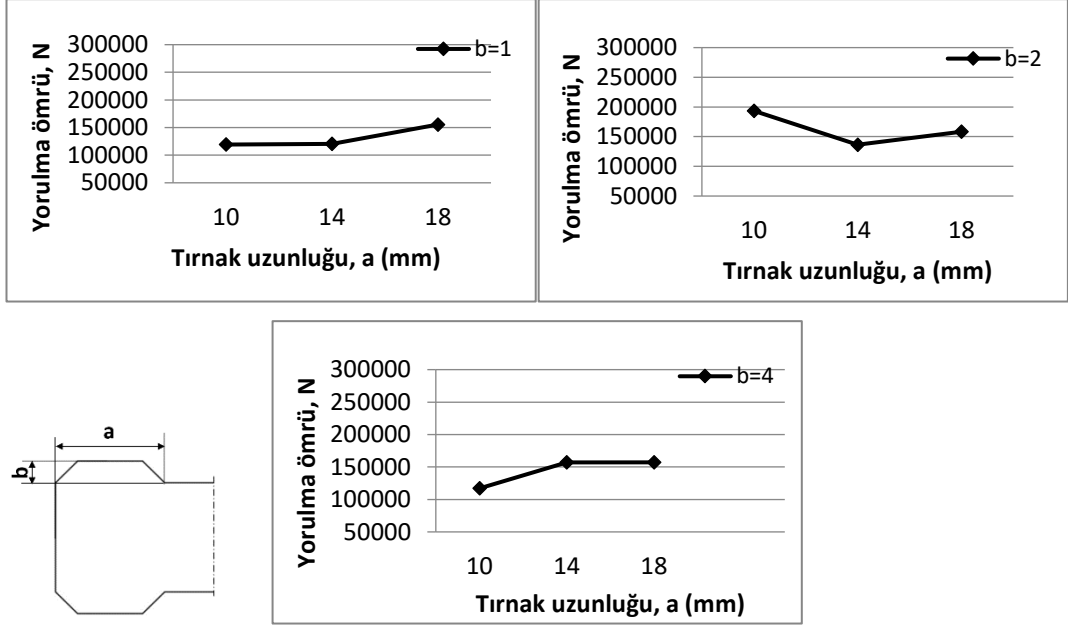
Şekil 4.11: Beşgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü grafikleri

Şekil 4.12'de beşgen tip için $b=1$ mm, $b=2$ mm ve $b=4$ mm için tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü değişimlerinin grafik olarak karşılaştırması yapılmış, en düşük yorulma dayanımı $b=1$ mm için elde edilmiştir. En küçük tırnak uzunluğu $a=10$ mm değeri için tırnak genişliğinin de küçük olmasının yorulma ömrüne olumlu etki ettiği görülmüştür. Tırnak uzunluğu $a=18$ mm'ye getirildiğinde yorulma ömürlerinin birbirine yakın değerler vermesi, ömür değerinin tırnak genişliğiyle değişmediğini tırnak uzunluğunun bu geometri için daha etkili olduğunu göstermiştir.



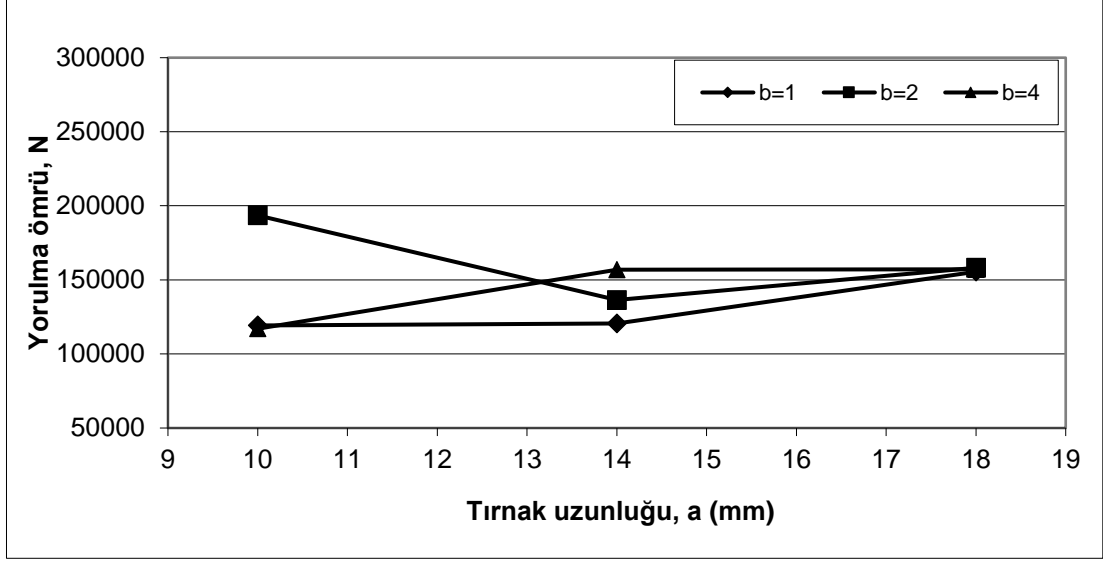
Şekil 4.12: Beşgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre N yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.13'te sekizgen tip için $b=1$ mm, $b=2$ mm ve $b=4$ mm parametrelerinde a 'ya göre N grafikleri ayrı olarak verilmiştir. Sekizgen uç tasarımı için tırnak uzunluğu $a=10$ mm'de tırnak genişliği $b=2$ mm yüksek dayanım göstermiştir. Tırnak uzunluğu 14 mm'ye çıkarıldığında yorulma değeri $b=1$ mm için pek değişim göstermemiş, $b=2$ mm için düşmüş ve $b=4$ mm için yükselmiştir. Tırnak uzunluğu 18 mm'de tüm tırnak genişliği değerlerinde yorulma dayanımı birbirine yakın değerler vermiştir.



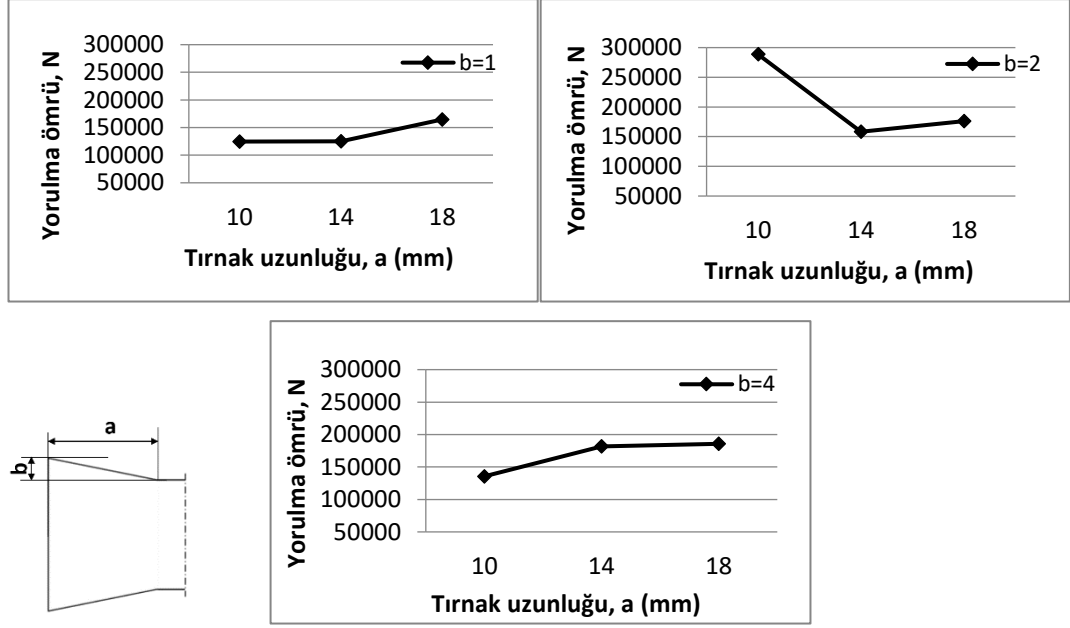
Şekil 4.13: Sekizgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü grafikleri

Sekizgen tip için $b=1$ mm, $b=2$ mm ve $b=4$ mm parametrelerinde a 'ya göre N grafikleri Şekil 4.14'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tırnak genişliği $b=1$ mm tüm tırnak uzunluğu değerleri için en düşük yorulma dayanımına sahiptir. Tırnak genişliği 2 mm ve tırnak uzunluğu 10 mm seçildiğinde sekizgen bağlantı tasarımının en yüksek dayanım gösterdiği belirlenmiştir. Bu geometride P02 parametre setinin en güçlü yorulma dayanımını verdiği görülmektedir. Bu uç tasarımında tırnak uzunluğu $a=18$ mm seçildiğinde tırnak uzunluğunun tırnak genişliğinden daha etkili bir parametre olduğu görülmüştür.



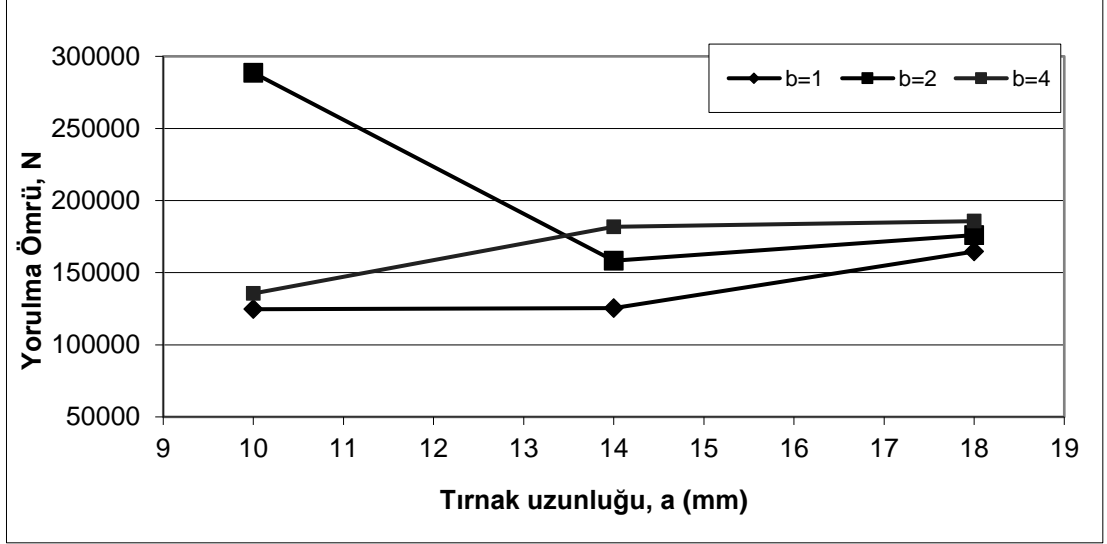
Şekil 4.14: Sekizgen tip için tırnak genişliği b=1, b=2 ve b=4 değerlerinin tırnak uzunluğuna göre N yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması

Yamuk tip bağlantı için b=1 mm, b=2 mm ve b=4 mm parametreleri için a değerinin yorulma dayanımına etkileri Şekil 4.15'de grafiklerde gösterilmiştir. Her bir tırnak uzunluğu değeri için grafikler ayrı ayrı elde edilmiştir. Yamuk bağlantı tasarımında yorulma ömürleri, b=1 mm ve b=4 mm tırnak genişliği için a=10 ve a=18 mm değerlerinde çok yakın ve a=14 mm'de de yaklaşık yorulma değerleri verirken, b=2 mm tırnak genişliğinde a=10 mm tırnak uzunluğu için diğer parametrelerden çok yüksek bir yorulma ömrü göstermiştir.



