

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYNAKLI VE YAPIŞTIRMALI
İNCE CİDARLI YAPILARIN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Efe IŞIK

Ekim, 2023
İZMİR

**KAYNAKLI VE YAPIŖTIRMALI
İNCE CİDARLI YAPILARIN MEKANİK
DAVRANIŖLARININ BELİRLENMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Programı

Efe IŖIK

Ekim, 2023

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

EFE IŞIK, tarafından PROF. DR. ÇİÇEK ÖZES yönetiminde hazırlanan “KAYNAKLI VE YAPIŞTIRMALI İNCE CİDARLI YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Çiçek ÖZES

Yönetici

Prof. Dr. Emine Çınar YENİ

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Sami SAYER

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Yeliz PEKBAY

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Ege Anıl DİLER

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Doktora ders aşamasında ve doktora tez çalışmamın tamamlanması sırasında, şahsıma her konuda yardımcı olan ve yol gösteren, sonsuz anlayışı ile bana destek olan, çalışmamın BAP projesi kapsamına dâhil edilmesini sağlayarak maddi kaynak yaratılmasını sağlayan danışmanım Sayın Prof. Dr. Çiçek ÖZES'e ve tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Emine Çınar YENİ'ye, Sayın Prof. Dr. Gökdeniz NEŞER'e ve Sayın Prof. Dr. Sami SAYER'e minnet ve şükranlarımı sunarım. Dokuz Eylül Üniversitesi'ne 2012.KB.FEN.112 aracılığı ile çalışmaya verdiği maddi destek için teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun iş tempomuz içinde doktora programına başlamamı destekleyen ve bu uzun süreç içinde sonsuz anlayış gösteren Sn. Korkut TAŞAN'a, süreç boyunca desteklerini esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma; Ercan GÜNERİ'ye (merhum), Cenk TARLI'ya, Onur AKKAŞ'a, Ahmet ALTAŞ'a, Servet ÖZTÜRK'e, Sedat TARAKÇI'ya, Onur ÖZBEK'e ve Serdar Kaan HORTOOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Bu projenin gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan yazılımları ve ekipmanları sağlayan ve kullanımlarına izin veren Tirsan Kardan A.Ş. firması yönetim kurulu başkanı Sn. Mehmet TİRYAKİ Bey'e ve diğer tüm yöneticilerime, çalışma arkadaşlarıma sonsuz şükranlarımı sunuyorum.

Hayatım boyunca bana her konuda madden ve manen destek olan, üzerime titreyen ve cesaretlendiren anneme, üzerimde büyük emeği olan anneanneme ve varlığı ile bana güç katan ablama teşekkürü borç bilirim. Varlıkları ile hayatıma anlam katan, bu zorlu süreçte sevgilerini esirgemeyen, beni her anlamda destekleyen, moral veren, cesaretlendiren ve yalnız bırakmayan eşime, kızıma ve oğluma teşekkür ediyorum.

Son olarak çalışmamı, hiç tanıma fırsatı bulamadığım ve küçük yaşta kaybettiğim rahmetli babam Muzaffer Levend IŞIK'a ve üzerimde çok büyük emeği bulunan ve bana rol model olan rahmetli dedem Muzaffer Kemal LEBLEBİCİOĞLU'na ithaf ediyorum. Her ikisinin de ruhları şâd, mekânları cennet olsun.

Efe IŞIK

KAYNAKLI VE YAPIŞTIRMALI İNCE CİDARLI YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

ÖZ

İnce cidarlı dairesel kesitli içi boş yapıların, otomotiv endüstrisinde, inşaat ve denizcilik sektörlerinin birçok alanında, tahrik milleri, motor valfleri, boru hatlarında ve çeşitli bileşenlerde yaygın olarak kullanımı günden güne artmaktadır. Maliyet ve ağırlık ekonomisi, yeni malzemelerin ve analiz yöntemlerinin geliştirilmesi gibi birçok faktör bu artışa katkıda bulunmaktadır. Otomotiv endüstrisinde de ince cidarlı dairesel kesitli boruların kullanımı hem maliyet açısından hem de hafiflik açısından büyük avantajları beraberinde getirmektedir. Günümüzde araçlarda aranan yüksek performans, yakıt verimliliği ve düşük karbon salınımı gibi çevreci özellikler, güç ve hareket aktarımı uygulamalarında alternatif düşük yoğunluğa karşı yüksek dayanım ve rijitlik sağlayan kompozit malzeme kullanımını da öne çıkarmaktadır.

Uygulamadan bağımsız olarak gerek ince cidarlı metal-metal bağlantısı olsun gerekse ince cidarlı metal-kompozit malzeme bağlantısı olsun, bağlantı bölgesi yapının en zayıf yönü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kara taşıtlarında güç aktarım elemanı olarak yaygın bir kullanıma sahip olan kardan millerinin bir alt kompleksi olan sabit kardan mafsalının bir parçası olan tüp çatal ile ince cidarlı boru bağlantısının uygulama örneği olarak seçildiği bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, ince cidarlı iki farklı çelik malzemenin bir katı hal birleştirme yöntemi olan sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilirliği ve kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ince cidarlı soğuk çekme dikişli boru ve mikro alaşımlı tüp çatal bağlantılarının statik burulma testi ile burulma yükü taşıma kapasiteleri, araç saha verilerinden hareket ile belirlenen farklı burulma yükü seviyelerinde tam değişken yorulma testleri yardımı ile de bağlantıların burulma yorulma davranışları belirlenmiştir.

İkinci aşamada ise sabit kardan mafsalının bir parçası olan t p atal ile ince cidarlı boru bağlantısını temsilen, çift bileşenli akrilik yapıştırıcı ile birleştirilen, alaşımsız ıslah çeliği kullanılarak üretilmiş olan dairesel kesite sahip içi boş bir boru (metal adaptör) ile filaman sarım tekniği kullanılarak üretilmiş olan karbon fiber takviyeli bir kompozit boru ele alınmıştır. Karbon fiber takviyeli kompozit borunun ve yapıştırma bağlantısının burulma yükü taşıma kapasiteleri nümerik yöntemler ile belirlenmiştir. İlaveten statik burulma testleri ile bağlantının burulma yükü taşıma kapasitesi, araç saha verilerinden hareket ile belirlenen farklı burulma yükü seviyelerinde gerçekleştirilen tam değişken yorulma testleri yardımı ile de bağlantıların burulma yorulma davranışları belirlenmiştir.

Sonuç olarak her iki bağlantı türü için elde edilen verilere göre, uygulamada kullanılan kaynaklı bağlantı tasarımı ile bu bağlantıya alternatif olarak kullanılabilecek kompozit-metal yapıştırma bağlantısının araç üzeri fonksiyonel performansı ve uygulama pratikleri kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı yapı, sürtünme kaynağı, karbon fiber takviyeli kompozit boru, yapıştırma bağlantısı, burulma dayanımı, burulma yorulma dayanımı.

DETERMINATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF THIN WALLED WELDED AND ADHESIVELY BONDED STRUCTURES

ABSTRACT

The widespread use of thin-walled circular cross-section hollow structures in drive shafts, engine valves, pipelines and various components in many areas of the automotive industry, construction and marine sectors is increasing day by day. Many factors contribute to this increase, such as cost and weight economies and the development of new materials and analysis methods. In the automotive industry, the use of thin-walled circular cross-section pipes brings great advantages in terms of both cost and light weight. The high performance, fuel efficiency and environmental features such as low carbon emissions required in today's vehicles also emphasize the use of composite materials that provide high strength and rigidity despite alternative low density in power and motion transmission applications.

Regardless of the application, whether it is a thin-walled metal-to-metal connection or a thin-walled metal-composite material connection, the connection region appears to be the weakest aspect of the structure.

This study, in which the thin-walled tube connection with the tube fork, which is a part of the fixed cardan joint, which is a sub-assembly of the cardan shafts, which are widely used as power transmission elements in land vehicles, is selected as an application example, consists of two stages. In the first stage, the weldability of two different thin-walled steel materials by friction welding, a solid-state joining method, and the mechanical properties of the welded joint were investigated. The torsional load carrying capacities of friction welded thin-walled cold drawn welded tube and micro alloy tube fork joints were determined by static torsion test and the torsional fatigue behavior of the joints were determined by full wave full alternating fatigue tests at different torsional load levels determined from vehicle field data.

In the second stage of this study, a hollow tube (metal adapter) of circular cross-section manufactured using unalloyed reclaimed steel, joined with two-component

acrylic adhesive, and a carbon fiber reinforced composite tube manufactured using filament winding technique, representing the connection between the tube fork, which is part of the fixed cardan joint, and the thin-walled tube. Torsional load carrying capacity of carbon fiber reinforced composite tube and adhesive joints are defined by numerical methods. In addition, the torsional load carrying capacities were determined by static torsion test, and the torsional fatigue behavior of the connections was determined with the help of bi-directional fatigue tests at a specific torsional load level which was derived from vehicle field data.

As a result, according to the data obtained for both connection types, the on-vehicle functional performance and application practices of welded connection design which is used in practice and the composite – metal adhesive connection that can be used as an alternative to welding were compared.

Keywords: Thin-walled structures, friction welding, carbon fiber reinforced composite tube, adhesive bonding connection, torsional strength, torsional fatigue strength.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER LİSTESİ	xiv
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Kardan Milinin Tarihçesi ve Tanımı	2
1.3 Tez Planı	6
BÖLÜM İKİ - KAYNAKLI BAĞLANTININ MEKANİK	
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	8
2.1 Sürtünme Kaynağı	8
2.2 Literatür İncelemesi	15
2.3 DeneySEL Çalışma	31
2.3.1 Sürtünme Kaynak Numuneleri, Üretimi ve Kullanılan Ekipmanlar	32
2.3.2 Deney Numunelerine ait Malzemelerin Özellikleri	34
2.3.3 Kaynaklı Bağlantının Makro ve Mikro Yapı Analizi	35
2.3.4 Kaynaklı Bağlantının Sertlik Dağılımı Analizi	39
2.3.5 Kaynaklı Bağlantının Çekme Dayanımı	40

2.3.6 Kaynaklı Bağlantının Burulma Yüğü Dayanımı.....	43
2.3.7 Kaynaklı Bağlantının Burulma Yorulma Dayanımı	47
2.3.8 Deneysel Çalışmaların Sonuçları	51

BÖLÜM ÜÇ - YAPIŞTIRMA BAĞLANTISININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ..... 54

3.1 Giriş ve Literatür İncelemesi	54
3.1.1 İnce Cidarlı Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Borular.....	62
3.1.2 Kompozit Boru – Metal Yapıştırma Bağlantısı	71
3.2 Kompozit Kardan Mili Üretim ve Test Süreçleri	79
3.2.1 Karbon fiber takviyeli kompozit boru üretimi	79
3.2.2 Kompozit kardan mili üretimi.....	83
3.2.3 Kompozit kardan mili testleri	85
3.2.4 Deneysel Çalışmaların Sonuçları	90