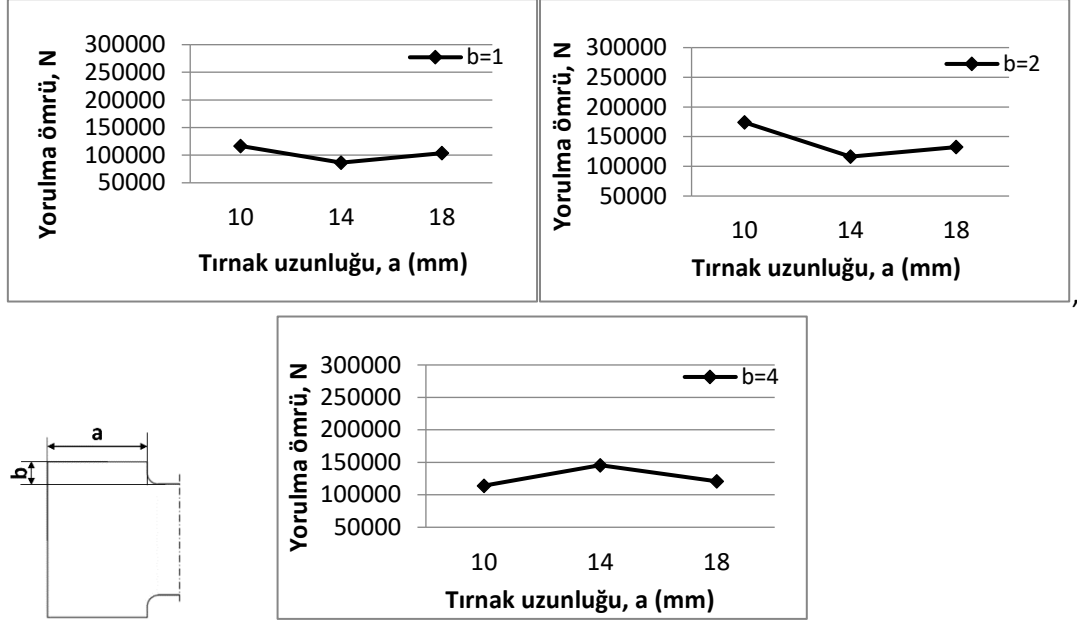
Şekil 4.15: Yamuk tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü grafikleri

Şekil 4.16'da yamuk tip için $b=1$ mm, $b=2$ mm ve $b=4$ mm için a 'ya göre yorulma ömrü değişimlerinin grafik olarak karşılaştırması yapılmış $b=1$ mm için elde edilen yorulma değerlerinin en düşük değerler olduğu görülmüştür. Tırnak uzunluğu $a=10$ mm, tırnak genişliği $b=1$ mm alındığında çeki-bası yüküne karşı yetersiz geldiğinden, $b=4$ mm alındığında ise dil parçasındaki tırnak yapısının geometrisinden dolayı katmanlar arası açılma ve ezilme oluşarak oluk içerisinden çıkmasıyla daha az yorulma dayanımı göstermişlerdir. En yüksek ömre sahip P02 parametresi ($a=10$ mm, $b=2$ mm) diğer tırnak genişliği değerlerinin 2 katından fazla yorulma ömrü göstermiştir. Tırnak uzunluğu 14 mm'ye çıkarıldığında, $b=1$ mm tırnak genişliğine sahip numune pek değişim göstermemiş $b=2$ mm tırnak genişliğine sahip numunenin yorulma ömrü değeri düşmüş ve $b=4$ mm tırnak genişliğine sahip numune artarak yorulma değerleri birbirine yaklaşmıştır. Tırnak uzunluğu 18 mm'ye çıkıldığında ise yorulma ömrü değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir.



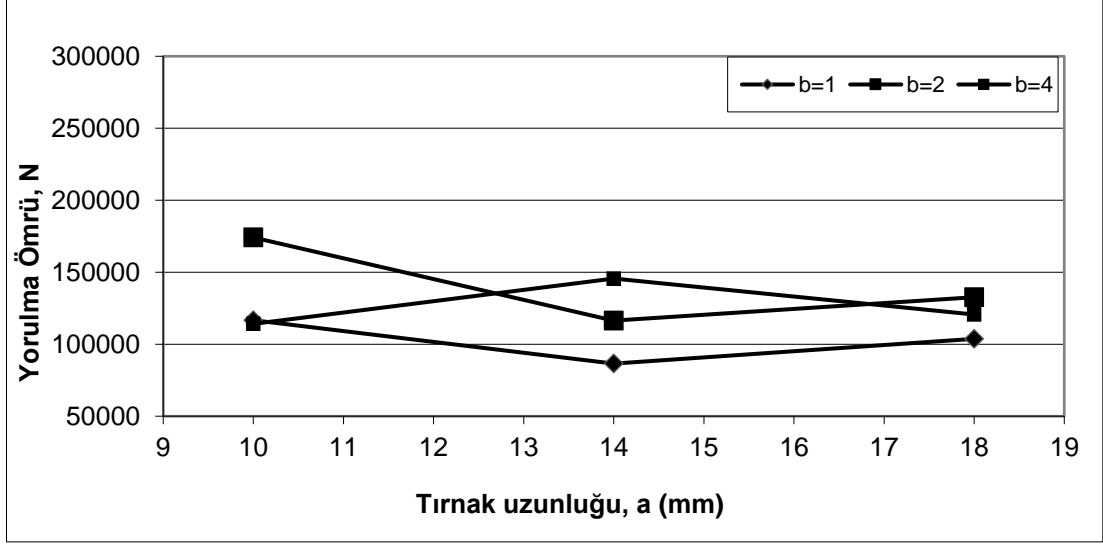
Şekil 4.16: Yamuk tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre N yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması

Dörtgen tip bağlantı için tırnak genişliği $b=1$ mm, $b=2$ mm ve $b=4$ mm için yorulma ömrü grafikleri Şekil 4.17’de sunulmuştur. Dörtgen bağlantı tasarımı uygulandığında tırnak uzunluğu 10 mm seçildiğinde, tırnak genişliği $b=1$ mm ve $b=4$ mm değerinde yaklaşık aynı yorulma değerleri, $b=2$ mm’de ise en yüksek yorulma dayanımı görülmektedir. Tırnak genişliği $b=2$ mm için tırnak uzunluğu 14 mm değerine gelindiğinde ömürde düşme, 18 mm değerine çıkıldığında önemli bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Tırnak genişliği $b=1$ mm $b=4$ mm için ise a değeri 14 mm’ye ve 18mm’ye çıkıldığında yorulma ömrü artmıştır.



Şekil 4.17: Dörtgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre yorulma ömrü grafikleri

Şekil 4.18’de dörtgen tip için $b=1$ mm, $b=2$ mm ve $b=4$ mm parametrelerinde a 'ya göre yorulma ömrü, N grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tırnak uzunluğu 10 mm için $b=2$ mm parametresinde en yüksek değer gözlenmiştir. Dörtgen bağlantı tipinde tüm tırnak genişlik değerleri için tırnak uzunlukları 14 mm ve 18 mm değerleri seçildiğinde yakın yorulma ömrü değerleri elde edilmiştir. Dörtgen uç tasarımında tırnak genişliği $b=1$ mm olarak uygulandığında, tırnak uzunluğu boyunca yapıştırma bölgesi hasara uğramış ve tırnak yapısından dolayı mekanik olarak dayanım gözlenmiştir. Daha sonra dil uç bölgesinde açılma gerilmeleri sebebi ile katmanlar arası sıyrılma oluşarak bağlantıda bozulma ve sonucunda düşük yorulma dayanımı göstermiştir.

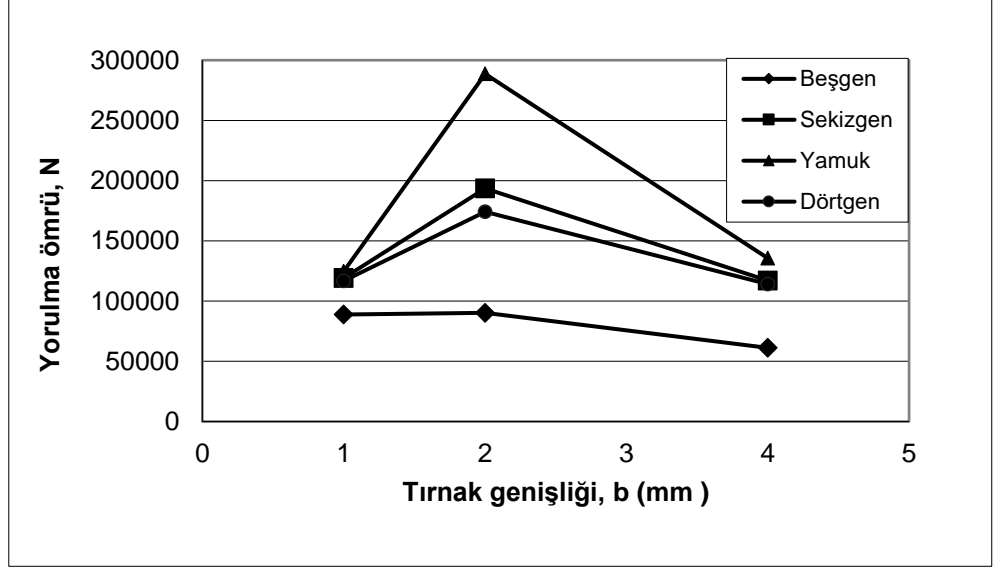


Şekil 4.18: Dörtgen tip için tırnak genişliği $b=1$, $b=2$ ve $b=4$ değerlerinin tırnak uzunluğuna göre N yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması

4.3.2 Önerilen 4 Tip Tasarım İçin Yorulma Değerlerinin Karşılaştırılması

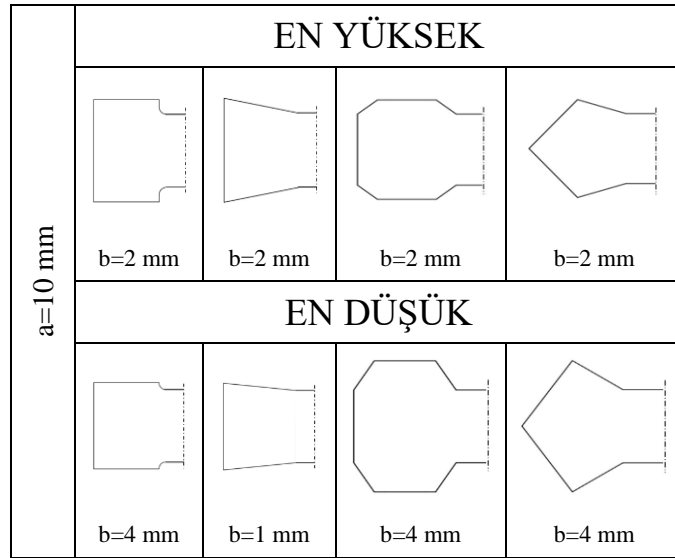
Dörtgen, yamuk, beşgen ve sekizgen dil bölgesi tasarım uygulandığında yorulma ömrü değişiminin $a=10$ mm için tırnak genişliğine bağlı olarak değişimi karşılaştırmalı olarak Şekil 4.19'da verilmiştir. Tırnak uzunluğu 10 mm için, tırnak genişliği 1 mm'den 2 mm'ye çıkarıldığında tüm tasarımlar için yorulma dayanımında yükselme, 4 mm'ye çıkarıldığında ise dayanımında düşme gözlemlenmiştir. Oluşan düşüş sebebinin tırnak uzunluğu değeri küçük seçildiğinde, tırnak genişliğinin artması ile tırnağın zayıfladığı, deneylerde önce dil ucundaki tırnak yapısının ezilerek oluktan sıyrılarak çıkması olduğu düşünülmektedir. Yamuk bağlantı tasarımı tırnak genişliği 2 mm için en yüksek yorulma dayanımı göstermiştir.

Yamuk, sekizgen ve dörtgen uç tasarımlı bağlantılar uygulandığında tırnak genişliği $b=1$ mm ve $b=4$ mm için yaklaşık aynı yorulma değerlerini vermiştir. Tırnak genişliğinin değişimi incelendiğinde tüm bağlantı tasarımları arasında yamuk tip bağlantı tasarımının en iyi ve beşgen tip bağlantı tasarımının en zayıf yorulma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Sekizgen ve dörtgen tip bağlantılar birbirine yakın yorulma dayanımı sergilemesine rağmen, sekizgen tasarımın dörtgen tasarıma göre bir miktar daha güçlü bir yapıya sahip olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4.19: Yorulma ömrü değerlerinin bağlantı tasarımına göre karşılaştırması, a=10mm

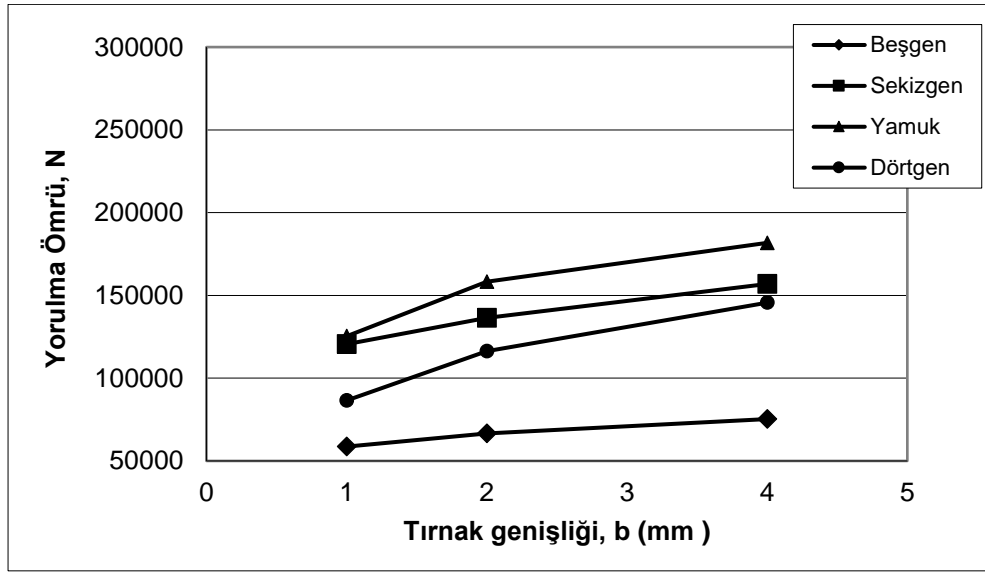
Dört tip bağlantı tipi için tırnak genişliği 2 mm seçildiğinde yorulma dayanımın yüksek diğer tırnak genişliklerinde düştüğü görülmektedir. Beşgen/sekizgen tasarımlarda tırnak genişliği 4 mm, yamuk/dörtgen tasarımlarda içinse tırnak genişliği 1mm olarak alındığında en düşük yorulma dayanımı değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.20'de tırnak uzunluğu 10 mm için maksimum ve minimum dayanıma sahip uç tasarımlarının geometrileri verilmiştir.



Şekil 4.20: Tırnak uzunluğu 10 mm için en yüksek ve en düşük yorulma dayanımına sahip tasarım geometrileri

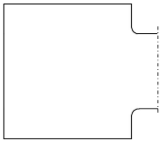
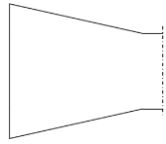
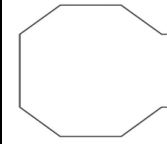
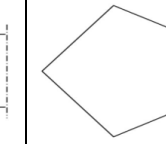
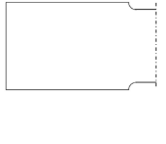
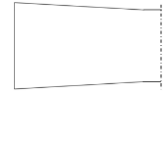
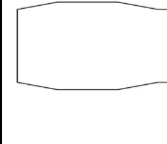
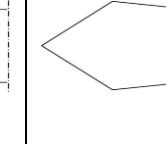
Şekil 4.21’de $a=14$ mm için dört deney grubunun b parametrelerine göre N yorulma değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. Tırnak uzunluğu 14 mm için, tırnak genişliği 1 mm den 2 mm çıkarıldığında tüm bağlantı tasarımları için yorulma dayanımında yükselme, tırnak genişliği 4 mm getirildiğinde ise dayanımında artmanın devam ettiği gözlemlenmiştir.

Parametre b ’nin tüm değerlerinde yamuk tasarımlı bağlantı en iyi ve beşgen tasarımlı bağlantı en zayıf yorulma dayanım özelliği göstermiştir.



Şekil 4.21: Yorulma ömrü değerlerinin bağlantı tasarımına göre karşılaştırması, $a=14$ mm

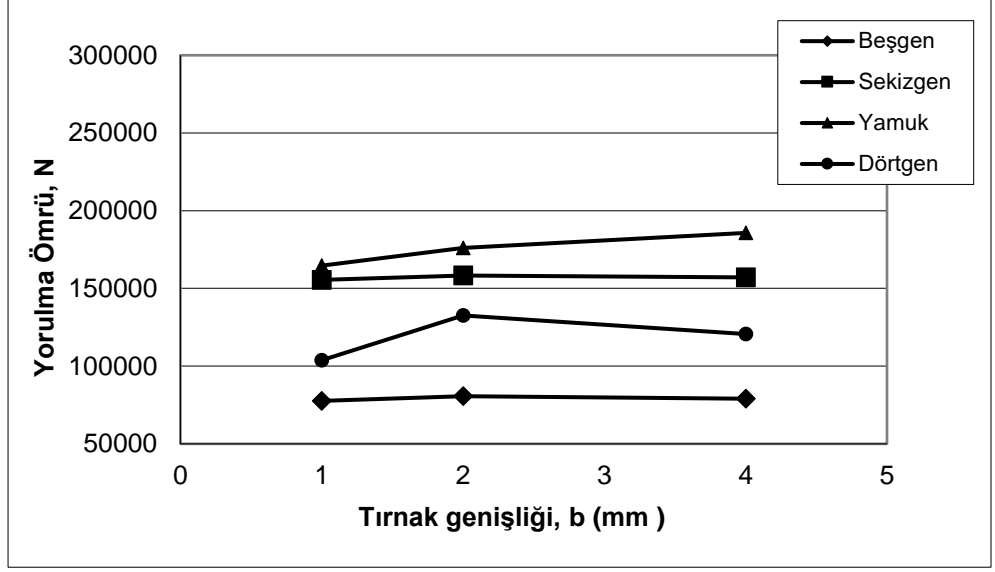
Tırnak uzunluğu 14 mm için en yüksek ve en düşük yorulma dayanımına sahip tasarım geometrileri Şekil 4.22’de verilmiştir. Tırnak uzunluğu 14 mm için beşgen/sekizgen/yamuk/dikdörtgen tasarımlarda tırnak genişliği 4 mm değerinde en yüksek yorulma dayanımı 1 mm değerinde ise en düşük yorulma dayanımı görülmüştür. Tırnak genişliği 1 mm değerinde bağlantının mekanik olarak kilitlenmediği yorulma etkisi ile bağlantının sıyrılmasından dolayı dayanımın düştüğü belirlenmiştir.

$a=10$ mm	EN YÜKSEK			
				
	$b=4$ mm	$b=4$ mm	$b=4$ mm	$b=4$ mm
	EN DÜŞÜK			
				
	$b=1$ mm	$b=1$ mm	$b=1$ mm	$b=1$ mm

Şekil 4.22: Tırnak uzunluğu 14 mm için en yüksek ve en düşük yorulma dayanımına sahip tasarım geometrileri

Şekil 4.23’de tırnak uzunluğu 18 mm için dört uç bölgesi tasarımının tırnak genişliği parametresine göre N yorulma değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. Tırnak genişliği 1 mm den 2 mm’ye çıktığında dörtgen tip için yorulma dayanımında yükselme, 4 mm’ye çıkarıldığında ise dörtgen tipte düşme olduğu, sekizgen ve beşgen tipte fazla değişim olmadığı ve yamuk tipte ise yorulma dayanımında artmanın devam ettiği gözlemlenmiştir.

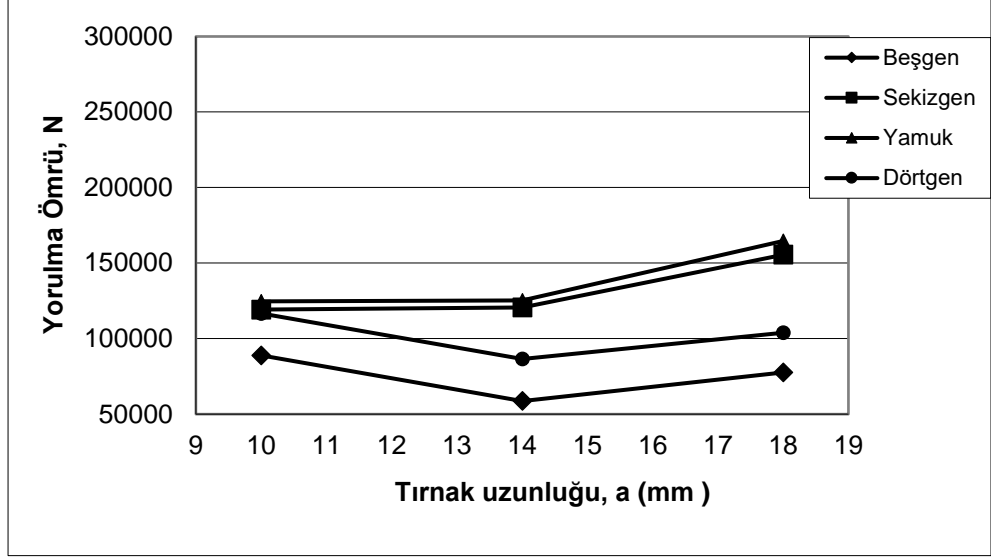
Parametre b’nin tüm değerlerinde yamuk uç tasarımı en iyi ve beşgen uç tasarımı en zayıf dayanım özelliği göstermiştir. Tırnak uzunluğu 18 mm için sekizgen ve beşgen tasarımlarda, tırnak genişliği (b) değerlerinin değişimi yorulma dayanımı üzerinde önemli bir etki oluşturmamıştır. Genel olarak tırnak uzunluğu ve tırnak genişliği parametreleri incelendiğinde tırnak uzunluğu (a) parametresinin yorulma ömrü üzerinde daha etkili olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4.23: Yorulma ömrü değerlerinin bağlantı tasarımına göre karşılaştırması, a=18 mm

Tüm tasarımlar ve deney sonuçları incelendiğinde yamuk tip tasarımların en yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

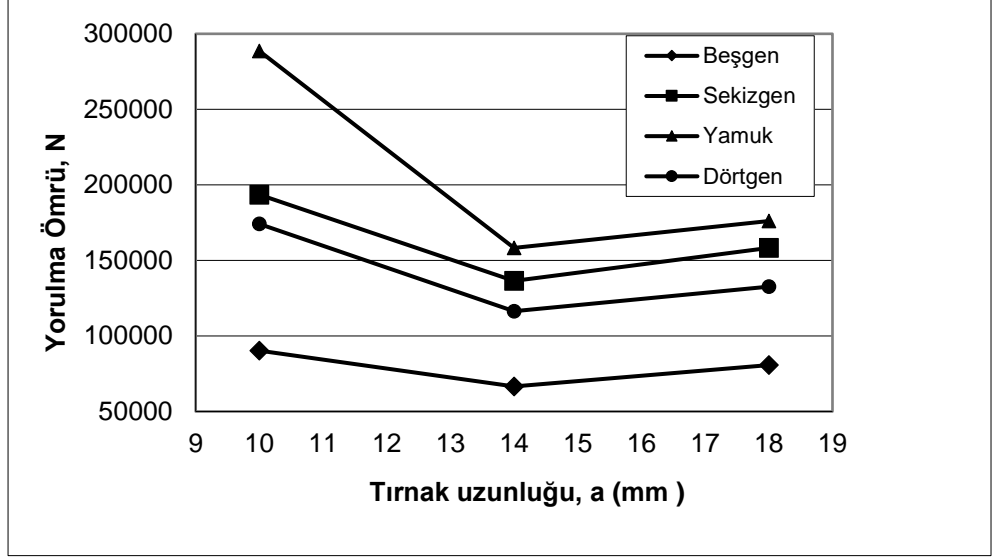
Tırnak uzunluğu değişiminin dörtgen, yamuk, beşgen ve sekizgen tasarımların yorulma dayanımı üzerine etkilerinin grafik üzerinde gösterilmesi faydalı olacaktır. Tırnak genişliği b=1 mm için dört tip tasarımın yorulma ömrü, N değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.24'te verilmiştir. En küçük tırnak genişliği b=1 mm için bağlantılar incelendiğinde yamuk ve sekizgen tasarımlar tüm a değerleri için birbirine yakın yorulma dayanımı gösterirken, dörtgen tasarımlı bağlantı a=10 mm için bu ikisiyle yaklaşık aynı değerde, a=14 mm ve a=18 mm için oldukça düşük değerde yorulma dayanımı göstermiştir. Beşgen uç tasarımlı bağlantı ise en düşük yorulma değerlerini vermiştir. Tüm tasarımlar arasında en yüksek yorulma dayanımı yamuk ve daha sonra sekizgen uç tasarımlı bağlantılarda tırnak uzunluğu a=18 mm değerinde gözlemlenmiştir. Tırnak genişliğinin 1 mm değeri için tırnak uzunluğunun artmasının yorulma dayanımı için önemli olduğu görülmüştür.



Şekil 4.24: Dört tip tasarım için yorulma ömrü değerlerinin tırnak uzunluğuna göre karşılaştırması,
b=1 mm

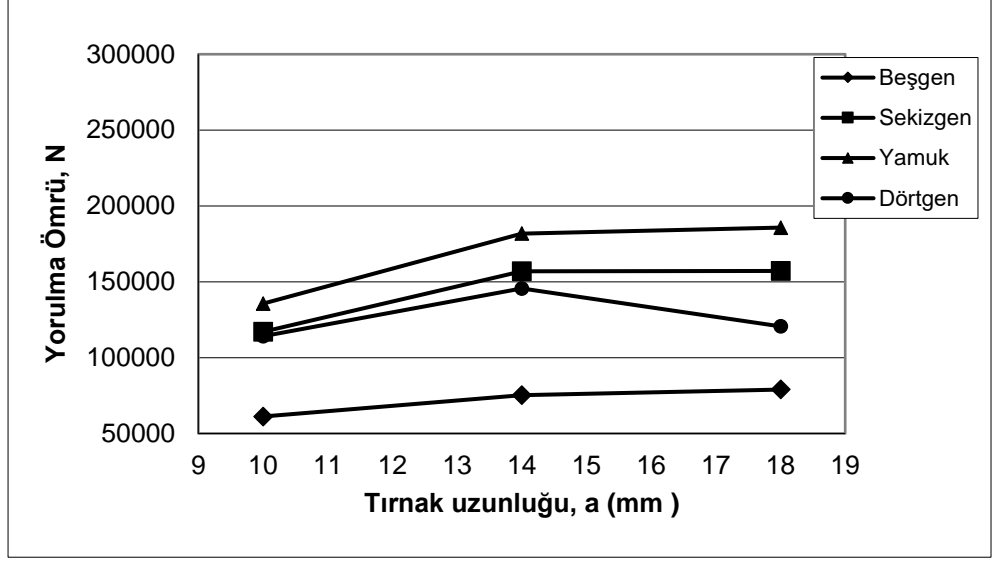
Dört tip tasarımda tırnak genişliği $b=2$ mm için yorulma ömrünün tırnak uzunluğuna değişimi Şekil 4.25'te verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, tırnak uzunluğu $a=10$ mm'den $a=14$ mm'ye çıktığında bağlantının yorulma dayanımı tüm tasarımlar için düşüş göstermektedir. Tırnak uzunluğu 18 mm'ye çıkarıldığında ise yine tüm tasarımlar için 14 mm ye göre kıyasla az bir artış görülmektedir. P02 parametresine sahip ($b=2$ mm, $a=10$ mm) yamuk uç tasarımlı bağlantı aynı tırnak uzunluğuna sahip diğer uç tasarımlarına göre oldukça yüksek bir yorulma dayanımı göstermiştir.