BÖLÜM DÖRT - SONUÇ 92

KAYNAKLAR..... 96

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Kardan milinin genel yapısı (kaynaklı bağlantı).....	4
Şekil 1.2 Kardan milinin genel yapısı (yapıştırma bağlantısı).....	4
Şekil 1.3 Sabit kardan mafsallı ve kaynaklı bağlantı	5
Şekil 1.4 Kompozit boru-adaptör yapıştırma bağlantısı	5
Şekil 2.1 Sürtünme kaynağı yöntemi temel adımları (ANSI/AWS C6-1, 1989).....	9
Şekil 2.2 Sürekli tahrikli proses parametreleri (ANSI/AWS C6-, 1989).....	10
Şekil 2.3 Volanlı tip proses parametreleri (ANSI/AWS C6-1, 1989).....	11
Şekil 2.4 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı makinası	32
Şekil 2.5 Kardan mili numuneleri	33
Şekil 2.6 İnce cidarlı soğuk çekilmiş dikişli borunun içyapısı.....	35
Şekil 2.7 Mikro alaşımlı çelik kullanılarak üretilen tüp çatalın içyapısı.....	35
Şekil 2.8 Sürtünme kaynaklı bağlantının makro yapısı (Işık ve Özes, 2016).....	36
Şekil 2.9 Sürtünme kaynaklı bağlantının kesit görüntüsü (Işık ve Özes, 2015)	36
Şekil 2.10. Kaynak bölgesinin mikro yapısı (Işık ve Özes, 2016).....	38
Şekil 2.11 Kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı (Işık ve Özes, 2016).....	40
Şekil 2.12 Çekme testi sonrasında numunelerin genel görünümü	41
Şekil 2.13 Gevrek kırılma karakterine sahip kaynaklı bağlantı	41
Şekil 2.14 Çekme testi gerilme – gerinim grafiği	42
Şekil 2.15 Statik torsiyon test cihazının şematik gösterimi	43
Şekil 2.16 Statik torsiyon testi sonrası numunelerin genel görünümü.....	44
Şekil 2.17 Statik torsiyon testi sonrası hasar görmeyen kaynaklı bağlantılar.....	44
Şekil 2.18 Statik torsiyon testi burulma momenti – açısal deformasyon eğrileri	45
Şekil 2.19 Statik torsiyon testi sonuçlarının istatistiksel analizi (%90).....	46
Şekil 2.20 Statik torsiyon testi sonuçlarının istatistiksel analizi (%95).....	46
Şekil 2.21 Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılması (± 124 MPa).....	49
Şekil 2.22 Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılması (± 82 MPa).....	49
Şekil 2.23 Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılması (± 72 MPa).....	50
Şekil 2.24 Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılması (± 56 MPa).....	50
Şekil 2.25 Yorulma testi gerilme – çevrim sayısı grafiği	51

Şekil 3.1 Filaman sarım makinası şematik gösterimi (Quanjin vd., 2018).....	65
Şekil 3.2 Sarım şekilleri; a çevresel, b helisel, c kutupsal (Asyraf vd., 2022).....	65
Şekil 3.3 İleri kompozit modelleme modülü iş akışı	67
Şekil 3.4 Kompozit boruya ait nümerik model	69
Şekil 3.5 Zamana bağlı şekil değiştirme grafiği	69
Şekil 3.6 Kompozit boruya ait nümerik analiz sonuçları.....	69
Şekil 3.7 Yapıştırma bağlantısı formları (Banae, Da Silva, 2008).....	72
Şekil 3.8 Yapıştırıcıya ait çekme – ayrılma grafiği (3M, 2020)	74
Şekil 3.9 Yapıştırıcı bağlantısı nümerik modeli ve ağ yapısı.....	76
Şekil 3.10 Nümerik analiz sonucu ve zamana bağlı şekil değiştirme grafiği	77
Şekil 3.11 Yapıştırma boyu – kopma torku grafiği.....	78
Şekil 3.12 Yapıştırıcı kalınlığı – kopma torku grafiği	78
Şekil 3.13 Filaman sarım makinası (Compo Tech Plus, 2023).....	79
Şekil 3.14 Karbon fiber takviyeli kompozit boru numuneleri	80
Şekil 3.15 Karbon fiber takviyeli kompozit boru kesit görüntüsü.....	80
Şekil 3.16 Kompozit boru mikroyapı kesitleri.....	82
Şekil 3.17 Kompozit boru yüzde karbon fiber oranı.....	82
Şekil 3.18 Metal adaptöre ait boyutsal özellikler.....	83
Şekil 3.19 Kompozit boru iç çap yapıştırıcı uygulama	84
Şekil 3.20 Metal adaptör dış çap yapıştırıcı uygulama	84
Şekil 3.21 Üretimi tamamlanan kompozit kardan mili	85
Şekil 3.22 Kompozit kardan milinin statik torsiyon cihazına bağlantı şekli.....	86
Şekil 3.23 Statik torsiyon testi burulma momenti – açısal deformasyon eğrileri	87
Şekil 3.24 Statik torsiyon testi sonrası kardan mili birim parçalarının durumu.....	87
Şekil 3.25 Statik torsiyon testi sonuçlarının istatistiksel analizi (%90).....	88
Şekil 3.26 Statik torsiyon testi sonuçlarının istatistiksel analizi (%95).....	88
Şekil 3.27 Yorulma testi sonrası kardan mili birim parçalarının durumu.....	90

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Sürtünme kaynak parametreleri.....	33
Tablo 2.2 Ana malzemelerin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).....	34
Tablo 2.3 Sürtünme kaynak bağlantıların çekme dayanımları	42
Tablo 2.4 Kaynaklı bağlantının statik torsiyon test sonuçları.....	45
Tablo 2.5 Tam değişken torsiyonel yorulma testleri test sonuçları	48
Tablo 3.1 Karbon fiber ve epoksi malzemelere ait mekanik özellikler	66
Tablo 3.2 Karbon fiber takviyeli kompozit boruya ait boyutsal özellikler.....	67
Tablo 3.3 Kompozit boruya ait fiber sarım yönleri ve katman sıralaması.....	67
Tablo 3.4 Kompozit boruya ait mekanik özellikler	68
Tablo 3.5 Burulma burkulması sonuçlarının karşılaştırma	70
Tablo 3.6 Yapıştırıcı malzeme özellikleri ve test yöntemleri (3M, 2020).....	75
Tablo 3.7 TS EN ISO 683-1 C45 E malzeme özellikleri.....	76
Tablo 3.8 3M DP 460 Yapısal yapıştırıcıya ait malzeme özellikleri	77
Tablo 3.9 Karbon fiber takviyeli kompozit boru teknik verileri.....	81
Tablo 3.10 Kompozit boru fiber, reçine ve boşluk oranları.....	82
Tablo 3.11 Statik torsiyon testi sonuçları.....	86
Tablo 3.12 Tam değişken torsiyonel yorulma testi sonuçları	89

KISALTMALAR

ISO	: International Organization for Standardization
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EN	: European Norm
CZM	: Cohesive Zone Method
TS	: Türk Standartları
ANSI	: American Iron and Steel Institute
AWS	: American Welding Standard
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
ANOVA	: Analysis of Variance
HSS	: High Speed Steel
HV	: Hardness Vickers
SEM	: Scanning Electron Microscope
EDAX	: Energy – Dispersive X-ray Spectroscopy
PAN	: Polyacrylonitrile
TZM	: Titanium Zirconium Molybdenum
BWRA	: British Welding Research Association
SUS	: Stainless Usage Steel
EDM	: Electrical Discharge Machining

SEMBOLLER LİSTESİ

n	: Dönüş hızı (devir / dakika)
R_s	: Zamana bağlı sürtünme basıncı (MPa/sn)
R_u	: Zamana bağlı yığma basıncı (MPa/sn)
X_U	: Yığma miktarı (mm)
$T_{Burkulma}$	: Torsiyonel (burulma) burkulma dayanımı (Nm)
L	: Bindirme boyu (mm)
E_1	: Eksenel yöndeki elastisite modülü (GPa)
E_2	: Yanal yöndeki elastisite modülü (GPa)
G_{12}	: Fiber yönündeki kayma modülü (GPa)
t	: Yapıştırıcı kalınlığı (mm)
D	: Kompozit boruya ait ortalama çap (mm)
σ_c	: Kritik hasar başlangıç noktası (MPa)
δ_c	: Kritik hasar başlangıç noktasındaki deplasman (mm)
R_0	: Kütle yoğunluk (t/mm^3)
EN	: Yapıştırıcının düzlemin normaline ait katılık (MPa)
ET	: Yapıştırıcı düzlemindeki katılık (MPa)
GI_c	: Mod I kırılma enerjisi (N/mm)
GII_c	: Mod II kırılma enerjisi (N/mm)
$GIII_c$	: Mod III kırılma enerjisi (N/mm)
T	: Normal doğrultudaki maksimum çekme (MPa)
S	: Teğetsel doğrultudaki maksimum çekme (MPa)
UND	: Normal yöndeki maksimum deplasman (mm)

UDT : Teğetsel yöndeki maksimum deplasman (mm)

ρ : Özkütle (kg/m^3)



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Dairesel kesitli ince cidarlı silindirik yapılar, uçak, gemi ve köprülerden, petrol kulelerine, endüstriyel binalardan, kıyı ötesi platformlara, hafif ticari ve ağır ticari araçlardan denizaltılarda yapısal elemanlara kadar değişen uygulama alanları ile mühendislik yapılarında büyüyen bir öneme sahiptir. Maliyet ve ağırlık ekonomisi, yeni malzemeler ve güçlü analiz yöntemlerinin geliştirilmesi gibi faktörlerin etkisi bu büyümeye katkıda bulunmaktadır.

Otomotiv endüstrisi de artan rekabet ve yoğun fiyat baskısı nedeniyle araç başına düşen maliyetleri düşürmek ve aracı hafifleterek egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla ince cidarlı yapıların kullanımını tercih etmektedir.

İnce cidarlı yapıların cidar kalınlığı kullanılan bağlantı yönteminin çalışma ömrü üzerindeki etkisi büyüktür. Uygulamadan bağımsız olarak ister ince cidarlı metal-metal bağlantısı olsun ister ince cidarlı metal-kompozit malzeme bağlantısı olsun, bağlantı bölgesi yapının en zayıf yönü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez kapsamında ince cidarlı dairese yapı uygulama örneği, kara taşıtlarında güç aktarma elemanı olarak görev yapan kardan milinin bir alt kompleksi olan sabit kardan mafsalının bir parçası olan tüp çatal ile boru bağlantısı ile ele alınmıştır.

İlk aşamada iki farklı malzemeden oluşan, mikro alaşımlı tüp çatal ve soğuk çekme dikişli borunun bir katı hal birleştirme yöntemi olan sürtünme kaynağı tekniği ile kaynak edilebilirliği incelenmiş, bağlantı bölgesinin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca kaynak dikişinin sertlik dağılımı ve mikro yapı özellikleri hem kendi içinde hem de ana malzeme ile kıyaslanmıştır. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ince cidarlı mikro alaşımlı tüp çatal ve soğuk çekme dikişli borun bağlantılarının burulma yükü taşıma kapasitesi, statik burulma testi ile bağlantıların burulma yorulma davranışı ise

araç saha verilerinden hareket ile belirlenen farklı burulma yükü seviyelerinde tam değişken yorulma testleri yardımı ile belirlenmiştir.

Günümüzde araçlarda aranan yüksek performans, yakıt verimliliği ve düşük karbon salınımı gibi çevreci özellikler, güç ve hareket aktarımı uygulamalarında alternatif düşük yoğunluğa karşın yüksek dayanım ve rijitlik sağlayan kompozit malzeme kullanımını da öne çıkarmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın ikinci aşamasında karbon fiber takviyeli olarak üretilen ince cidarlı kompozit bir boru, tüp çatalı temsilen tasarlanan bir adaptör ile yapıştırılmalı olarak bağlanmıştır. Nümerik yöntemler kullanılarak hem karbon fiber takviyeli kompozit borunun hem de yapıştırma bağlantısının burulma yükü taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Bu çalışmalara ilave olarak gerçekleştirilen statik burulma testleri ile bağlantının burulma yükü taşıma kapasitesi, araç saha verilerinden hareket ile belirlenen burulma yükleri ile gerçekleştirilen tam değişken yorulma testleri ile bağlantının burulma yorulma davranışı belirlenmiştir.

Sonuç olarak her iki bağlantı türü için elde edilen verilere göre, uygulamada yaygın olarak kullanılan kaynaklı bağlantı ile kaynaklı bağlantıya alternatif olarak kullanılabilcek kompozit-metal yapıştırma bağlantısı teknik özellikler bakımından karşılaştırılmıştır.