Tırnak uzunluğuna bağlı değişimler incelendiğinde en düşük yorulma dayanımları beşgen uç tasarımında görülmüştür. Sekizgen ve dörtgen uç tasarımlı bağlantılar tüm yakın değerler, paralel bir değişim sergilemiştir.



Şekil 4.25: Dört tip tasarım için yorulma ömrü değerlerinin tırnak uzunluğuna göre karşılaştırması, $b=2$ mm

Tırnak genişliği $b=4$ mm için dört tip tasarımın da yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Tırnak uzunluğu $a=10$ mm'den $a=14$ mm'ye çıkıldığında tüm uç bağlantılarında yorulma dayanımı artmış, $a=18$ mm'ye çıkarıldığında dörtgen uçlu bağlantı dışında yorulma dayanımı değerleri yaklaşık aynı kalmıştır. Beşgen uç tasarımı diğer tasarımlara kıyasla oldukça düşük dayanım göstermiştir. Tırnak genişliğinin en yüksek ($b=4$ mm), tırnak uzunluğunun düşük olduğu ($a=10$ mm) tasarımlarda, tırnak bölgesinin ezilmesiyle numunelerin hızlı bir şekilde hasara uğradığı, bu durumun yorulma ömründe düşüşe yol açtığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.26: Dört tip tasarım için yorulma ömrü değerlerinin tırnak uzunluğuna göre karşılaştırması, $b=4$ mm

4.3.3 Tasarlanan 4 Tip İçin S-N Grafiği Yorulma Değerlerinin Karşılaştırılması

Malzemelerin yorulma özelliği S-N eğrisi ile ifade edilir. Burada S, maksimum gerilmeyi N malzemenin kırılmasına kadar olan değişken yükleme çevrimini ifade eder. Yorulma deneyi dinamik mukavemet deney cihazlarında yapılır. Bu deneyler çok çeşitli olabilir; çekme-çekme deneyi, eğme yorulması deneyi, ayırma yorulması deneyi, tork yorulma deneyi ve çekme-basma deneyi şeklindedir (Yıldırım ve diğ. 2006).

S-N (Wöhler) eğrisi, malzemenin hasar gördüğü çevrim sayısı (yorulma ömrü) ve gerilme genliği arasındaki ilişkiyi açıklar. Genellikle değerler logaritmik ölçeklerde gösterilir. Geniş aralıklarla yapılan yorulma deneyleriyle oluşturulur ve malzemenin başka gerilmeler için yorulma ömrünü belirlemek için kullanılır, bu sayede daha az yorulma deneyiyle daha çok ömür tespiti yapılabilir (Schijve 2009).

Yük – yorulma ömrü grafiklerini oluşturabilmek için kullanılan maksimum yük (F_{max}) değerleri statik deneyler sonucu elde edilen kopma mukavemetinin %30 -%56 oranı dikkate alınarak belirlenmiş ve deneylerde yük oranı $R=0,1$ değeri, frekans

olarak 10 Hz değeri alınarak yorulma deneyleri yapılmıştır. Maksimum yük değerlerine bağlı olarak deney uygulama verileri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Beşgen/sekizgen/yamuk/dikdörtgen tasarımlarda tırnak uzunluğu ve genişliği parametrelerinin yorulma ömrü üzerine etkilerini, değişimini izleyebilmek için $\log(N)=5$ bandının uygun olduğu değerlendirilerek, parametrik çalışmaları içeren tüm deneylerde maksimum yük değeri $F_{\max}=11$ kN olarak alınmıştır. Maksimum yük değeri $F_{\max}=9$ kN altındaki değerlerde çok uzun yorulma ömrü tespit edilmiş, 1 milyon devir üzerine $\log(N)>6$ çıkılabildiği görülerek bu değer tercih edilmemiştir. Yorulma ömrü (N) için yük tekrar sayısı 1 milyon devirin üzerine çıktığında ($N>10^6$) yorulma ömrü sonsuz kabul edilir (Talreja 2015).

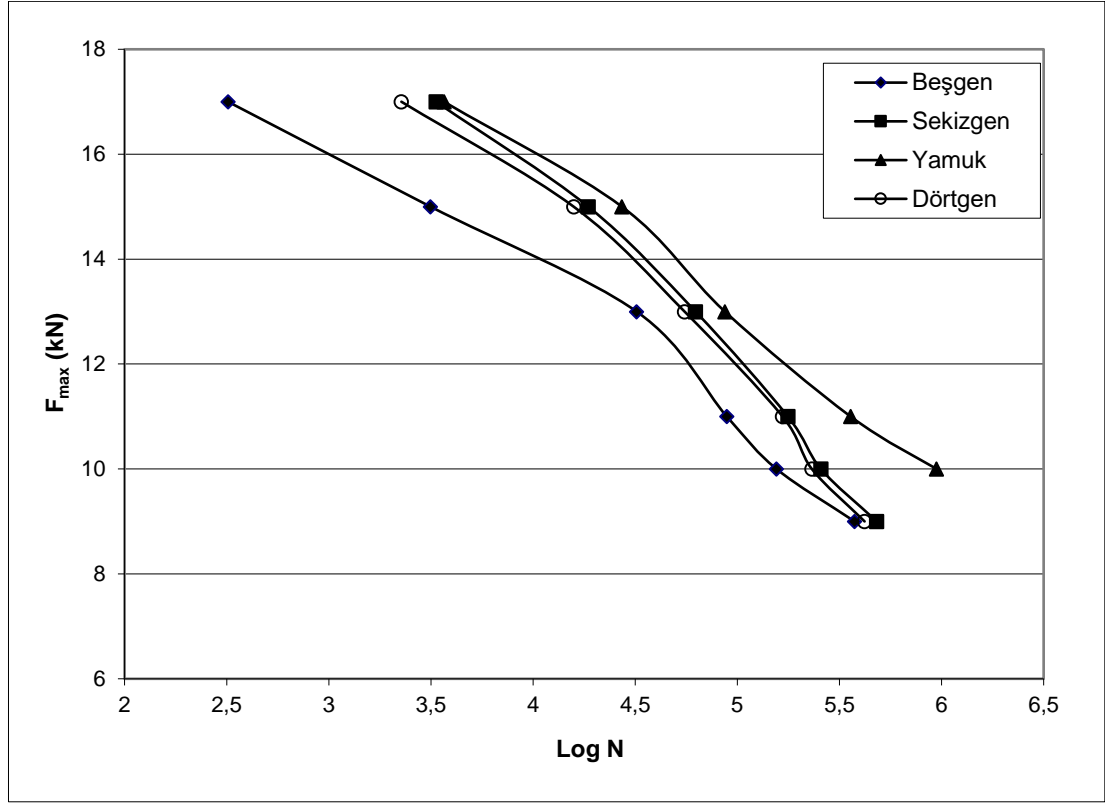
Tablo 4.2: Maksimum kuvvet değişimine göre deney cihazına girilen değerler

	R	Frekans (Hz)	F_{max} (kN)	F_{min} (kN)	F_{ort} (kN)	Genlik (kN)
1. değer	0,1	10	17,00	1,70	9,35	7,65
2. değer	0,1	10	15,00	1,50	8,25	6,75
3. değer	0,1	10	13,00	1,30	7,15	5,85
4. değer	0,1	10	11,00	1,10	6,05	4,95
5. değer	0,1	10	9,00	0,90	4,95	4,05

Beşgen/sekizgen/yamuk/dikdörtgen tasarımlara ait F_{\max} -Log N grafiği Şekil 4.27’de görülmektedir. Yapılan deneylerde tüm tasarımlar için P02 ($a=10$, $b=2$) parametrelerine sahip A02, B02, C02 ve D02 numuneleri kullanılmıştır. Maksimum yük 17 kN olarak uygulandığında beşgen tip için $N=321$ devir, sekizgen tip için $N=3350$ devir, yamuk tip için $N=3666$ devir, dörtgen tip için $N=2267$ devir sonrası hasara uğrayarak koptuğu belirlenmiştir. Bu değerlerin birbirine yakın olduğu parametre etkilerini değerlendirmede zorluk yaşanacağı değerlendirilmiştir. Maksimum yük 11 kN olarak uygulandığında, beşgen tip için $N=88900$ devir, sekizgen tip için $N=176815$ devir, yamuk tip için $N=358670$ devir, dörtgen tip için $N=166630$ devir sonrası hasara uğrayarak koptuğu görülmüştür. Bu sonuçlar bağlantı tasarımı değişikliğinin yorulma ömrünü etkilediği hususunu güçlendirmiş ve maksimum yük olarak 11 kN seçmenin uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Şekil 4.27 incelendiğinde yamuk tip yapıştırma geometrisi en iyi yapışma dayanımını, beşgen tip geometrisi ise en zayıf dayanımı göstermiştir. Sekizgen ve

dörtgen tiplerin birbirine yakın dayanıma sahip olduğu izlenmiştir. Grafik eğrileri incelendiğinde seçilen tüm uç tasarımları için tekrarlı yüke maruz bağlantıların ömürleri öngörülebilir. Yamuk tasarımı için F_{max} değeri 9 kN altına düştüğünde yorulma ömrünün sonsuz olacağı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.27: Beşgen, sekizgen, yamuk ve dörtgen uç tasarımına göre F_{max} -Log (N) karşılaştırması (Parametre seti P02)

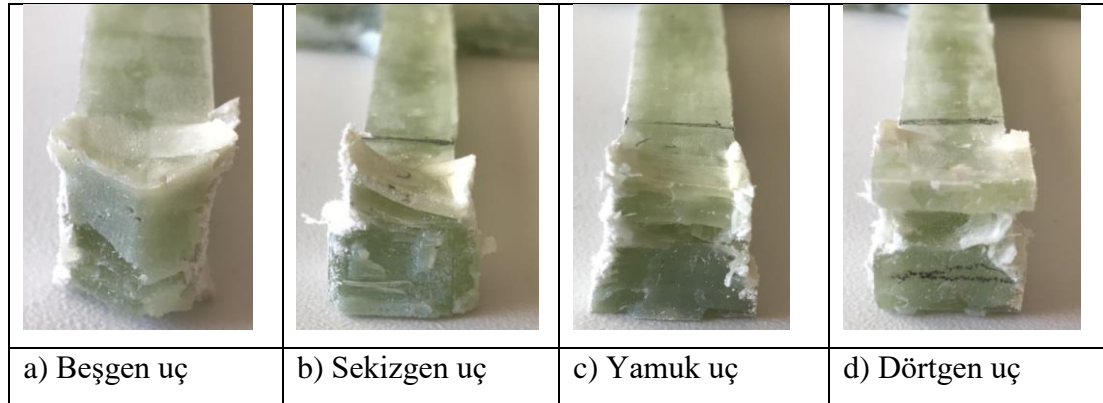
4.4 SEM Analizleri ve Değerlendirmesi

Deney sonrası beşgen/sekizgen/yamuk/dikdörtgen tasarımlara ait numunelerin hasar bölgelerindeki elyaf ve matris malzemesini yakından incelemek, yorulmanın yapışma yüzeyi üzerindeki etkilerini daha iyi analiz edebilmek için en dayanıklı ve en zayıf tasarımlara ait numunelerin dil kopma yüzeyi üzerinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri alınarak incelenmiştir. Yorulma etkisiyle kopan numunelerin hasar oluşan yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinin incelenmesi hasar mekanizması hakkında fikir vermektedir. SEM vakumlu ortamda odaklanmış bir elektron demeti ile özel bir kaplama (kuru ve iletken) yapılarak cihaza konmuş

numunenin yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu tipidir. SEM cihazı ile bir nanometreden daha yüksek çözünürlüğe ulaşılabilen görüntüler alınabilmektedir (Mcmullan 1995).