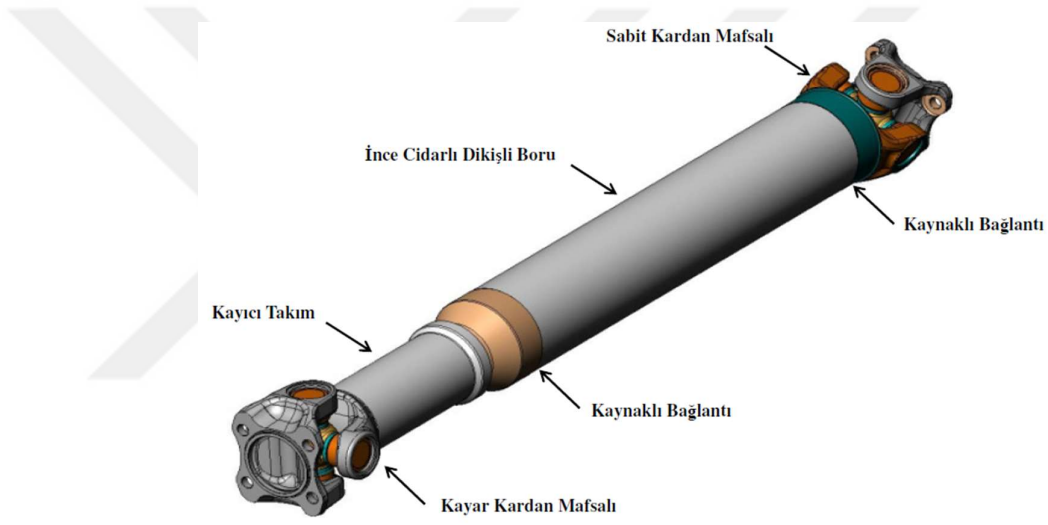
1.2 Kardan Milinin Tarihçesi ve Tanımı

Mafsallı yapılar ile ilgili en eski bilgiler milattan önce 230 yıllarına Bizanslı Philon'un mafsallı yapılanmalar yardımı ile hareket ettirilen buhurdanlık ve mürekkep kabı anlatımlarına dayanır. Daha sonraları kardan mafsalı Milattan sonra 1245 yılında Fransız mimar Villard Honnecourt tarafından tanımlanmış, dairesel halka yapılanmaları kullanarak astığı küçük küresel profile sahip fırınları resmetmesi ile tanınmıştır. İç içe yerleştirilmiş halkaların kendi eksenleri etrafında dönme ve salınım hareketi ile ilgili ilk çalışmalar ise 16. yüzyılda İtalyan matematikçi Gerolamo Cardano tarafından gerçekleştirilmiştir. 1550 yılında yayınladığı “De armillarum instrumento” adlı kitabında birbirlerine göre 90° açısız pozisyonda konumlandırılmış üç serbestlik

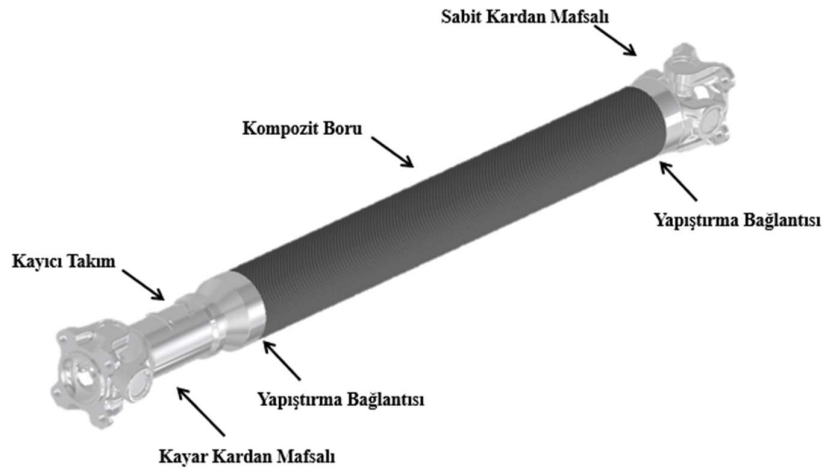
derecesine sahip salınım yapan jiroskop benzeri halka yapılanmalarını anlatmıştır. Bu yapılanma Cardano'nun ölümünün ardından kardan mafsalı olarak anılmıştır ve farklı açısız pozisyonlarda dönme hareketinin iletimi sorununa bir çözüm olabileceği görülmüştür. 17. yüzyılda fizikçi Robert Hooke da benzer halka yapılanmaları ve açısız hareket iletimi üzerine çalışmış ve patentler almıştır. Hooke üzerinde çalıştığı mafsız yapılanmasını bir makinaya uyarlayan ilk bilim adamlarından biridir. Cardano ve Hooke'un çalışmaları kardan mili ve alt birleşenleri üzerine yapılan çalışmaların önünü açmıştır. Yıllar içinde Gaspard Monge, Jean-Victor Poncelet gibi birçok bilim adamı kardan mafsalı teorisi, uygulamaları ve kardan mafsalı kaynaklı hız düzgünsüzlüklerinin giderilmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirmiştir. 20. yüzyılın başı itibari ile farklı özelliklere sahip, kardan mafsalı kaynaklı hız düzgünsüzlükleri azaltılmış ya da ortadan kaldırılmış farklı çözümler başta otomotiv, havacılık, ziraat olmak üzere medikal, gıda, tekstil vb. endüstrilerde de yaygın kullanılmaya başlanmıştır. (Seherr-Thoss, Schmelz, Aucktor, 2006)

Binek otomobil, hafif ticari ve ağır ticari araçlarda, güç kaynağında ya da motorda üretilen gücün vites kutusu üzerinden diferansiyele aktarılması için bir bağlantı miline ya da aktarma organına ihtiyaç duyulmaktadır. Temelde bağlantı mili ya da aktarma organı tipik bir aracın aktarma organı yerleşiminde burulmaya çalışan elastik eleman olarak görev yapmakta ve basitçe kendisine kıyasla çok büyük eylemsizlik momentine sahip olan elemanlar arasında burulma yayı görevini üstlenmektedir. Daha açık bir tanımlama yapılması gerekirse motor tarafından üretilen ve vites kutusu üzerinden iletilen güç sonucu ortaya çıkan döndürme momentini ve döndürme hareketini, sabit ya da değişken açısız pozisyonlarda bir şafttan diğerine ya da diferansiyele iletirken arka aksın hareketinden kaynaklanan eksenel hareketleri de karşılayan yapılanmaya kardan mili adı verilir (Işık, 2009). Çoğu araç uygulamasında kardan milleri, soğuk çekilmiş hassas dikişli boru ile kaynaklı olarak birleştirilmiş bir ya da birden fazla kardan mafsızının bir araya getirilmesiyle oluşturulur (Şekil 1.1). Fakat gelişen teknoloji ve yeni malzemelerin kullanımının yaygınlaşması, karbon fiber ya da cam elyaf takviyeli boruların kardan mafsalları ile yapıştırmalı olarak birleştirilmesini de mümkün kılmaktadır (Şekil 1.2).

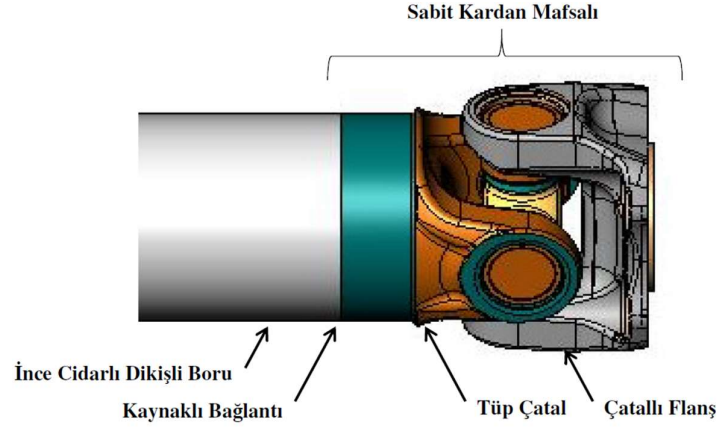
Diğer yandan kardana mil, fonksiyonunu yerine getirirken şok burulma yüklerinin yanı sıra statik ve dinamik burulma yüklerine de maruz kalmaktadır. Kardan milinin servis ömrünün belirlenmesinde, kardan mafsallarının dayanıklılığının yanı sıra ince cidarlı soğuk çekilmiş dikişsiz boru ile kardan mafsalları oluşturan parçalar arasındaki kaynaklı bağlantının dayanıklılığı, kompozit boru kullanılarak üretilen kardan millerinde ise yapıştırma bağlantılarının dayanıklılığı önemli bir rol oynar. Şekil 1.3 sabit kardan mafsallında boru ve tüp çatal kaynak bağlantı bölgesini gösterirken Şekil 1.4 ise kompozit boru tüp çatal yapıştırma bağlantısını göstermektedir.



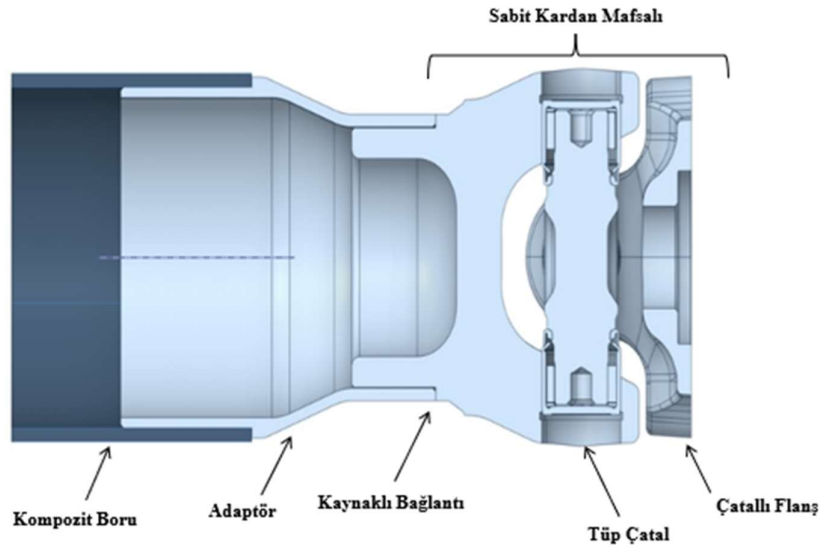
Şekil 1.1 Kardan milinin genel yapısı (kaynaklı bağlantı)



Şekil 1.2 Kardan milinin genel yapısı (yapıştırma bağlantısı)



Şekil 1.3 Sabit kardan mafsalı ve kaynaklı bağlantı



Şekil 1.4 Kompozit boru-adaptör yapıştırma bağlantısı

Günümüzde araçlarda aranan yüksek performans, yakıt verimliliği ve düşük karbon salınımı gibi çevreci özelliklere ulaşmak güç ve hareket aktarımı uygulamalarında yeni malzemelerin kullanımı ile mümkündür. Modern makinelerin yapımı da geleneksel malzemelere kıyasla daha yüksek özgül mukavemet ve sertliğe sahip yeni malzemelerin uygulanmasını gerektirir. Bu kriterler ise ancak darbe dayanımı, özgül mukavemeti, yorulma, titreşim ve akustik yüklere karşı direnç değerleri bilinen metal ve alaşımların değerlerinden daha yüksek olan kompozit malzemelerin kullanımı ile sağlanabilmektedir (Djordjević, Blagojević, Vulović, Nikolić, Jovanović, 2017). Bu mekanik özellikler bileşenlerin seçimine, bunların miktarına ve malzeme içindeki

oryantasyona bağı olarak değışebilir. İy mekanik özelliklerinden dolayı, transmisyon millerinin imalatında kompozit malzemeler giderek daha fazla kullanılmaktadır. Sabit kardan mafsasında kompozit boru ve metal t p  atal bağılantısı Şekil bağıının uygulama g      nden dolayı genellikle yapıştırmalı olarak yapılmaktadır. Bu konuda yapılan  alışmalar Bölüm 3'te özetlenmiştir.

1.3 Tez Planı

Sunulan tez aşağıdaki Şekilde düzenlenmiş dört bölümden oluşmaktadır:

- Birinci bölümde, tezin amaç ve kapsamı üzerinde durulmuş, kardan milinin tarihçesi ve tanımı ile ilgili bilgi verilmiştir.
- İkinci bölümde, bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynağı ile ilgili bilgilere yer verilmiş, ince cidarlı yapıların kaynak edilebilirliğı, mekanik dayanımı ve metalografik muayenesi özelinde ulusal ve uluslararası alanda gerçekleştirilen çalışmalar özetlenerek literatür taraması sunulmuştur. Literatür taramasının sunumunu takiben ince cidarlı boru ile t p  atal arasında gerçekleştirilen sürtünme kaynaklı bağılantının mekanik dayanımının belirlenmesi için ihtiyaç duyulan numunelerin üretimi, numunelerin mekanik karakterizasyonu, kardan milinin üretimi ve komple kardan milleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar anlatılarak elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.
-     nc  bölümde, karbon fiber takviyeli kompozit boru- t p  atal yapıştırma bağılantısının mekanik özelliklerinin belirlenmesi ama ı ile yapıştırma bağılantıları ile ilgili bilgilere yer verilmiş, kompozit-metal yapıştırma bağılantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi özelinde ulusal ve uluslararası alanda gerçekleştirilen çalışmalar özetlenerek literatür taraması sunulmuştur. Literatür taramasını takiben karbon fiber takviyeli kompozit borunun ve kompozit boru – metal parça arasındaki yapıştırma bağılantısının nümerik yöntemler yardımı ile burulma yükü taşıma kapasitesinin nasıl

belirlendiği, ardından yapıştırma bağlantısına sahip kardan millerinin üretim yöntemi ve komple kardan milleri ile yürütölen deneysel çalışmalar anlatılarak, elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

- Dördüncü bölümde ise ikinci ve üçüncü bölümde elde edilen sonuçlar ışığında her iki uygulamanın uygulanabilirlik, maliyet ve dayanıklılık açısından karşılaştırılması yapılmıştır.



BÖLÜM İKİ

KAYNAKLI BAĞLANTININ MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ

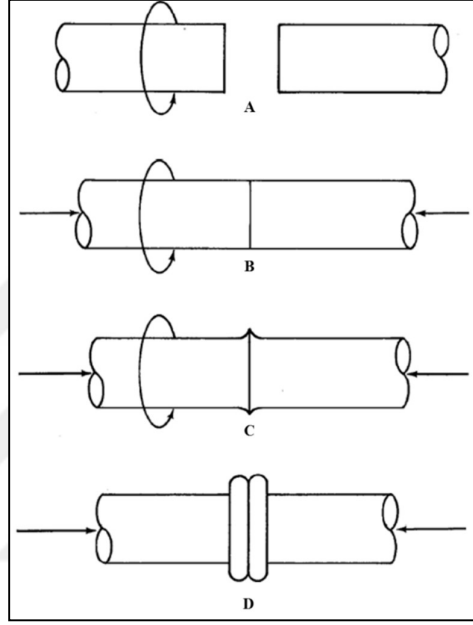
2.1 Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı, bir katı hal kaynak tekniği olarak farklı uygulama alanlarında demir ve / veya demir dışı malzemelerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir kaynak yöntemidir.

Sürtünme kaynağının geçmişi, proses ile ilgili olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde alınan ilk patentin tarihi olan 1891 yılına kadar uzanmaktadır. Bu patent, sürtünme ısısının çelik halat uçlarının kaynak edilebilmesi için kullanımını kapsamaktadır (ANSI/AWS C6-1, 1989). Daha sonraki yıllarda konu ile ilgili olarak 1924 yılında İngiltere'de ve Sovyetler Birliğinde birer patent alınmıştır. 1929 yılında ise konu ile ilgili olarak W. Richter Almanya'da DE 477084 C no'lu patenti almıştır. Ticari sürecin gelişimi ve bilimsel çalışmaların hızlanması Rus makinist AJ. Chdikov'un iki metal çubuğu başarılı şekilde kaynak etmiş ve bu çalışmasını takiben 106207 no'lu patenti almıştır. 1941 ve 1944 yıllarında İngiltere'de konu ile ilgili bir grup çalışma yapılarak patent alınmıştır. 1960 yılında American Machine and Foundary Co. firmasındaki araştırmacılar sürtünme kaynağı parametreleri üzerinde çalışma yapmışlardır. 1961 yılında ilk sürtünme kaynak makinası İngiltere'de Ulusal Kaynak Araştırma Enstitüsü'nde (BWRA) üretilmiştir. 10 beygirlik bir motor ile tahrik edilen makinanın 64 mm² 'lik kaynak kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. 1962 yılında ise Amerika Birleşik Devletleri'nde Caterpillar Tractor Co. firması sürtünme kaynağı makinası üzerinde değişiklik yaparak volanlı sürtünme kaynağı makinasını geliştirmiştir (Ersözlü, 2011).

Bu kaynak yönteminde, ısı üretmek için birbirlerine göre hareket ve temas halinde olan iş parçaları bir bası kuvveti altında birleştirilmekte ve fazla malzeme kalıcı olarak temas halindeki kaynak bölgesinden uzaklaştırılmaktadır.

Kaynak teline, elektrik akısına ve koruyucu gaz kullanımına bu kaynak yönteminde ihtiyaç duyulmamaktadır (ANSI/AWS C6-1, 1989). Üretimde kullanılan sürtünme kaynağı yöntemi, özellikle dairesel kesitli iş parçaları için geliştirilmiş otomatik bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemin temel adımları Şekil 2.1’de açıklanmıştır.



Şekil 2.1 Sürtünme kaynağı yöntemi temel adımları (ANSI/AWS C6-1, 1989)

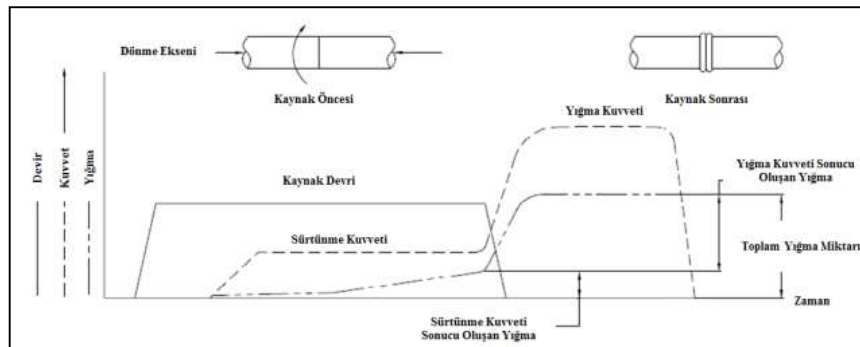
Sürtünme kaynak işleminin ilk adımında kaynak edilecek iş parçalarından biri döndürülürken diğeri sabit bir şekilde tutulur (Şekil 2.1 – A). İkinci adımda her iki iş parçası birbirlerine yaklaştırılarak belirli bir sürtünme kuvveti ile temas ettirilir (Şekil 2.1 – B). Üçüncü aşamada ise kaynak edilecek iş parçalarının birbirlerine belirli bir kuvvet ile temas ettirilmesi ile plastik deformasyon sonucunda boyda kısalma yani yığılma başlar. Yığılma ile birlikte fazla malzeme kaynak bölgesinden uzaklaşır ve kaynak çapağını oluşturur (Şekil 2.1 – C). Son aşamada ise dönen iş parçası aniden durdurulurken diğeri iş parçası dönen iş parçasına yığılma kuvveti adı verilen kuvvet ile eksenel yönde bastırılır ve yığılma işleminin tamamlanması ile kaynak sonlandırılır (Şekil 2.1 – D) (ANSI/AWS C6-1, 1989).

Günümüzde iki temel sürtünme kaynağı yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar, sürekli tahrikli (direct drive) sürtünme kaynağı yöntemi ve volanlı tipi (inertia) sürtünme kaynağı yöntemidir.

Sürekli tahrikli (direct drive) sürtünme kaynağı yöntemi, endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen katı hal kaynak yöntemlerinden biridir. Bu kaynak yönteminde dönen iş parçası, sabit haldeki iş parçasına eksenel olarak uygulanan bir sürtünme basıncı ile sabit ya da değişken devirlerde temas ettirilerek parça yüzeylerinde ısı oluşumu sağlanır. Yeterli miktarda ısı oluşuncaya kadar kaynak bölgesine enerji verilmeye devam edilir. İhtiyaç duyulan enerji seviyesine ulaşıldığında, dönen parça aniden durdurulur ve daha önceden belirlenmiş süre boyunca eksenel olarak yığma basıncı uygulanır (Şahin ve Akata, 2003). Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı işlemi süresince ana kaynak parametrelerinde meydana gelen değişiklikler Şekil 2.2’de görülmektedir.

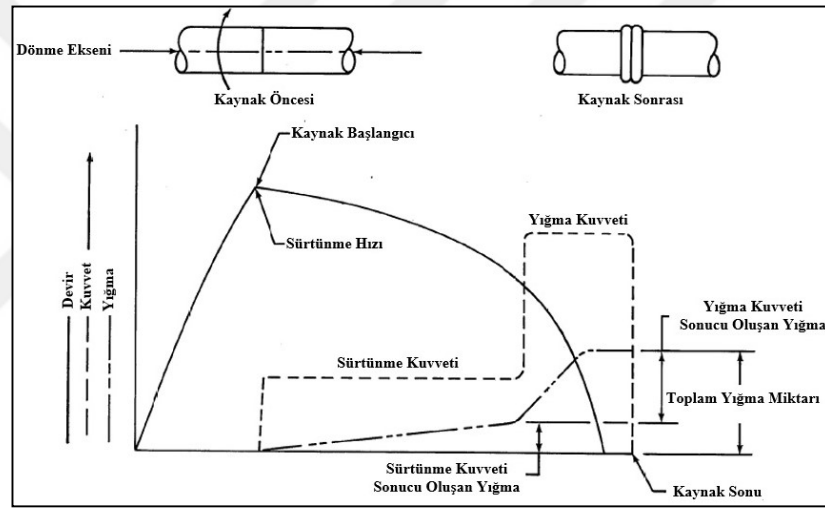
Volanlı tip sürtünme kaynağı yönteminde ise dönen iş parçası ana tahrik mili ve bağlantı aynası aracılığı ile dönen bir volana bağlanırken, sabit haldeki iş parçası bir mengene aracılığı ile sabitlenir. Volan, sürtünme kaynağı işlemi öncesinde kaynak için ihtiyaç duyulan enerjiyi depolamak amacı ile önceden belirlenen bir hızda döndürülür.

Kaynak için ihtiyaç duyulan enerjinin sağlandığı çevresel hız değerine ulaşıldıktan sonra volan kendisini döndüren elektrik motorundan kavrama yardımı ile ayrılır.



Şekil 2.2 Sürekli tahrikli proses parametreleri (ANSI/AWS C6-, 1989)

Ardından iş parçalarının alın yüzeyleri birbirlerine kaynak için ihtiyaç duyulan eksenel sürtünme kuvveti ile temas ettirilerek kaynak bölgesinde ısı oluşması sağlanır. Bu sırada volanda depolanan kinetik enerji sürtünme ile ısı enerjisine çevrildiği için iş parçalarının teması sonrasında volan yavaşlamaya başlar. Volan durmadan önce sürtünme basıncı artırılarak yığma basıncı uygulanır ve volan durduktan sonra da önceden belirlenmiş bir süre boyunca yığma basıncı uygulanmaya devam edilir. Volanlı tip sürtünme kaynağı prosesi süresince ana kaynak parametrelerinde meydana gelen değişiklikler Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 Volanlı tip proses parametreleri (ANSI/AWS C6-1, 1989)

Yukarıda belirtilen yöntemlere ilave olarak lineer titreşimli, açısıl hareketli, radyal hareketli ve yörünge hareketli sürtünme kaynak yöntemleri de bulunmaktadır.

Sürtünme kaynağı, birçok girdisi ve çıktısı olan, kaynak kalitesinin kaynak parametreleri ile yakından ilişkili olduğu bir kaynak yöntemidir (Sathiya, Aravindan ve Haq, 2006). Dönme hızı (devir), sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi, yığma süresi ve yığma miktarı kaliteli kaynak dikişlerinin elde edilmesi için hassas ve doğru biçimde tanımlanması gereken önemli süreç parametreleridir.

Dönme hızı, kaynaklı bağlantının kalitesi üzerindeki en etkili parametredir. Dönme hızı ITAB genişliğine etki eder. Yüksek dönme hızı ara yüzey sıcaklığına doğrudan

etki ederek kaynak dikişinin kalitesini belirler. Dönme hızı arttırılarak deformasyon hızı dolayısıyla kaynak hızı arttırılabilmektedir. Kullanılan malzeme cinsine ve geometrisine göre dönme hızı seçilmelidir. Çelikler için dönme hızının 1,2 m/sn ile 1,8 m/sn arasında tutulması önerilmektedir (Kırık, 2012).