Dört tip uç tasarımının tamamında aynı tabakalı kompozit malzeme kullanılmış, uç geometrisinden dolayı kopma bölgelerinde farklı hasar görüntüleri oluşmuştur. Hasar bölgeleri elektron mikroskobu ile makro boyutta (100 kat, 1000 kat gibi oranlarda büyütülerek) incelenmiştir. Elektron mikroskobu ile çekilen görüntülerde yüksek yorulma dayanımı gösteren numunelerin hasar bölgelerinde dolgu malzemesinin fazla çözülmediği ve elyafların dağılmadığı gözlemlenmiştir.

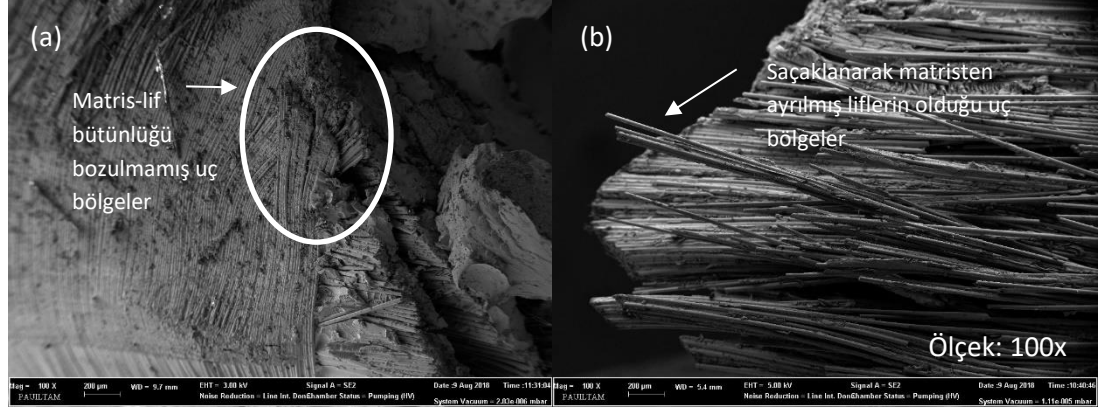
SEM analizi yapılan farklı geometrilere sahip en dayanıklı numunelerin dil bölgesi görüntüleri Şekil 4.28’de verilmiştir. Hasar bölgesinden uygun boyutlarda alınan kesitler, yapının cam olmasından dolayı daha iyi görüntü alabilmek amacıyla altın ile kaplanmıştır.



Şekil 4.28: Hasarlı dil örnekleri a)Beşgen b)Sekizgen c)Yamuk d)Dörtgen uç tipi

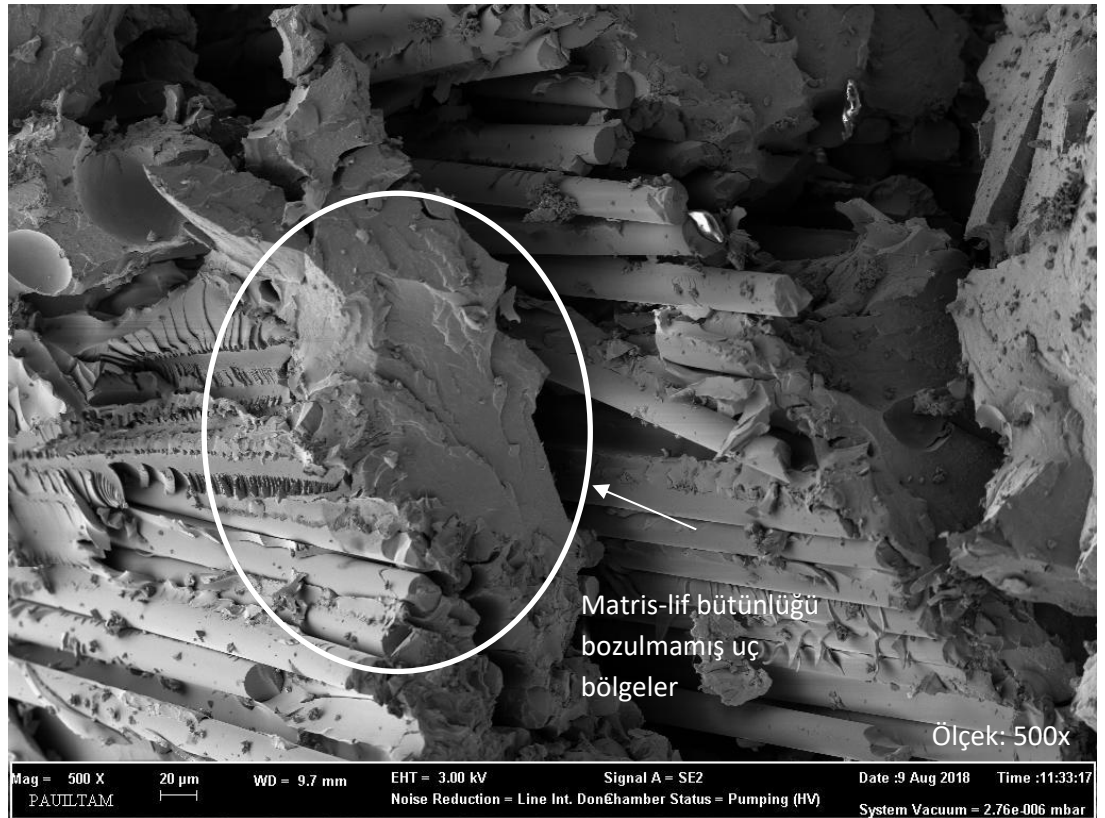
Seçilen ilk tip olan beşgen uç tasarımının en güçlü ve en zayıf numunelerine ait makro görüntüler Şekil 4.29’de verilmiştir. Yorulma ömrü en yüksek değer veren numunenin hasar bölgesi görüntülerinde dolgu ve elyaf malzemelerin birbirinden çok ayrılmadığı ve tabakalar arası ayrışmanın olmadığı görülmektedir, Şekil 4.29-a. Kopma sonucu numuneye ait dil yapısı çıplak gözle incelendiğinde malzemenin bütünlüğünü koruduğu görülmüştür. x100 kat büyütülmüş SEM görüntülerde lif yapısı incelenerek bunun doğru olduğu görülmüştür. Yorulma ömrü en zayıf numunenin hasar bölgesi görüntülerinde ise dolgu malzemesinin parçalanarak döküldüğü elyaf liflerinin ise saçaklanarak ayrıldığı görülmektedir, Şekil 4.29-b. Numune ucu kopma

esnasında tırnak bölgesinde ezilmeye uğramış ve tırnak bölgesine ait SEM analizlerinden elde edilen görüntülerde elyaf liflerin matris malzemesinden sıyrıldığı görülmüştür.



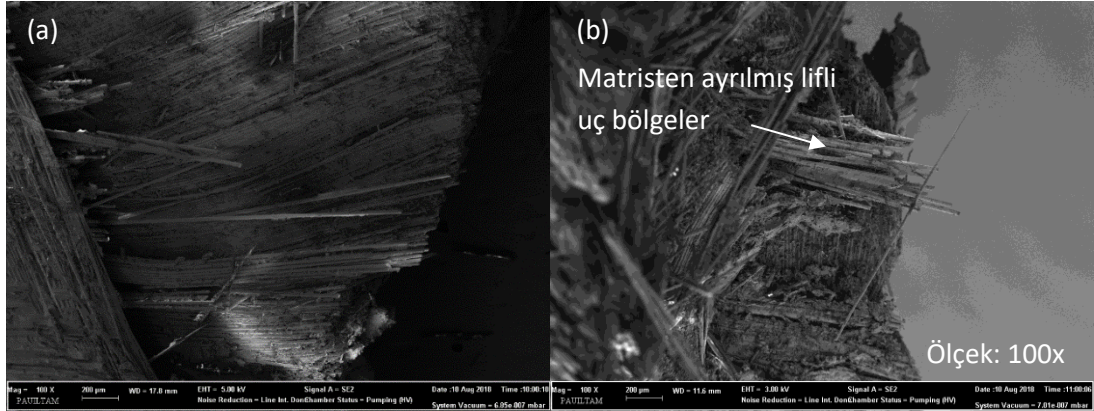
Şekil 4.29: Beşgen tasarım kopma bölgesi SEM görüntüleri a) En güçlü numune b) En zayıf numune

En yüksek yorulma dayanımına ait beşgen tasarımlı numunenin SEM cihazı ile büyütülmüş (x500) içyapı görüntüleri Şekil 4.30'da verilmiştir. Fotoğrafta görüldüğü gibi matris yapısı hasar bölgelerinde liflerle bütünlüğünü korumuş ve dağılmamıştır.



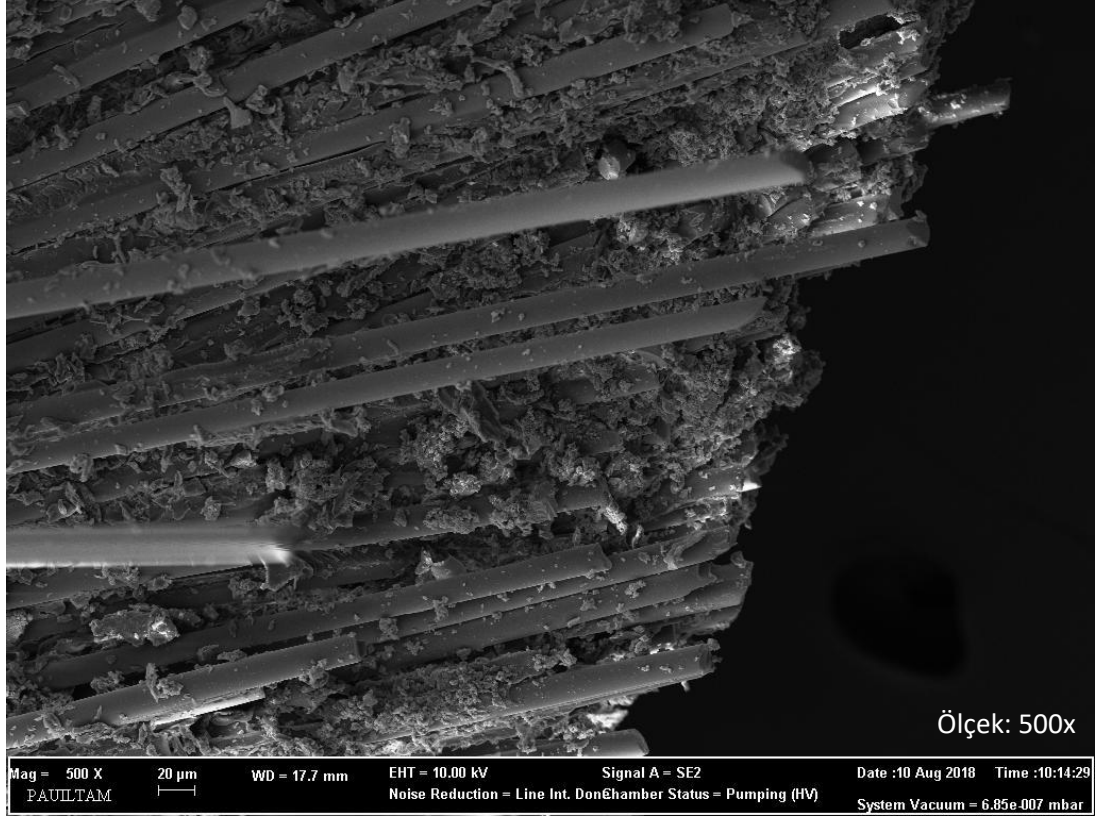
Şekil 4.30: Beşgen tasarım en güçlü numune kopma bölgesi matris/lif yapısı SEM görüntüleri

Seçilen ikinci tip olan sekizgen uç tasarımına ait en güçlü ve en zayıf dayanım gösteren numunelerin makro görüntüleri Şekil 4.31’de verilmiştir. Sekizgen uç tasarımında yüksek yorulma dayanımlı numunede uç bölgeleri lif-matris bütünlüğünü korumuş ve hasar bölgelerinde pek ayrışma gözlenmemiştir. Özellikle bu uç tasarımında sabit olarak alınan “c” parametresi boyunca dil kompozit yapının bozulmadığı görülmüştür. Bununla birlikte SEM cihazından alınan fotoğraflarda da söz konusu numunenin hasar sonrasında matris lif bütünlüğünü ve formunu büyük ölçüde koruduğu görülmüştür. Yorulma dayanımı en zayıf olan sekizgen numuneye ait hasar bölgelerinde liflerin kırılarak ve koparak ayrıldığı, dolgu malzemesinin ise tozlaşarak döküldüğü görülmüştür, Şekil 4.31-b.