Sürtünme basıncı, kaynak edilmesi planlanan iş parçasının geometrisine ve malzeme çiftinin plastik şekil değiştirme yeteneğine göre belirlenen bir parametredir. Sürtünme basıncı, iş parçalarının temas eden yüzeylerindeki oksit tabakalarını, yağ, kir, tufal vb. tabakaları yok etmeli, yüzeylerin homojen ısınmasını sağlayacak seviyede seçilmelidir. Ancak hızlı ısı enerjisi girişi ve yüksek basınç ITAB bölgesinin genişlemesine neden olur. Bu da beraberinde kaynak bölgesinden malzeme çıkışını hızlandırabilir (Kırık, 2012).

Sürtünmesi süresi, kaynağı yapılacak olan malzemelerin ihtiyaç duyduğu ısı gereksinimine göre belirlenen bir parametredir. Kaynağı yapılacak olan malzemenin cinsine göre değişkenlik göstermektedir. Sürtünme süresinin uzun tutulması, ITAB bölgesinin genişlemesine neden olurken kaynak bölgesinden uzaklaşan malzeme miktarının artmasına yani yığma miktarının artmasına neden olmaktadır.

Yığma basıncı, malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır. Sürtünme sonrası malzemeler arasındaki difüzyonu hızlandırmak amacı ile uygulanır. Yığma basıncı değerinin yüksek seçilmesi durumunda aşırı metal deformasyonu oluşabilir ve kaynak hattında istenmeyen akışların meydana gelmesine neden olabilir. Bu tip yapılar kaynağın kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz yönde etkiler. Yığma basıncının, paslanmaz çelikler için sürtünme basıncının iki katı seçilmesi önerilmektedir (Kırık, 2012). Karbonlu çelikler için de yığma basıncının sürtünme basıncının iki katı olarak seçilmesi önerilmektedir (ANSI/AWS C6-1, 1989).

Yığma süresi, kaynak edilecek malzemelerde ihtiyaç duyulan plastik deformasyonu yaratmak ve difüzyonu hızlandırmak için uygulanan yığma basıncının uygulama süresidir. Kaynak edilecek malzemenin çapına göre sürtünme süresinin iki katı olacak şekilde hesaplanması ve uygulanması önerilmektedir (Kırık, 2012).

Sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak hem dairesel hem de dairesel olmayan kesitlere sahip benzer ya da farklı malzemeler uygun parametreler kullanılarak kaynatılabilir de birçok uygulamada dairesel kesitli içi dolu ya da içi boş parçaların kaynak edilmesi önerilmektedir. Bu sayede kaynak hattı boyunca ısı akışı dengelenmekte, kaynak çapaklarının alınmasının talep edildiği durumlarda proses rahatlatılmakta ve kaynak çapağı dibinde ortaya çıkması muhtemel çentik etkisi azaltılmaktadır (ANSI/AWS C6-1, 1989).

Sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak benzer ve farklı malzemeler kaynak edilebilir. Özellikle farklı termik ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin kaynağı bu yöntem kullanılarak rahatlıkla yapılabilir. Kaynağı yapılacak olan malzemeler sıcak şekilde değiştirme kabiliyetine sahip olmalı, eksenel basınç altında ve dönme momenti karşısında aşırı deformasyona uğramamalıdır (Ersözlü, 2011). Düşük ve orta karbonlu çelikler, yüksek alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, takım çelikleri, farklı türde çeliklerin kombinasyonları, demir ve demir dışı metaller, demir dışı metallerin kombinasyonları, alüminyum, titanyum, magnezyum ve bakır alaşımları bu yöntem kullanılarak kaynak edilebilirler.

Sürtünme kaynağı kullanımının sağladığı avantajlardan bazıları aşağıdaki gibidir:

- Kaynak bölgesindeki mikro yapısal değişikliklerin az olması,
- Isı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) daraltılabilmesi,
- Kaynak dikişi mukavemetinin ana malzeme mukavemetine yakın ya da ana malzeme mukavemetinden daha fazla olması,
- Benzer olmayan malzemelerin kaynak edilebilmesi,
- Bir katı hal kaynak tekniği olması sebebi ile gözenek ve gaz delikleri gibi kaynak hataların görülmemesi (ANSI/AWS C6-1, 1989),
- Kaynak için dolgu teli, temizleme maddesi, koruyucu gaz, kaynak tozu ve benzeri eleman kullanımına gerek olmaması (Ersözlü, 2011).
- Kaynak sonrası çarpılma, şekil değişimi olmaması (Ersözlü, 2011).
- Hassas eksenel hizalama ve minimum düzeyde çarpılma (ANSI/AWS C6-1, 1989),

- Dönme eksenine göre iyi açısal oryantasyon kontrolü (ANSI/AWS C6-1, 1989),
- Proses parametrelerinin hassas kontrolü ve izlenebilirliği (ANSI/AWS C6-1, 1989),
- Düşük çevrim süresi ve yüksek üretkenlik,
- Düşük enerji, işçilik ve malzeme sarfıyatı.

Sürtünme kaynağı kullanımının yarattığı dezavantajlar ise aşağıdaki gibidir (Ersozlu,2011):

- İş parçalarına ait kesitler dairesel ve döndürülebilir büyüklükte olmalıdır.
- İş parçası kaynak sırasında uygulanan kuvvetlere dayanıklı olmalıdır.
- Kaynak işlemini gerçekleştirecek olan teçhizat şok yüklere dayanıklı olmalıdır.
- Sürtünme kaynak makinalarının ilk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Kaynak işlemi sırasında, sürtünme yüzeyinde bulunan ve sürtünmeyi önleyen kav, hadde ve döküm tabakaları ile kalın oksit tabakaları, kaplamalar, yağlayıcılar kaynak öncesi kaynak edilecek yüzeyden uzaklaştırılmalıdır.

Kaynak ağzı bölgesine su verilmiş malzemeler, yumuşatma tavlamasına tabi tutulduktan sonra kaynak edilebilirken, sertleştirilmiş malzemelerin kaynağı ise ancak sertleştirilmiş tabaka kaynak sırasında ortadan kaldırılabilir incelikle olması durumunda gerçekleştirilebilmektedir.

2.2 Literatür İncelemesi

Literatürde sürtünme kaynağı işlemi, işlem parametreleri, işlem parametrelerinin optimizasyonu, işlem parametrelerinin kaynaklı bağlantının kalitesi üzerindeki etkisi ve sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş yapıların dayanımı ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar benzer malzemelerin kaynaklı bağlantısının karakterizasyonunun yanı sıra farklı malzemelerin kaynaklı bağlantısına ait karakterizasyon çalışmalarını da kapsamaktadır.

Şahin ve Akata (2002), aynı kimyasal kompozisyona sahip farklı çap ve kalınlıktaki dairesel kesitli çelik yapıları sürtünme kaynağı ile birleştirmek amacı ile deneysel bir düzenek tasarlamış ve kurmuştur. Çalışmada aynı kimyasal kompozisyona sahip olan eşit çaplı ya da farklı çaplarda şekillendirilmiş dairesel kesitli çelik yapılar, farklı proses parametreleri kullanılarak kaynak edilmiş ve proses parametrelerinin kaynaklı bağlantı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Diğer yandan kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenmiş ve ana malzemeye ait değerler ile kıyaslanmıştır. Kaynaklı bağlantı boyunca sertlik taraması ve mikro yapı incelemesi de çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda aynı çapa sahip çelik yapılar için belirlenen sürtünme kaynak parametrelerinin farklı çap ve kalınlığa sahip çelik yapıların sürtünme kaynak işleminde kullanılamayacağı belirlenmiştir. Kaynaklı bağlantının çekme dayanımının parça kalınlığının artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Yatay ekseninde kaynak hattı boyunca gerçekleştirilen sertlik taramasında kaynak merkezinde sertlik değerinin arttığı görülmüştür. Kaynak hattı boyunca düşey ekseninde yapılan sertlik taramasında ise sertlik artışı gözlemlenmemiştir. Hızlı soğuma etkisi ile kaynak hattında ortaya çıkan yüksek sertlik değerlerinin, kaynaklı bağlantının mekanik dayanımı azalttığı görülmüştür. Mikro yapı incelemeleri sonucunda ise kaynak hattı boyunca sertlik artışına neden olan ve kırılgenlik yaratan martenzit yapı tespit edilmiştir. Son olarak yapılan çalışma sonucunda, kaynağı yapılacak iş parçalarının kaynak işlemi öncesi kalıcı olarak şekillendirilmesinin kaynak dayanımı üzerinde etkisinin bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

Şahin (2005), aynı çapa sahip dairesel kesitli çelik yapıları sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirmek için kendi tasarladığı sürekli tahrikli sürtünme kaynağı prensibi ile çalışan otomatik ayarlı deneysel bir düzenek kullanmıştır. Deneysel çalışmada yüksek hız çeliği (HSS – S 6-5-2) ve orta karbonlu ıslah çeliği (AISI 1040) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle optimum kaynak parametreleri belirlenmiş ve ardından sürtünme kaynağı sonrasında kaynaklı bağlantı 650 °C sıcaklıkta dört saat boyunca ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında bağlantının dayanımı çekme, yorulma ve çentik darbe testleri belirlenmiş ve elde edilen değerler ana malzeme değerleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca kaynaklı bağlantı boyunca sertlik taraması ve mikro yapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yönteminin farklı çelik ve metallerin kaynak işleminde kullanılabileceği görülmüştür. Kaynaklı bağlantının çekme dayanımının, optimum kaynak parametreleri kullanılarak AISI 1040 çeliğinin çekme dayanımına yakın olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantının yorulma dayanımı özelliklerinin de çekme dayanımı özellikleri ile benzerlik taşıdığı sonucuna varılmıştır. Mikro ve makro yapı incelemeleri sonucunda sürtünme kaynağı sırasında bağlantının AISI 1040 çeliği tarafında dekarburizasyon tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantının en zayıf halkası bu nokta olmasına karşın bağlantının çekme dayanımının orijinal malzemeye yakın seviyeye ulaştığı görülmüştür. Buna ilaveten, dekarburizasyon nedeni ile kaynak ara yüzünün AISI 1040 tarafında sertlik değerinde düşüş görülmüştür. Diğer yandan kaynak sonrası uygulanacak yumuşatma tavlama ile kaynaklı bağlantı boyunca sertlik değerlerinin düşürülebileceği gözlemlenmiştir.

Satyanarayana, Reddy ve Mohandas (2005), sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemini kullanarak östenitik ferritik farklı paslanmaz çeliklerin kaynak edilebilirliği ile ilgili bir inceleme çalışması yürütmüşlerdir. Bu çalışma kapsamında sürtünme kaynağı parametre optimizasyonu, mikro yapı mekanik özellik ilişkilendirilmesi ve kaynak dikişinin kırılma davranışı üzerinde araştırma yapılmıştır. Çalışma sonucunda sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak farklı paslanmaz çeliklerin kaynak edilebildiği görülmüştür. Kaynak dikişinin mekanik özelliklerinin ferritik paslanmaz çeliğin ana malzemesinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Sürtünme kaynağının en önemli parametrelerinden biri olan yığıma basıncının artırılması sonucunda kaynak bölgesinde ince tane oluşumu gözlemlendiği belirtilmiştir. Diğer yanda yüksek sürtünme basıncının ise tane irileşmesine neden olduğu tespit edilmiştir. Yine bu çalışma kapsamında, istatistiksel analiz çalışmaları sonucunda elde edilen regresyon denklemi yardımıyla kaynak bölgesinin çekme dayanımının, sertliğinin ve çentik darbe tokluğunun proses parametreleri cinsinden ifade edilebileceği çıkarımı yapılmıştır.

Özdemir (2005), AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ile AISI 4340 çelik malzemeleri beş farklı dönme hızı kullanarak sürtünme kaynağı birleştirmiştir. Çalışma kapsamında, dönme hızının kaynak dikişinin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Isı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) mikro yapısı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Kaynak dikişinin mikro sertlik taraması kaynak eksenine boyunca ve kaynak eksenine dik olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kaynak dikişinin dayanımı çekme testleri yardımı ile belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonunda sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ile AISI 4340 çeliğinin kaynatılabileceği tespit edilmiştir. Yüksek dönüş hızı ve düşük sürtünme basıncı kullanılarak yapılan kaynakların mekanik dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Sathiya, Aravindan ve Haq (2006), sürtünme kaynağı parametrelerinin optimizasyonu ve kaynak parametrelerinin kaynak dikişinin çoklu performans özellikleri (çekme dayanımı ve malzeme kaybı) üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmanın temel amacı, kaynak dikişinin çekme dayanımını artırırken malzeme kaybını en aza indirmektir. Taguchi yöntemi temel alınarak bir deney planı tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemeler başarı ile kaynatılmıştır. Sürtünme kaynağı yöntemi ile elde edilen kaynak dikişlerinin çekme dayanımının ve metalürjik özelliklerinin, gazaltı kaynağı yöntemi kullanılarak elde edilen kaynak dikişlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Diğer yandan kaynak sırasında birbirine sürtünen yüzeylerde meydana gelen ağır kalıcı deformasyon nedeni ile kaynak

dikişinde ince taneli yapının oluştuğu görülmüştür. Test edilen tüm kaynaklı bağlantılarda malzeme kaybı eğiliminin sürtünme süresinin arttırılması ile artış gösterdiği belirlenmiştir.

Şahin (2007), sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklere ait kaynaklı bağlantıların dayanımını ve mikro yapı özelliklerini deneysel yöntemler kullanarak araştırmıştır. Öncelikle farklı kaynak parametreleri kullanılarak kaynak denemeleri gerçekleştirilmiş ve optimum parametreler istatistiksel yaklaşım kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Ardından kaynaklı bağlantının dayanımı çekme, yorulma ve çentik darbe testleri ile belirlenmiş ve sonuçlar ana malzemeye ait test sonuçları ile kıyaslanmıştır. Kaynak dikişi boyunca ortaya çıkan sertlik dağılımı ve mikro yapı da incelenmiş ve elde edilen sonuçlar önceki çalışmalara ait sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda östenitik paslanmaz çeliklerin sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak edilebildiği tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantıya ait çekme mukavemetinin sürtünme zamanı ve basıncı ile arttığını ancak en yüksek değere ulaştıktan sonra aşırı miktardaki sürtünme kuvveti ve sürtünme zamanı ile azaldığı görülmüştür. Kaynaklı bağlantının çekme dayanımının, ana malzemenin çekme dayanımından %4 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantının yorulma dayanımının ise çekme dayanımı sonuçları ile benzer özellikler göstermekte olduğu belirlenmiştir. Kaynaklı bağlantının, ana malzemenin yorulma dayanımına çok yakın yorulma dayanımı özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer yandan çentik darbe tokluğu değerinin ise ana malzemeye ait çentik darbe tokluğu değerinden 2 kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Şahin, Akata ve Gülmez (2007), AISI 1040 kalite düşük karbonlu çelik malzemeleri sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanarak birleştirmiş ve kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında eşit çaplı malzemeler ile kaynak denemeleri gerçekleştirilmiş ve optimum parametreler tespit edilmiştir. Ardından kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri çekme testi, yorulma testi, çentik darbe testi ve sertlik testleri ile belirlenmiştir. Kaynaklı bağlantının çekme dayanımının, ana malzemenin çekme dayanımından %4 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantının yorulma dayanımının ise çekme dayanımı sonuçları

ile benzer özellikler göstermekte olduğu belirlenmiştir. Kaynaklı bağlantının, ana malzemenin yorulma dayanımına çok yakın yorulma dayanımı özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer yandan çentik darbe tokluğu değerinin ise ana malzemeye ait çentik darbe tokluğu değeri ile aynı olduğu görülmüştür. Kaynak eksenini boyunca yatay doğrultuda gerçekleştirilen sertlik taraması sonrasında en yüksek sertlik değerinin kaynak hattında ortaya çıktığı, kaynak eksenine dik doğrultuda gerçekleştirilen sertlik taramasında ise en yüksek sertlik değerinin dış çapa yakın bölgelerde ortaya çıkmakta olduğu tespit edilmiştir. Ara yüzde meydana gelen bu sertlik artışının, kaynak sırasında ortaya çıkan kalıcı deformasyon sonucunda tanelerin küçülmesi nedeni ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu nedenle deformasyon miktarındaki artışın kaynak hattındaki sertliği arttıracak sonucuna varılmıştır.

Sathiya, Aravindan ve Haq (2008), sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemini kullanarak benzer kimyasal kompozisyona ve aynı çap ölçülerine sahip dairesel kesitli östenitik paslanmaz ve ferritik paslanmaz çelik numunelerinin kaynak edilebilirliğini araştırmışlardır. Kaynaklı bağlantının dayanımı tek eksenli çekme testi, çentik darbe testi ve sertlik taraması testleri ile belirlenmeye çalışılmış ve bağlantının mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında kaynaklı bağlantının çekme dayanımı, tokluğu, sertlik değerleri ve mikro yapısı ana malzemeye ait değerler ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelikler ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerin başarı ile kaynak edilebildiği görülmüştür. AISI 304 kalite numuneler kullanılarak oluşturulan kaynak dikişlerine ait dayanım değerlerinin ana malzemeye ait dayanım değerlerine çok yakın olduğu görülmüş ve kaynak sırasında sürtünme süresinin artırılması ile bağlantı dayanımının düştüğü tespit edilmiştir. Buna ilaveten sürtünme süresi artırılarak kaynak bölgesinde sertliğin arttırılabildiği belirlenmiştir. AISI 430 kalite numuneler kullanılarak oluşturulan kaynak dikişlerine ait dayanım değerlerinin ana malzemeye ait dayanım değerlerinden %5 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında kaynaklı bağlantının tokluğunun ise kaynak bölgesindeki tane boyutundaki küçülme nedeni ile gazaltı kaynağı ile birleştirilmiş numunelere göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir.

Ananthapadmanaban, Rao, Abraham ve Prasad Rao (2009), sürtünme kaynağı yöntemi ile farklı proses parametreleri kullanılarak birleştirilmiş düşük karbonlu ve paslanmaz elik malzemelerin kaynak bölgesinde ortaya çıkan mekanik özelliklerdeki değişimleri incelemişlerdir. Çalışma kapsamında kaynaklı bağlantıya ait akma dayanımı, çekme dayanımı, yüzde uzama değeri ve kaynak hattı boyunca ortaya çıkan sertlik değişkenlikleri raporlanmıştır. Kaynak hattının bütünlüğü ise optik mikroskop ve elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda farklı kimyasal kompozisyonlara sahip olan çeliklerin sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak başarı ile kaynak edilebildiği grlmştir. Kaynaklı bağlantının dayanımının iyi, sünekliğinin ise kabul edilebilir seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Kaynağı yapılacak olan çeliklerin kimyasal kompozisyonunun kaynak bölgesinin özellikleri üzerinde etkin rol oynamakta olduğu raporlanmıştır. Tüm bunlara ilaveten ısı tesiri altındaki bölgenin ve yeniden kristalleşme bölgesinin karakterizasyonu, sürtünme kaynak parametrelerinin optimizasyonu için gelecekte çalışma yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

elik ve Ersözlü (2009), orta karbonlu düşük alaşımlı AISI 4140 kalite elik ile orta karbonlu AISI 1050 kalite elik malzemeyi sürtünme kaynağı yöntemi kullanarak başarı ile kaynatmıştır. Çalışma kapsamında kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri, makro ve mikro yapısı incelenmiştir. Kaynaklı bağlantının mekanik dayanımından hareket ile optimum proses parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmalara ilaveten kaynak sırasında kaynak bölgesindeki sıcaklık değişimleri kızılötesi sıcaklık ölçer ile ölçülmüş ve farklı proses parametrelerinin kaynak bölgesi sıcaklığına olan etkisi gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda AISI 4140 ve AISI 1050 kalite elik çubukların sürtünme kaynağı yöntemi ile başarı ile kaynak edilebildiği grlmştir. Gerçekleştirilen ekme testleri sonrasında kaynaklı bağlantının çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımına oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgesi boyunca gerçekleştirilen sertlik taramasında en yüksek sertlik değeri, AISI 4140 kalite malzeme tarafında kaynak hattından 1 mm uzakta 600 HV olarak tespit edilmiştir. Optik mikroskop ve elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen içyapı analizlerinde kaynak hattı boyunca süreksizliğe rastlanmamış ve ısı tesiri altında kalan bölgelerde tane incelmesi grlmştir.

Taban, Gould ve Lippold (2010), volanlı tip sürtünme kaynağı yöntemini kullanarak 6061 T6 kalite alüminyum malzeme ile AISI 1018 kalite malzemeyi birleştirmişlerdir. Kaynaklı bağlantının kalitesi, mekanik testler ve metalürjik testler gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Bağlantının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme ve eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında kırılma yüzeyleri elektron mikroskobu yardımı ile incelenmiş ve karakterize edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonrasında volanlı tip sürtünme kaynağı kullanılarak alüminyum ve çelik malzemenin kaynak edilebildiği görülmüştür. Yığma basıncı 60 MPa olarak gerçekleştirilen kaynakların en yüksek çekme dayanımına, 250 MPa, sahip olduğu tespit edilmiştir. Mekanik test numunelerine ait kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan incelemede kırılmaların kaynak ara yüzüne komşu kalıcı deformasyona uğramış alüminyum malzeme tarafında gerçekleştiği görülmüştür.

Rafi, Ram, Phanikumar ve Rao (2010), proses parametrelerinin AA7075-T6 kalite alüminyum dolu millere ait kaynaklı bağlantıların mikro yapısı ve çekme dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Dış çapı 13 mm olan içi dolu alüminyum numune miller, farklı proses parametreleri kullanılarak kaynak edilmiş ve numuneler kaynak sonrasında çekme testine, sertlik taramasına ve mikro yapı incelemesine tabi tutulmuşlardır. Yapılan çalışmalar sonrasında kaynaklı bağlantıların tamamının çekme dayanımının ana malzeme çekme dayanımından %11 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dönme hızı, sürtünme basıncı ve yığma miktarının kaynaklı bağlantının kalitesini ve dayanımını etkileyen en önemli proses parametreleri olduğu belirlenmiştir. 2000 devir / dakika hızda, 114 MPa sürtünme, 152 MPa yığma basıncı ve 4 mm yığma miktarı kullanılarak yapılan kaynakların en yüksek çekme dayanımına (558 MPa) sahip olduğu görülmüştür.