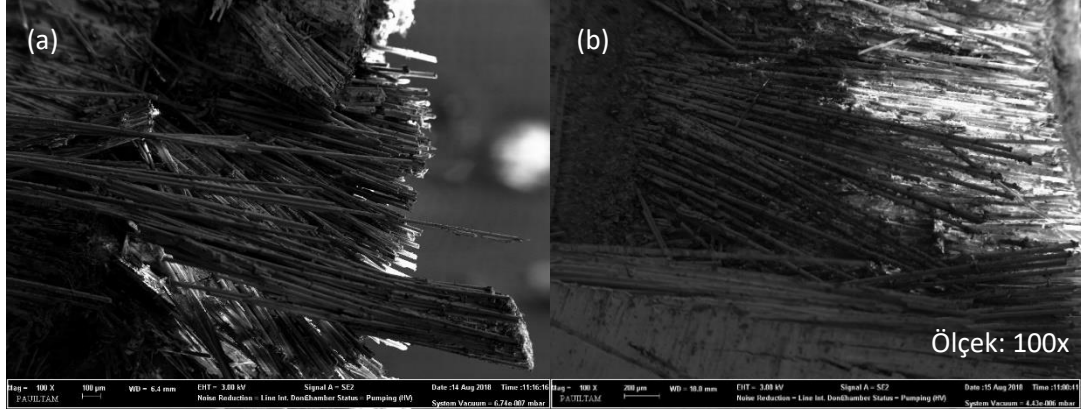
Şekil 4.31: Sekizgen tasarım kopma bölgesi SEM görüntüleri a)En güçlü numune b)En zayıf numune

Sekizgen tasarımlı uç için en güçlü numuneye ait büyütülmüş (x500) SEM görüntülerinde malzemenin yüzeydeki kırılmalar haricinde kompozit yapısında bozulma olmadığı Şekil 4.32’de görülmektedir.



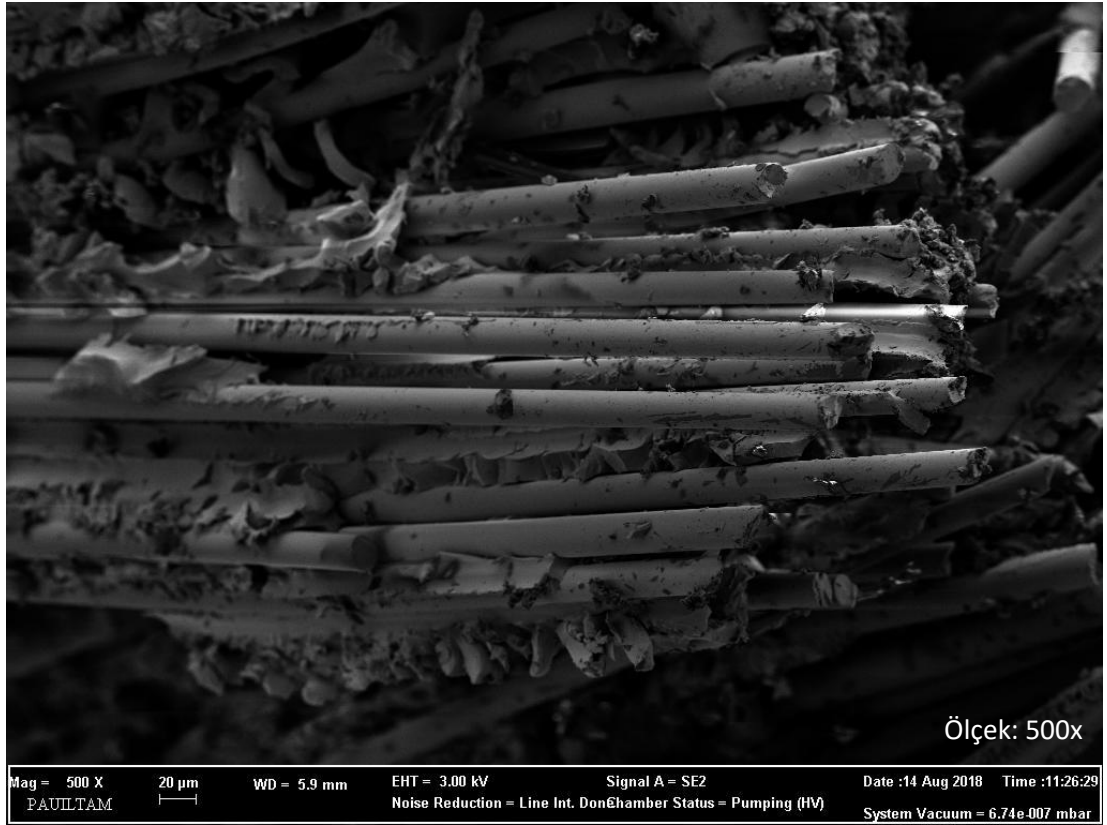
Şekil 4.32: Sekizgen tasarım en güçlü numune kopma bölgesi matris/lif yapısı SEM görüntüleri

İncelenen üçüncü tip olan yamuk uç tasarımına ait en güçlü ve en zayıf dayanım gösteren numunelerin makro görüntüleri Şekil 4.33’de gösterilmiştir. Deneyleerde uç tasarımları arasında en yüksek yorulma dayanımını gösteren yamuk şeklinde geometrik tasarıma ait bağlantıda en güçlü numunenin dil parçasına ait hasar bölgesi görüntüleri Şekil 4.33-a’da verilmiştir. Deneyleer sırasında yapıştırma bölgesi ayrıldıktan sonra sahip olduğu geometrik tasarımdan dolayı yüksek bir yorulma dayanımı gösteren numunede, dilden sonraki kafa yapısı formunda pek bozulma olmamış sadece dil bölgesi-yapışma bölgesi arasında sınırlarda ezilme görülmüştür. Yamuk uç tasarımlı en zayıf numunenin büyütülmüş (x100) SEM görüntüleri Şekil 4.33-b’de gösterilmiştir. Hasar bölgesi incelendiğinde dil parçasının tırnak bölgesinde matris-lif ayrışması ve saçaklanma görülmektedir. Uç bölgelerde matris oldukça dağılmış ve lifler açığa çıkmıştır.



Şekil 4.33: Yamuk tasarım kopma bölgesi SEM görüntüleri a)En güçlü numune b)En zayıf numune

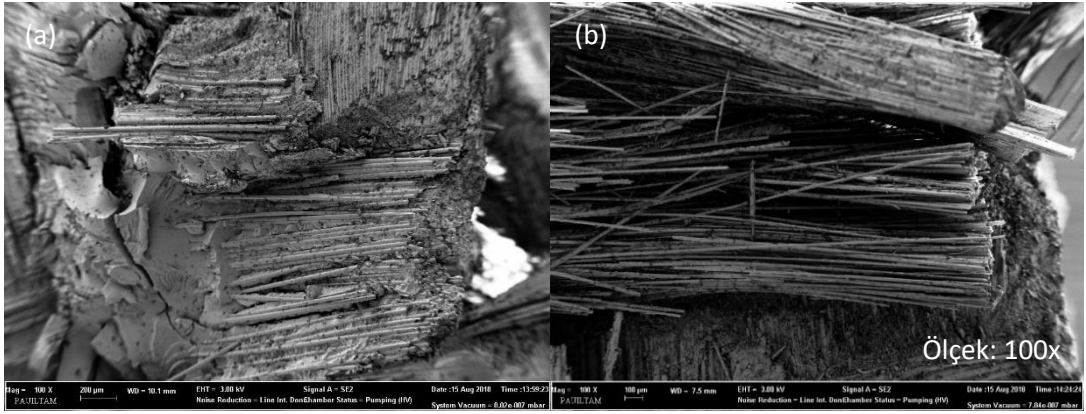
Şekil 4.34'te en yüksek dayanım gösteren yamuk uç tasarımlı numunenin büyütülmüş (x500) SEM görüntüleri incelendiğinde liflerdeki saçaklanmanın sadece uçlarda olduğu iç bölgelerde matris-lif bütünlüğünün korunduğu görülmektedir.



Şekil 4.34: Yamuk tasarım en güçlü numune kopma bölgesi matris/lif yapısı SEM görüntüleri

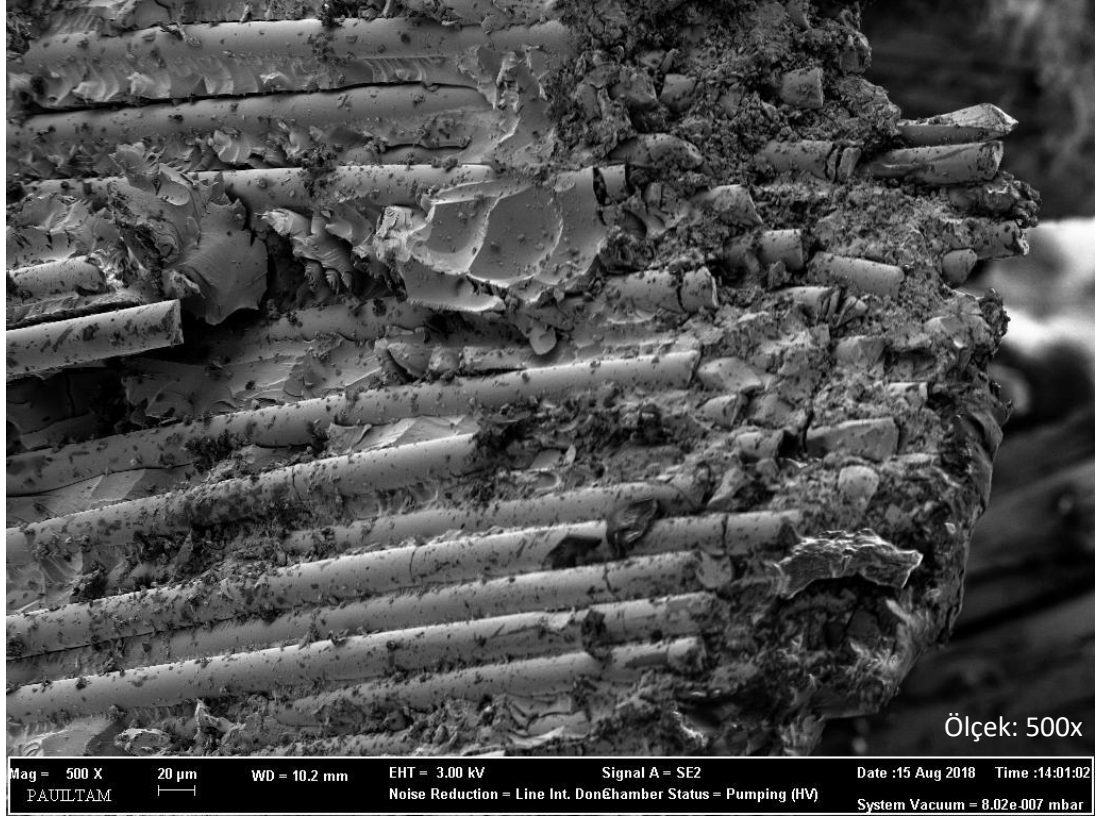
En son olarak incelenen dörtgen uç tasarımına ait en güçlü ve en zayıf dayanım gösteren numunelerin makro görüntüleri Şekil 4.35'de görülmektedir. Bu uç tasarımında tırnak uzunluğu tamamen uygulanan yük yönünde ve tırnak genişliği yüke

90° olacak şekilde tasarlandığından kafanın alt bölgesi çene şeklinde oluk içine oturmuştur. Kafanın yan yüzeylerinin formu bozulmamış hasar şekli katmanlar arası açılma/delaminasyon şeklinde gerçekleşmiştir. Şekil 4.35-a'da en güçlü dörtgen numunenin tırnak uçlarından alınan SEM görüntüsünde kompozit malzemenin matris-lif yapısını yüksek ölçüde koruduğu görülmektedir. Şekil 4.35-b'de dörtgen tasarıma ait en düşük dayanım gösteren numunesinin uç bölgelerinden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, malzemede tabakalar arası ayrışmanın olduğu matris-lif yapısının kısmen çözüldüğü, fazla saçaklanma olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.35: Dörtgen tasarım kopma bölgesi SEM görüntüleri a) En güçlü numune b) En zayıf numune

Şekil 4.36'da en yüksek dayanım gösteren dörtgen uç tasarımlı numunenin büyütülmüş (x500) SEM görüntüleri, malzemenin kompozit yapısında pek bozulma olmadığı, matris-lif bütünlüğünün korunduğu ve saçaklanma olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.36: Dörtgen tasarım en güçlü numune kopma bölgesi matris/lif yapısı SEM görüntüleri

Beşgen/sekizgen/yamuk/dikdörtgen tasarımlara ait SEM analizlerinde, yüksek ve düşük dayanım gösteren uç görüntüleri incelendiğinde; deney malzemesinin kompozit yapısının ve matris-lif bütünlüğünün değişimi veya bozulması, uç geometrisine ve yükün uçta gösterdiği dağılıma göre değişkenlik gösterebilmektedir. Yapışan yüzeylerin yönünün uygulanan yükün yönüyle yaptığı açının, kopma sonrası matris-lif bütünlüğüne ve fiziksel hasara etkileri olduğu, yorulma ömrü düşük olan tasarımlarda lif malzemesinin geometriden bağımsız olarak daha fazla kırılma ve oryantasyonunu kaybettiği gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dil-oluk birleştirme tekniği kullanılarak kalın kompozit-kompozit sandviç malzemelerin yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımının incelendiği çalışmada beşgen, sekizgen, yamuk ve dikdörtgen olmak üzere 4 farklı geometrik tasarımlar parametrik olarak ele alınarak yorulma dayanımları belirlenmeye çalışılmıştır. Tasarımlarda tırnak uzunluğu $a=10, 14, 18$ mm ve tırnak genişliği $b=1, 2$ ve 4 mm olarak ele alınmıştır.