Paventhana, Lakshminarayanan ve Balasubramanian (2011), sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak edilen orta karbonlu çelik ve paslanmaz çelik malzemelerin oluşturduğu kaynaklı bağlantının yorulma davranışı üzerinde çalışma yapmışlardır. Kaynaklı bağlantıların oluşturulabilmesi amacıyla 12 mm çapında orta karbonlu çelik ve AISI 304 kalite çelik çubuklar kullanılmıştır. Kaynaklı bağlantının oluşturulabilmesi için ise sabit hızlı sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi

kullanılmıştır. Bağlantıların yorulma ömrü, dönen eğilmeli yorulma testleri gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Yorulma testleri sonrasında çentikli ve çentiksiz numunelere ait S-N eğrileri çizilmiştir. Kaynaklı bağlantıya ait Basquin sabitleri, yorulma dayanımları, yorulma çentik faktörü ve çentik hassasiyeti faktörü çıkarılmıştır. Eş zamanlı olarak Paventhan, Lakshminarayanan ve Balasubramanian (2011) kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarını bağlantıların mikro yapısı, mikro sertlikleri ve çekme dayanımları ile ilişkilendirmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda farklı malzemelerin kaynak edilmesi ile elde edilen kaynaklı bağlantının yorulma dayanımının, ana malzemelerin yorulma dayanımlarına göre daha düşük olduğu ortaya çıkarılmıştır. Kaynaklı bağlantının yorulma dayanımının orta karbonlu çelik malzemeye göre %30, östenitik paslanmaz çelik malzemeye göre ise %40 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Farklı malzemelerin kaynak edilmesi ile elde edilen kaynaklı bağlantıların yorulma çentik faktörünün, ana malzemelere ait faktörler ile kıyaslandığında oldukça büyük olduğu görülmüştür. Kaynaklı bağlantının çentik darbe dayanımının orta karbonlu çelik malzemeye göre %70, östenitik paslanmaz çelik malzemeye göre %50 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu fark, kaynaklı bağlantıların ana malzemelere göre çok düşük yorulma dayanımı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan çentikli yorulma testi sonuçları, kaynaklı bağlantının çentik etkisine ana malzemelere göre çok daha hassas olduğunu göstermektedir. Kaynak hattı boyunca oluşan krom karbür gibi inter metalik yapıların kaynaklı bağlantının daha düşük çekme, darbe ve yorulma dayanımına sahip olmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Chander, Reddy, Rao (2012), kaynak devir hızının sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak edilen AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik ile AISI 4140 kalite çelik malzemenin oluşturduğu kaynaklı bağlantı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Özellikle kaynak devrinin kaynaklı bağlantının mikro yapısı, sertlik, çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı ve darbe tokluğu gibi mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar, kaynak bölgelerindeki sertlik dağılımının, kaynak ara yüzünün ana malzemelere oranla daha sert bir yapı gösterdiğini ortaya koymuştur. Genel olarak maksimum sertlik değerlerinin paslanmaz çelik tarafında ortaya çıktığı görülmüştür. Diğer maksimum sertlik değerlerinin ise

düşük alaşımlı çelik yapı tarafında ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Kaynak ara yüzüne yakın bölgelerde paslanmaz çelik ve düşük alaşımlı çelik tarafında tespit edilen maksimum sertlik değerlerinin azalan kaynak devir hızı ile artış gösterdiği görülmüştür. Çekme testine tabi tutulan tüm kaynaklı bağlantı numunelerinin, kaynak ara yüzü yakınında, paslanmaz çelik malzeme tarafından kırıldığı gözlemlenmiştir. Kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarının ise ana malzemeye ait çekme dayanımlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kaynaklı bağlantının çentik darbe dayanımı ve darbe tokluğunun 1500 devir / dakika kaynak devir hızına kadar artış gösterdiği ancak sonrasında düştüğü tespit edilmiştir. Kaynak sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık, kaynak ara yüzüne yakın bölgelerde düşük alaşımlı çelik malzeme tarafında dekarbürizasyona neden olarak bu bölgedeki dayanımı azaltmaktadır. Bunun sonucunda, her iki malzeme arasında oluşan ayrışma tabakası, kaynak ara yüzü yakınında düşük alaşımlı çelik malzeme tarafında ortaya çıkmaktadır.

Kimura, Ichihara, Kusaka ve Kaizu (2012), sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmiş ince cidarlı dairesel kesitli AISI 310S kalite östenitik paslanmaz çelik borulara ait kaynaklı bağlantıların özelliklerini incelemişlerdir. Aynı et kalınlığına ancak farklı dış çap ölçülerine sahip boru kombinasyonları elektromanyetik kavrama sistemine sahip bir sürekli tahrikli sürtünme kaynağı tezgâhı yardımı ile kaynak edilmiştir. 1,5 mm et kalınlığına sahip paslanmaz çelik boruların kaynak işlemi 120 MPa sürtünme basıncı kullanılarak başarı ile gerçekleştirilmiştir. 0,5 mm et kalınlığına sahip olan paslanmaz çelik borular ise 30 MPa sürtünme basıncı kullanılarak başarı ile kaynak edilebilmiş ancak kaynak dikişinin dayanımı ana malzeme dayanımı seviyelerine çıkarılamamıştır. Bunun üzerine sürtünme süresi 0,6 sn ve vurma basıncı 60 MPa ile kaynak denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler kullanılarak 0,5 mm et kalınlığına sahip paslanmaz çelik borulara ait kaynak dikişinin dayanımı, ana malzeme dayanımı seviyelerine çekilebilmiştir. Ancak aynı et kalınlığına sahip borular, 120 MPa vurma basıncı ile kaynak edilmeye çalışıldığında borular burkulmaya uğradığı için kaynak işlemi gerçekleştirilememiştir. Yapılan çalışma sonucunda yazarlar, 0,5 mm et kalınlığına sahip paslanmaz çelik boruların kaynağını, 30 MPa sürtünme basıncı, 0,6 sn. sürtünme süresi ve 60 MPa yığma basıncı ile başarı ile gerçekleştirebilmişlerdir.

Shu-de, Jian-guang, Yu-mei, Zan ve Li (2012), sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak edilen dairesel kesitli halka şeklindeki komponentlerin kaynak işlemi sırasındaki malzeme akışlarını ve çapak oluşumlarını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yedi farklı proses parametresi denemesi gerçekleştirilmiştir. Sürtünme süresinin, sürtünme basıncının ve dönme hızının sürtünme yüzeyindeki malzeme akış davranışı ve kaynak çapak oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırma sonuçları yüksek sıcaklığın ve yüksek eksenel basıncın malzeme akış hızını arttırmakta olduğunu göstermektedir. Diğer yandan dönme hızı, sürtünme süresi ve sürtünme basıncının artırılması ile kaynak çapak oluşumunun hızlandığı, çapak miktarının ve çapak eğilme açısının arttığı gözlemlenmiştir. Yazarlar çalışma kapsamında dış çapı 80 mm ve et kalınlığı 15 mm olan çelik komponentlerin kaynak parametrelerini deneme üretimi yardımı ile belirlemiş ve en uygun kaynak parametrelerinin sırasıyla 100 MPa sürtünme basıncı, 4 sn. sürtünme süresi ve 1600 devir / dakika kaynak devri olduğunu tespit etmişlerdir.

Mitelea, Budău ve Crăciunescu (2012), yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuş benzer olmayan çeliklerin sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilirliğini araştırmıştır. Araştırma kapsamında indüksiyon ile sertleştirilmiş çelikler, ıslah edilmiş çelikler, sementasyon ve nitrasyon ile yüzeyi sertleştirilmiş çelikler ile birleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda sertleştirilmiş yüzeyin kaynak ara yüzünden uzaklaştırılabilmesi için kaynak sırasında daha yüksek eksenel kuvvetlere ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmiştir. İndüksiyon ile sertleştirilmiş C55 kalite çelik ile ıslah edilmiş C45 çelik malzemelerin kaynak işlemi sırasında sürtünme basıncının 200 MPa üzerine çıkarılması halinde kaynak hattının merkezinde süreksizlik oluşumu eğiliminin ortaya çıktığı deneysel olarak tespit edilmiştir. Termokimyasal işlemler ile yüzeyi sertleştirilmiş olan çeliklerin kaynak edilebilirliğin kaynak yüzeylerinde bulunan sertleştirilmiş kabuk yapıdan etkilendiği görülmüştür. Kaynak sırasında kaynak çapağı ile kaynak hattından uzaklaştırılamayan sertleştirilmiş kabuk yapının kaynağın sürekliliğini etkilediği gözlemlenmiştir. Diğer yandan eksenel basıncın artırılması ile sertleştirilmiş kabuk yapının kaynak hattında uzaklaştırılabileceği ve kaynak hattı boyunca makro ve mikro hataların oluşumunun engellenebileceği tespit edilmiştir. İndüksiyon ile sertleştirilmiş 34CrNiMo5 kalite çelik malzeme ile

sementasyon işlemi yardımıyla yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 16MnCr5 kalite çelik malzemenin kaynak işlemi sırasında, malzeme yüzeylerinde bulunan sertleştirilmiş kabuk yapının kaynak hattında 4,5 mm'lik yığma miktarı ile uzaklaştırılamadığı tespit edilmiştir. Bu malzemelerin kaynak edilebilmesi için yığma miktarının minimum 6 mm, sürtünme ve yığma basıncının ise sırasıyla 300 MPa ve 400 MPa olması gerektiği belirlenmiştir. Diğer yandan indüksiyon ile yüzeyi sertleştirilmiş C55 kalite çelik malzeme ile nitrürleme işlemi yüzeyi sertleştirilmiş olan C45 kalite malzemenin kaynak işlemi sırasında, nitrür tabakasının işlem sırasında dönme yönündeki sürtünmeyi azalttığı tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantıların sürtünme ve yığma basıncından bağımsız olarak iyi mekanik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Kaynak işlemi sırasında yığma miktarının 6 mm olarak ayarlanması durumunda kaynak hattından nitrür tabakasının uzaklaştırılabileceği görülmüştür.

Selvamani ve Palanikumar (2013), 12 mm çapa sahip AISI 1035 kalite çelik çubukların sürtünme kaynak parametrelerinin optimizasyonu amacıyla çalışma yapmışlardır. Farklı kaynak parametre kombinasyonları kullanılarak kaynak edilen numuneler daha sonra çekme testine tabi tutulmuştur. Kaynaklı bağlantıların kopma dayanımı, çentik kopma dayanımı ve yüzde uzama değeri gibi mekanik özelliklerinin ön görülebilmesi için ampirik formüller oluşturulmuş ve oluşturulan modeller testler ile doğrulanmıştır. Farklı proses parametreleri kullanılarak kaynak edilen numunelere ait çekme dayanımı özellikleri, mikro sertlik değerleri, mikro yapıları, SEM ve EDAX analizleri de çalışma kapsamında sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda yazarlar geliştirilen ampirik formülleri kullanarak AISI 1035 kalite çelik çubukların mekanik özelliklerini %95 güvenilirlik aralığında tahmin edilebileceğini tespit etmişlerdir. Dönme hızının, yığma ve sürtünme basıncına göre kaynaklı bağlantıların çekme dayanımı üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Kaynak sırasında dönen iş parçası tarafındaki ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin sabit haldeki iş parçası tarafındaki ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yine aynı bölgede kaynak bölgesinin sertliğinin ana malzemenin sertliğine göre %59,7 artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Kumar ve Balasubramanian (2013), oksidasyon direnci, korozyon direnci ve sürünme direnci yüksek, buhar kazanları ve buhar türbini uygulamalarında kullanılan SUS 304HCu östenitik paslanmaz çelik boruların sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi ile kaynak edilebilirliğini araştırmışlardır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, optimize edilen parametreler kullanılarak kaynak edilen boru bağlantılarının mikro yapı incelemesi ve çekme dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak SUS 304HCu kalite östenitik paslanmaz çelik boruların sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak edilebildiği tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantının çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımının %98'ine ulaştığı gözlemlenmiştir. Kaynak hattı boyunca gerçekleştirilen sertlik taramasında en yüksek sertlik değerinin 187 HV olarak kaynak hattında ortaya çıktığı görülmüştür. En düşük sertlik değerinin ise kaynak hattı boyunca tamamıyla plastik deformasyona uğramış bölgede 157 HV olarak tespit edilmiştir. Dinamik rekristalizasyon bölgesinin yüksek miktardaki deformasyon hızı nedeni ile kaynak hattında ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Çekme numunelerindeki kırılmaların ise kaynak hattında ya da kaynak hattına yakın bölgelerde kesme benzeri kırılma şeklinde ortaya çıktığı görülmüştür.