Tasarlanan geometriler arasında yapılan karşılaştırmalarda en yüksek yorulma dayanımının yamuk tasarıma ait sahip numunelerin, en zayıf dayanıma ise beşgen tasarıma ait sahip yapıların olduğu görülmüştür. Sekizgen ve dörtgen tip tasarımda önemli bir fark olmamakla beraber sekizgen uç, dörtgen uç tipinden daha yüksek dayanım göstermiştir.

Tırnak uzunluğu (a) ve tırnak genişliği (b) parametresinin yorulma dayanımında önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Tırnak uzunluğu 10 mm için tırnak genişliği $b=1$ mm benzer yorulma ömrü değerleri vermesine karşılık tırnak genişliği $b=2$ mm alındığında uç tiplerinin yorulma dayanımı değerleri arasındaki fark artmış özellikle yamuk tip için yorulma dayanımında önemli bir artış görülmüştür. Tırnak genişliği $b=4$ mm için yorulma dayanımı değerleri birbirine yaklaşmıştır. Tırnak uzunluğu 14 mm için tırnak genişliği $b=1$ mm seçildiğinde sekizgen ve yamuk yorulma değerlerinin diğer iki tipten daha yüksek ve birbirine yakın olduğu görülmektedir. Tırnak genişliği $b=2$ mm'ye çıktığında sıralama değişmemiş fakat yamuk uç tipinin dayanımı sekizgen tipe nispetle daha fazla artmıştır. Tırnak genişliği $b=4$ mm için ise yine beşgen tip en az, yamuk tip en yüksek dayanımı göstermiş ve yorulma dayanımındaki artışın devam ettiği gözlenmiştir. İncelenen tırnak uzunluğunda en yüksek değer $a=18$ mm için, tırnak genişliği 1 mm'den 2 mm'ye çıktığında dört tasarımın yorulma dayanımında yükselme, 4 mm'ye çıkarıldığında beşgen ve dörtgen tasarımda düşme, sekizgen tasarımda ciddi bir değişim olmadığı ve yamuk tasarımda yorulma dayanımında artmanın devam ettiği belirlenmiştir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde optimum kuvvet olarak seçilen $F_{max}=11$ kN değeri için uygulanan yorulma değerlerine göre; en iyi parametreye sahip yamuk uç tasarımının sekizgen tasarımdan yaklaşık 1,6 katı daha dayanıklı, sekizgen ve dörtgen

uç tipleri birbirine yakın değerlere sahipken; dörtgen tasarımın, beşgen tasarıma göre 2 kat daha mukavim olduğu görülmüştür. Beşgen tasarım oldukça düşük yorulma dayanımı göstermiştir. Dil-oluk tipi yapıştırma bağlantılarında, tez kapsamında tasarlanan tüm uç geometrileri, düz uçlu bağlantıya göre yorulma dayanımını artırıcı etki sağlamıştır. Daha önceki çalışmalarda ele alınan ve düz uçlu olarak tanımlanan numunelerde tırnak genişliği yer almamaktadır. Önerilen tasarımlarda oluşturulan tırnak yapısı yorulma dayanımını önemli oranda artırmıştır.

Yapılan tez çalışmasıyla aynı zamanda yapıştırma bağlantılarını, malzemeyi delmek suretiyle montajı yapılan cıvata ve perçin gibi geleneksel yöntemleri kullanmadan yapıştırma bağlantısını mekanik olarak güçlendirmenin önerilen tasarımlarla mümkün olduğu belirlenmiştir. Önerilen tüm tasarımlar değerlendirildiğinde yorulma dayanımı en yüksekten en düşüğe doğru; yamuk, sekizgen, dörtgen ve beşgen uç tasarımı olarak sıralanmıştır. En dayanıklı yapışkanlı bağlantının yamuk uç geometrisi olarak tırnak uzunluğu 10 mm ve tırnak genişliği 2 mm seçildiğinde oluşmaktadır. En iyi parametreye sahip yamuk tasarımın $N= 288615$ devir yorulma ömrüne sahip olduğu görülmüştür. Tüm tasarımlarda en dayanıklı durumlar ele alındığında, yamuk uç tasarımının sekizgen, dörtgen ve beşgen tasarımlarına göre sırasıyla 1,5; 1,6 ve 3,2 kat daha dayanıklı olduğu ortaya konulmuştur.

Yapılan çalışmada kompozit-kompozit bağlantı incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, bağlantı tasarımında kompozit dil yerine metal dil kullanılabilceği, dil bölgesine oluşan ezilmenin, katmanlar arası delaminasyonun/açılmanın önlenerek yorulma performansının artabileceği, dolayısı ile bu kapsamda yeni araştırmaların yapılabileceği önerilmektedir. Kompozit yapılarda farklı yapıştırma teknikleri ile cıvata, perçin ile birleştirme yöntemlerinden daha dayanıklı bağlantılar elde edilebileceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, en yüksek dayanıma sahip yamuk uçlu tasarım için, tüm deneylerde kullanılan dil bölgesinin uzunluğu, dil genişliği ve tırnak uzunluğu (a) ile tırnak genişliği (b) arasında yapılabilecek oran ($\tan(\alpha)=b/a$) parametre olarak ele alınabilir, bu parametrelerin yorulma dayanımına etkisinin incelenebileceği değerlendirilmektedir.

6. KAYNAKLAR

Adams, R.D. Comyn, J. Wake, W. C., *Structural Adhesive Joints in Engineering.*, London: Chapman & Hall, (1997).

Akpınar, S., Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, (25.11.2019), <https://slideplayer.biz.tr/slide/11641716/>, (2016).

Alia, C., Arenas, J.M., Suárez, J.C., Pinilla, P., “Mechanical behavior of polyurethane adhesive joints used in laminated materials for marine structures”, *Ocean Engineering*, 113, 64–74, (2016).

Annamalai, M., Ramasubbu, R., “Optimizing the formulation of e-glass fiber and cotton shell particles hybrid composites for their mechanical behavior by mixture design analysis”, *Materials and Technology*, 52 (2), 207-214, (2018).

Arumugam, V., Mishra, R., Tunak, M., Tomkova, B., Militky, J., “Study on the in-plane shear performance of spacer fabrics in composite forming”, *Materials and Technology*, 52(1), 47-50, (2018).

Bautista, A., Casas, J.P., Silva, M., Porras, A., “A Dynamic Response Analysis of Adhesive - Bonded Single Lap Joints Used in Military Aircrafts Made of Glass Fiber Composite Material under Cyclic Impact Loading”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, (baskıda) (2020).

Bernardin, P., Vacík, J., Kroupa, T., Kottner, R., “Determination of the mechanical parameters of a bonded joint between a metal and a composite by comparing experiments with A finite-element model, *Materials and Technology*, 47(4), 417-421, (2013).

Bingöl, M., Çavdar, K., “Farklı takviye malzemelerinin kompozit malzeme mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine etkisi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 124-132, (2016).

Boutar Y., Naïmi, S., Mezlini, S., Carbas, R.J.C., Da Silva, L.F.M., Ben Sik Ali, M., “Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive

joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, 143-152, (2018).

Campilho, R.D.S.G., De Moura, M.F.S.F., Ramantani, D.A., Morais, J.J.L., and Dominues, J.J.M.S., “Tensile behaviour of three dimensional carbon/epoxy adhesively bonded single and double-strap repairs”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 678-686, (2009).

Canyurt, O.E. and Zhang, J., “Pre-stressed adhesive strap joints for thick composite sandwich structures.”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(4), 389–399, (2006).

Canyurt, O.E., Meran, C., Uslu M., “Strength estimation of adhesively bonded tongue and Groove joint of thick composite sandwich structures using genetic algorithm approach”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30, 281-287, (2010).

Canyurt, O.E., Meran, C., “Fatigue strength estimation of adhesively bonded tongue and Groove joint of thick woven composite sandwich structures using genetic algorithm approach”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 33, 80-88, (2012).

Case, J., Chilver, A.H., Ross, C.T.F., *Strength of Materials and Structures*, Great Britain: Arnold Publishers, (1999).

Chawla, K.K., *Composite Materials Science and Engineering*, New York: Springer Science+Business Media, (2012).

Chen, Q., Guo, H., Avery, K., Su, X., Kang, H., “Fatigue performance and life estimation of automotive adhesive joints using a fracture mechanics approach”, *Engineering Fracture Mechanics*, 172, 73-89., (2017).

Cheremisinoff, N.P., Cheremisinoff, P.N., *Fiberglass Reinforced Plastics*, New Jersey: Noyes Publications, (1995).

Chowdhury, N.M., Wang, J., Chiu, W.K., Chang, P., “Static and fatigue testing bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy laminates used on aircraft structures”, *Composite Structures*, 142, 96-106, (2016).

Da Silva, V.D., *Mechanics and Strength of Materials*, Netherlands: Springer Science+Business Media, (2006).

Da Silva, L.F.M, Adams, R.D., “Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, 216-226, (2007).

Da Silva, L.F.M., Adams, R.D., “Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, 227-235, (2007).

De Goeij, U.W.C., Van Tooren, M.J.L., Beukers, A., “Composite adhesive joints under cyclic loading”, *Materials and Design*, 20, 213-221, (1999).

Delzendehrooy, F., Ayatollahi, M.R., Akhavan-Safar, A., Da Silva, L.F.M., “Strength improvement of adhesively bonded single lap joints with date palm fibers: Effect of type, size, treatment method and density of fibers”, *Composites Part B: Engineering*, 188, (2020).

Demirel, M., Muratoglu, M., “The friction and wear behavior of Cu-Ni₃Al composites by dry sliding”, *Materials and Technology*, 45(5), 401-406, (2011).

Doğanay, S., Ulcay, Y., “Farklı oranlarda takviye edilmiş cam lifi polyester kompozitlerin deniz suyu etkisi altında yorulma davranışının incelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12(2), 85-95, (2007).

Duffy O.C., Wright G., *Fundamentals Medium/Heavy Duty Commercial Vehicle Systems*, Burlington, USA: Jones&Bartlett Learning, 770-772, (2016).

Dvorak, G., Zhang, J., Canyurt, O.E., “Adhesive Tongue-and-groove joints for thick composite laminates”, *Composite Science and Technology*, 61(8), 1123-1142, (2001).

Ekrem, M., Karabulut, S.E., Demir, O., Yar, A., Önal, G., Avcı, A., “Hibrit nano parçacıklarla takviye edilmiş epoksi yapıştırıcılar kullanılarak hava araçlarındaki bağlantıların iyileştirilmesi”, *V. Ulusal havacılık ve uzay konferansı*, Kayseri-Turkey, (2014).

Evcin, A., Polimer Malzemeler, (25.11.2019), <http://blog.aku.edu.tr/evcin/files/2016/06/1-polimer-malzemelere-giris.pdf>, (2017).

Ferreira, J.A.M., Reis, P.N., Costa, J.D.M., Richardson, M.O.W., “Fatigue behaviour of composite adhesive lap joints”, *Composites Science and Technology*, 62, 1373–1379, (2002).

Fidan, S., Avcu, E., Sınmazçelik T., Cam fiber takviyeli polyeester kompozitte tekrarlı darbe yüklemeleriyle oluşan hasar mekanizmaları, *I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir-Turkey, (2011).

Fu, S.-Y., Lauke, B., Ma`der, E., Yue, C.-Y., Hu, X., “Tensile properties of short-glass-fiber and short-carbon-fiber reinforced polypropylene composites”, *Composites: Part A*, 31, 1117–1125, (2000).

Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W., *Composite Materials Design and Applications*, USA: CRC Press, (2003).

Gunnion, A.J., Herszberg, I., “Parametric study of scarf joints in composite structures”, *Composite Structures*, 75, 364-376, (2006).

Güden, M., “Katmanlı malzemelerde gerilme dalgası geçişinin deneysel ve nümerik yöntemlerle belirlenmesi: Hopkinson Basınç Bar deneyleri”, DOI: 10.13140/RG.2.1.1926.5365, (2015).

He, X., “A review of finite element analysis of adhesively bonded joints”, *Journal of Adhesion & Adhesives*, 31, 248-264, (2011).

Ichikawa, K. Shin, Y, Sawa, T., “A Three-Dimensional Finite Element Stress Analysis and Strength Prediction of Stepped-lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherends Subjected to Bending Moments”, *A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part A* , 75, 1562-1569, (2009).

İmak, A., Solmaz, M.Y., Topkaya, T., “Karbon ve cam epoksi tabakalı hibrit kompozitlerin yorulma analizlerinin deneysel olarak incelenmesi”, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 5(2), 12-17, (2016).

Jen, Y.-M., “Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints”, *International Journal of Fatigue*, 36, 30-39, (2012).

Jen, Y.M., Ko, C.W., “Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminum single-lap joints using interfacial parameters”, *International Journal of Fatigue*, 32, 330-340, (2010).

Jiang, Z., Wan, S., Fang, Z., Song, A., “Experimental investigation of fatigue behavior for adhesively-bonded GFRP/steel joints”, *Engineering Structures*, 213, (2020).

Kadioglu, F., Adams, R.D., “Flexible adhesives for automotive application under impact loading”, *International Journal of Adhesion&Adhesives*, 56, 73-78, (2015).

Kang, H.T., Li, Z., Khosrovaneh, A.K., Kang, B., Li, Z., “Fatigue Life Predictions of Adhesive Joint of Sheet Steels”, *Procedia Engineering*, 133, 518-527, (2015).

Kaplanseren, A. N., “Örgü Tip Dokuma Kompozit Malzemelerin Birleştirilmesinde Farklı Uç Geometrilerinin Yapıştırma Dayanımına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2013).

Karahan, M., Lomov, Bogdanovich, S.V., Verpoest, I., “3-boyutlu dokuma karbon-epoksi kompozit malzemelerde yorulma davranışı”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(7), 310-318, (2013).

Kaw, A.K., *Mechanics of Composite Materials*, Boca Raton USA: CRC Press Taylor&Francis Group, (2006).

Keskes, B., Menger, Y., Abbadi, A., Gilgert, J., Bouaouadja, N., Azari, Z., “A fatigue characterization of honeycomb sandwich panels with a defect”, *Materials and Technology*, 41(4), 157-161, (2007).

Khashaba, U.A., Aljinaidi, A.A., Hamed, M.A., “Fatigue and reliability analysis of nano-modified scarf adhesive joints in carbon fiber composites”, *Composites Part B*, 120, 103-117, (2017).

Khashaba, U.A., Najjar, I.M.R., “Adhesive layer analysis for scarf bonded joint in CFRE composites modified with MWCNTs under tensile and fatigue loads”, *Composite Structures*, 184, 411-427, (2018).

Kırkayak, L., The effects of adhesive geometry on the stress distribution in bonded joints, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 27-33, (2019).

Krenk, S., Jönsson, J., Hansen L.P., “Fatigue analysis and testing of adhesive joints”, *Engineering Fracture Mechanics*, 53(6), 859-872, (1996).

Lyubimova, O., Gridasova, E., Gridasov, A., Frieling, G., Klein, M., Walther, F., “Characterisation of the mechanical and corrosive properties of newly developed glass-steel composites”, *Materials and Technology*, 50(1), 95-100, (2016).

Machado, J.J.M., Gamarra, P.M-R., Marques, E.A.S., Da Silva, L.F.M., “Numerical study of the behaviour of composite mixed adhesive joints under impact strength for the automotive industry”, *Composite Structures*, 185, 373–380, (2018).

Maheri, M.R., Adams, R.D., “Determination of dynamic shear modulus of structural adhesives in thick adherend shear test specimens”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 22, 119–127, (2002).

Marcadon, V., Nadot, Y., Roy, A., Gacougnolle, J.L., “Fatigue behaviour of T-joints for marine applications”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26, 481-489,(2006).

Mariam, M., Afendi, M., Abdul Majid, M.S., Ridzuan, M.J.M., Gibson, A.G., “Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy/glass fibre

reinforced composites fabricated with different joining methods”, *Composite Structures*, 200, 647–658, (2018).

Matous, K., Dvorak, G.J. “Analysis of tongue and Groove joints for thick laminates”, *Composites: Part B*, 35, 609–617, (2004).

Mcmullan, D., “Scanning Electron Microscopy 1928–1965”, *Scanning*, 17, 175-185, (1995).

Melogranaa, J.D, Grenestedt, J.L., Maroun, W.J., “Adhesive tongue-and-groove joints between thin carbon fiber laminates and steel”, *Composites: Part A*, 34, 119–124, (2003).

Moreira, R.D.F., De Moura, M.F.S.F., Figueiredo, M.A.V., Fernandes, R.L., Gonçalves, J.P.M., "Characterisation of composite bonded single-strap repairs under fatigue loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, 103, 22-29, (2015).

Moreira, R.D.F., De Moura, M.F.S.F., Silva, F.G.A., Reis, J.P., “High-cycle fatigue analysis of adhesively bonded composite scarf repairs”, *Composites Part B: Engineering*, 190, (2020).

Morgado, M.A., Carbas, R.J.C., dos Santos, D.G., da Silva, L.F.M., “Strength of CFRP joints reinforced with adhesive layers”, *International Journal of Adhesion&Adhesives*, 97, (2020).

Mortensen, F., Thomsen, O.T., “Analysis of adhesive bonded joints, A unified approach”, *Composites Science and Technology*, 62, 1011–1031, (2002).

Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P., Challis, K., “Review of advanced composite structures for naval ships and submarines “, *Composite Structures*, 53(1), 647–656, (2001).

Neşer, G., Altunsaray, E., “Kıvrımsız cam elyafı / polyester kompozit sistemle üretilmiş, yapıştırılmalı ve cıvatalı bağlantıların denizel ortamdaki yorulma performanslarının deneysel verilerle karşılaştırması”, *I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu Ve Sergisi, İzmir-Turkey*, 297-298, (2006).

Oguma, H., Naito, K., “Effect of stress ratio on the fatigue fracture mechanism of adhesive single-lap joints: in case of GF/PP plates and an acrylic-based structural adhesive”, *Procedia Structural Integrity*, 19, 224-230, (2019).

Olajide, S.O., “Progress on investigation on damage analysis in bonded polymer composites under fatigue”, *International Journal of Fatigue*, 96, 224-236, (2017).

Olajide, S. O., Arhatari, B. D., “Recent progress on damage mechanisms in polymeric adhesively bonded high-performance composite joints under fatigue”, *International Journal of Fatigue*, 95, 45-63, (2017).

Pascoe J.A., “Zavatta, N., Troiani, E., Alderliesten, R.C., The effect of bond-line thickness on fatigue crack growth rate in adhesively bonded joints”, *Engineering Fracture Mechanics*, 229, (2020).

Peters, S.T. (Ed.), *Handbook of Composites*, London: Chapman&Hall, (1998).

Polat, S., Avci, A., Ekrem, M., “Fatigue behavior of composite to aluminum single lap joints reinforced with graphene doped nylon 66 nanofibers”, *Composite Structures*, 194, 624-632, (2018).

Ramesh, M., Palanikumar, K., Hemachandra Reddy, K., “Comparative Evaluation on Properties of Hybrid Glass Fiber-Sisal/Jute Reinforced Epoxy Composites”, *Procedia Engineering*, 51, 745-750, (2013).

Reis, P.N.B., Monteiro, J.F.R., Pereira, A.M., Ferreira, J.A.M., Costa, J.D.M., “Fatigue behaviour of epoxy-steel single lap joints under variable frequency”, *International Journal of Adhesion&Adhesives*, 63, 66–73, (2015).

Saraç, İ., Adin, H., Temiz, Ş., "Experimental determination of the static and fatigue strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles", *Composites Part B*, 155, 92-103, (2018).

Sassi, S., Tarfaoui, M., Yahia, H.B., “An investigation of in-plane dynamic behavior of adhesively-bonded composite joints under dynamic compression at high strain rate”, *Composite Structures*, 191, 168-179, (2018).

Schijve, J., *Fatigue of Structures and Materials.*, Amsterdam: Springer Science+Business Media, B.V., (2009).

Schneider, B., Beber, V.C., Schweer, J., Brede, M., Mayer, B., “An experimental investigation of the fatigue damage behaviour of adhesively bonded joints under the combined effect of variable amplitude stress and temperature variation”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, 41-49, (2018).

Sezgin, F.E., Tanoğlu, M., Eğilmez O.Ö., Aktaş, E., "Kompozit sandviç yapıların mekanik davranışları", *I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu Ve Sergisi*, İzmir-Turkey, 307-317, (2006).

Taib, A.A., Boukhili, R., Achiou, S., Gordon, S., Boukehili, H., “Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spewfillet and adherend stiffness on fracture”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26, 226–236, (2006).

Talreja, R., *Fatigue of Textile Composites.*, Cambridge: Elsevier’s Science & Technology., (2015).

Tang, J.H., Sridhar, I., Srikanth, N., “Static and fatigue failure analysis of adhesively bonded thick composite single lap joints”, *Composites Science and Technology*, 86, 18-25, (2013).

Tarfaoui, M., Moumen, A.E., “Dynamic behavior of top-hat bonded stiffened composite panels: Experimental characterization”, *Composites Part B: Engineering*, 149, 216-226, (2018).

Thevenet, D., Cre´ac’hcadec, R., Sohier, L., Cognard, J.Y., “Experimental analysis of the behavior of adhesively bonded joints under tensile/compression–shear cyclic loadings”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 44, 15-25, (2013).

Tsai, S.N., Carolan, D., Sprenger, S., Taylor, A.C., “Fracture and fatigue behaviour of carbon fibre composites with nanoparticle-sized fibres”, *Composite Structures*, 217, 143-149, (2019).

Tuncer, C., “CaCO₃, SiO₂ Ve Grafen Nano Partikül Katkısının Tabakalı Cam Elyaf Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2018).

Turan, K., “Kompozit malzemelerde yapışma bağlantılarının mukavemeti üzerine yama fiber takviye açısı etkisi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 7(1), 129-138, (2016).

Turan, K., Kaman, M.O., “Progressive Failure Analysis on the Single Lap Bonded Joints”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 315-323, (2010).

Tuttle, M.E., *Structural Analysis of Polymeric Composite Materials*, New York USA: Marcel Dekker Inc., (2004).

Türkmen, İ., Köksal, N.S., “Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (CTP) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının incelenmesi”, *C.B.U. Journal of Science*, 8(2), 17–30, (2013).

Ulçay, Y., Akyol M., Gemci, R., “Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1), 93-116, (2002).

Vedrtnam, A., “Novel method for improving fatigue behavior of carbon fiber reinforced epoxy composite”, *Composites Part B: Engineering*, 157, 305-321, (2019).

VijayKiran, B., Mallikarjuna Rao, K., LingaRaju, D., “An Investigation on Mechanical Properties of E-Glass Fiber reinforced Polymer Nanocomposites”, *Materials Today: Proceedings*, 18(7), 5454-5463, (2019).

Vinson, J.R., Sierakowski, R.L., *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, USA: Kluwer Academic Publishers, (2004).

Weitzenböck, J. (Ed.), *Adhesives in Marine Engineering*, Norway: Woodhead Publishing, 46-71,(2012).

Withers, G.J., Yu, Y., Khabashesku, V.N., Cercone, L., Hadjiev, V.G., “Souza, J.M., Davis, D.C., Improved mechanical properties of an epoxy glass–fiber composite reinforced with surface organomodified nanoclays”, *Composites: Part B*, 72, 175–182, (2015).

Yıldırım, K., Aydın, N., Köstem, M., Güçer, Ş., "Kompozit malzemelerde kalite kontrol: Mekanik performans testleri", *I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu Ve Sergisi*, İzmir-Turkey, 353-370, (2006).

Yoo, J.S., Truong, V.H., Park, M.Y., Choi, J.H., Kweon, J.H., “Parametric study on static and fatigue strength recovery of scarf-patch-repaired composite laminates”, *Composite Structures*, 140, 417-432, (2016).

Zor, M., Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler, (25.11.2019), http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf, (2018).

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çiğdem ERSAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli, 21.02.1977
Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi
Y. Lisans Üniversite (varsa) : Pamukkale Üniversitesi
Elektronik posta : cersan@pau.edu.tr
İletişim Adresi : PAÜ Müh. Fak. A Blok Makine Müh Böl

Yayımlar:

Ersan, Ç., Canyurt, O. C., "The effect of pentagonal and octagonal joint design on the fatigue strength of polymer-matrix composite materials", *Materiali in tehnologije*, 54 (1), 143-148, (2020).

Bildiriler:

Atalay, Ö., Ersan, Ç., "Investigation of the Effects of Mechanical Improvements on Drying Performance for Agricultural Drying Systems", *International Conference On Agriculture, Forest Food Sciences And Technologies*, Cappadocia-Turkey, (2017).

Projeler:

2014FBE039 – **Araştırmacı**, Kalın Dokuma Tip Kompozit Malzemelerin Dil Ve Oluk Birleştirme Tekniği İle Yapıştırmasında Yapışma Geometrisinin Yorulma Dayanımına Etkilerinin İncelenmesi, (2017).