Mercan, Aydın ve Özdemir (2015), AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik ile düşük karbonlu AISI 1020 kalite çeliğin farklı proses parametreleri kullanılarak sürtünme kaynağı yöntemi ile kaynak edilebilirliğini araştırmışlardır. Gerçekleştirilen çalışma ile kaynaklı bağlantıların çekme dayanımı ve yorulma dayanımı tespit edilmiş ve kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantıların mikro yapısı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda AISI 2205 kalite dubleks paslanmaz çelik ile düşük karbonlu AISI 1020 kalite çeliğin sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak başarı ile kaynak edilebildiği tespit edilmiştir. 1.300 devir/dakika dönme hızı, 8 saniye sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 4 saniye yığma süresi ve 100 MPa yığma basıncı parametreleri kullanılarak kaynak edilen numunelerin en yüksek çekme dayanımına (633,790 MPa) sahip olduğu tespit edilmiştir. 1.300 devir/dakika dönme hızı, 4 saniye sürtünme süresi, 30 MPa sürtünme basıncı, 2 saniye yığma süresi ve 60 MPa yığma basıncı parametreleri kullanılarak kaynak edilen numunelerin ise en düşük çekme dayanımına (487,674 MPa) sahip olduğu tespit edilmiştir. Doğru kaynak parametreleri seçildiğinde kaynaklı bağlantının

çekme dayanımının, ana malzeme çekme dayanımından (610,780 MPa) daha yüksek olabileceği görülmüştür. 1500 devir/dakika, 30MPa sürtünme basıncı ve 4 saniye sürtünme süresi parametreleri kullanılarak üretilen kaynaklı bağlantıların en yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda Mercan ve arkadaşları, yüksek dönme hızı, düşük sürtünme basıncı ve sürtünme süresi ile kaynak edilen numunelerin daha yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu çıkarımını yapmışlardır. Diğer yandan 1500 devir/dakika dönme hızı ve iki farklı sürtünme basıncı (30 MPa ve 50 MPa) kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemi sonrasında kaynaklı bağlantının çekme dayanımının ve yorulma ömrünün artan sürtünme süresi ile azaldığı tespit edilmiştir.

Sarsılmaz, Kırık ve Batı (2017), çalışmaları kapsamında sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilen AISI 2205 paslanmaz çelik (ferritik / östenitik) ile Armor 500 zırh çelikleri arasındaki kaynaklı bağlantının özelliklerini incelemiş ve farkı kaynak parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların özellikleri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi gibi önemli kaynak parametreleri değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonunda AISI 2205 paslanmaz çelik malzeme ile Armor 500 zırh çeliğinin geleneksel sürtünme kaynak yöntemi ile kaynak edilebildiği tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonucu ortaya çıkan kaynak dikişleri çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testleri sonucunda 80 MPa sürtünme basıncı ve 8 sn. sürtünme süresi ile kaynak işlemi gerçekleştirilen numunenin 1020 MPa ile en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Tüm bunların yanında kaynaklı bağlantıların ve ana malzemelerin mikro yapısı ve kırılma yüzeyleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Deney sonuçları, kaynaklı bağlantının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin değişen kaynak parametrelerinden belirgin şekilde etkilendiğini göstermiştir.

Sürtünme kaynağı ince cidarlı metalik boruların birleştirilmesinde kullanılan ideale yakın en iyi yöntemdir. Palanivel, Laubscher, Dinaharan ve Hattingh (2017), yaptıkları çalışma kapsamında dış çapı 60 mm ve et kalınlığı 3,9 mm olan ikinci kalite titanyum boruları sürtünme kaynak yöntemini kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynak işlemi

sırasında tüm kaynak parametreleri kayıt altına alınmış ve beş farklı sürtünme kaynak hızının kaynak bölgesinin mikro yapısı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar kaynak hızının (dönme) proses parametreleri, mikroyapı ve bağlantı bütünlüğü üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. Gerçekleştirilen deneyler sırasında sürtünme kaynak hızının (dönme) artırılmasının sürtünme torkunu ve sürtünme etkisini azaltmak için ihtiyaç duyulan gücü azalttığı ancak kaynak süresini uzattığı tespit edilmiştir. İlaveten sürtünme kaynak hızının (dönme) artırılması ile yığma miktarının yani deformasyon hızının da arttığı ve kaynak bölgesinde tane yapısını iyileştirdiği görülmüştür. Diğer yandan kaynak bölgesindeki tane yapısının merkezden çapak hattına doğru kabalaştığı, ısı tesiri altındaki bölgede ise tane yapısının ana malzemeye benzer hatta çok yakın bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. 2.200 devir/dakika dönme hızında kaynaklı bağlantının en yüksek çekme dayanımına ulaştığı tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında kaynaklı bağlantının mikro sertlik taraması, hasar bölgesi ve kırılma yüzeyi ile ilgili incelemeler de gerçekleştirilmiştir.

Endüstride 1500 mm² ve daha az kaynak kesit alanına sahip olan TZM alaşımdan üretilmiş parçaları kaynak yönetimi ile birleştirmek için volanlı tip sürtünme kaynağı makinası yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Stütz ve arkadaşları (2019) ise kaynak kesit alanı 4400 mm² olan saf molibden parçaların kaynak işlemlerinde kaynak parametrelerinin ve sıkma – bağlama sistemlerinin kaynaklı bağlantıya olan etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek amacı ile çalışmaları kapsamında sürekli tahrikli sürtünme kaynağı makinası kullanmışlardır. Bu işlem sırasında TZM alaşımından üretilen parçaların kaynak işlemleri sırasında kullanılan kaynak parametreleri kullanılmış ve ince taneli hatasız bir mikro yapıya sahip kaynak kesitleri başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Ancak saf molibden parçaların kaynakları oldukça zordur, yüksek sürtünme deformasyon (yığma) artış hızları, işlem sırasında genellikle motorların aşırı yüklenmesine sebebiyet vermektedir. Bu nedenle saf molibden parçaların sürtünme kaynak parametrelerini belirlemek amacı yazarlar laboratuvar ortamda daha küçük numuneler ile çalışma yapmışlardır. TZM alaşımına göre daha düşük dayanıma ve daha iyi ısı yayılım özelliklerine sahip olan saf molibden parçaların kaynak işlemi sırasında oldukça fazla kalıcı deformasyona uğradığı tespit edilmiştir. Deneyler sırasında bahse konu yüksek deformasyon eğiliminin prosesin tekrar edilebilirliğini

belirgin şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle sürtünme kaynağı sırasında molibdenin sahip olduğu yüksek ısı yayılım özelliğini karşılamak için sürtünme fazı ile yığma fazı arasında yoğunlaştırılmış enerji girdisi ile kaynak işleminin gerçekleştirilmesine karar verilmiş ve farklı kaynak parametreleri ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılar incelenerek çalışma tamamlanmıştır.

Selvemani ve arkadaşları (2019) sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş AISI 1020 kalite düşük karbonlu çelik malzemelerin yorulma ömrünü tespit etmek için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında gerilim giderme tavlama sürecinin kaynak dikişinin yorulma ömrüne olan etkisi de incelenmiş, kaynak parametreleri ise maksimum kaynaklı bağlantı dayanımına ulaşmak amacı ile ANOVA tasarım matrisine göre yüzey cevap yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma sonunda sürtünme kaynağı sonrasında uygulanan gerilim giderme tavlama süreci sonucunda kaynaklı bağlantının yorulma ömrü %30 ÷ %35 arasında iyileştirilebildiği tespit edilmiştir.

Xu ve arkadaşları (2020) orta karbonlu alaşımsız 1045 kalite çelik ile yüksek mukavemetli düşük alaşımlı 30CrMnSiNi2A kalite çeliği sürtünme kaynağı yöntemi kullanarak başarılı şekilde birleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında farklı kaynak devirlerinin kaynaklı bağlantının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Numunelerin kaynak işlemi 1000, 1600, 2200 ve 2800 devir/dakika'da gerçekleştirilmiştir. 2200 dev/dak kaynak devrinde en yüksek mekanik mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. En yüksek sertlik değeri ise 581 HV olarak kaynak hattına yakın 30CrMnSiNi2A ana malzemesi tarafında, dış çap bölgesindeki martenzitik yapı nedeniyle tespit edilmiştir. Çekme testleri sonrasında ortaya çıkan kırılma bölgelerinin ise kaynak devri ile yakından ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Diğer kaynak devirlerinden farklı olarak 2200 dev/dak kaynak devrinde kaynak işlemi gerçekleştirilen numunelerde çekme testi sonrasında ana malzemede kırılma ortaya çıktığı görülmüştür.

Sondaj borularının üretiminde benzer ve benzer olmayan yapısal malzeme konfigürasyonları yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kumar ve arkadaşları (2021)

alışmaları kapsamında karbonlu elik ve düşük alaşımlı elik borular kullanarak sürtünme kaynaklı bağlantılara sahip sondaj borusu numuneleri hazırlamışlardır. Numuneler hazırlanırken benzer olmayan düşük alaşımlı çelikler kullanılarak hazırlanan sürtünme kaynaklı bağlantılarda malzemeler ısıl işlemsiz (teslim koşullarında) ve ıslahlı olarak iki farklı ısıl işlem durumunda kullanılmıştır. Genel olarak benzer ve benzer olmayan elik malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen sürtünme kaynaklı bağlantıların birleşme arayüzü içyapısında tane incelmesi ve karbür çökelmesi gözlemlenmektedir. Hazırlanan numunelerde benzer olmayan ısıl işlemsiz elik malzemelerin kaynak birleşme hattında 2 µm genişliğe sahip benzer bir mikro yapı tespit edilmiştir. İlaveten numunelere ait sürtünme kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri klasik çekme ve sertlik testi kullanılarak tespit edilmiştir. Islah işlemine tabi tutulmuş düşük alaşımlı elik borular kullanılarak hazırlanan numunelere ait sürtünme kaynaklı bağlantıların birleşme arayüzü dayanımında ise temperlenmiş martenzitik içyapı ve tane küçülmesi nedeni ile iyileşme tespit edilmiştir.

Banarjee, Ntovas, Da Silva ve Rahimi (2021) değişken kaynak devrinin ve atalet değerinin volanlı tip sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilen 8630 M kalite düşük alaşımlı elik malzemelerin kaynaklı bağlantısının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelenmişlerdir. Elde edilen sonuçlar artan kaynak devrinin ve azalan atalet değerinin, kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen içyapı incelemeleri ise kaynak bölgesindeki ve termomekanik olarak etkilenen bölgedeki sıcaklık değerlerinin Ac1 ve Ac1-Ac3 değerleri arasında kaldığını gösterirken, ısı tesiri altında kalan bölge ise sıcaklık değerinin Ac1 değerinin altında kaldığı göstermiştir. Kaynak içyapısına ise sürtünme kaynağının ilk evresindeki basının etkisi ile döndürülmüş basit kesme dokusunun hâkim olduğu tespit edilmiştir.

Chatha, Handa ve Bedi (2021) sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş farklı paslanmaz elik kalitelerine ait kaynaklı bağlantıların dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Karşılaştırılmalı olarak gerçekleştirilen çalışma kapsamında SS316-SS304, SS316-SS202, SS304-SS202 kalite numuneler kullanılarak hazırlanan kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri çekme testi ve vickers sertlik testi ile

belirlenmiş ve dayanım açısından en iyi kombinasyon seçilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda en iyi kombinasyonun SS 316-SS 304 olduğu görülmüş, kaynak ara yüzeyinin çekme dayanımı 3920 Kgf ve sertlik değeri ise 278 HV olarak tespit edilmiştir. Diğer yandan en zayıf kaynaklı bağlantının ise SS202-SS316 kombinasyonunda ortaya çıktığı görülmüş, çekme dayanımı 2560 Kgf, sertlik değeri ise 198 HV olarak ölçülmüştür.

2.3 DeneySEL Çalışma

Boru şeklindeki dairesel kesitli ince cidarlı yapılar otomotiv, inşaat ve denizcilik gibi birçok farklı sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Bu tip yapıların üretimi sırasında kaynak gibi özel üretim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bir katı hal kaynak tekniği olarak sürtünme kaynağı, benzer ya da farklı malzeme özelliklerine sahip dairesel kesitli ince cidarlı yapıların birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir.

Ogawa, Nakayama, Ohue ve Hasui (1988), cidar kalınlığı / dış çap oranı 0,1'den büyük olan ve benzer malzeme özelliklerine sahip boru şeklindeki dairesel kesitli ince cidarlı yapıların sürtünme kaynağı ile başarıyla kaynak edilebildiğini bildirmişlerdir. Buna ilaveten Kimura, Ichihara, Kusaka ve Kaizu (2012), cidar kalınlığı / dış çap oranı 0,1'den küçük olan farklı boyutlardaki östenitik paslanmaz çelik boruların sürtünme kaynağı yöntemi ile kaynak edilebildiğini bildirmişlerdir. Kumar ve Balasubramanian (2014), cidar kalınlığı / dış çap oranı 0,0612 olan SUS 304HCu kalite paslanmaz çeliklerin sürtünme kaynağı ile başarıyla kaynak edilebildiğini raporlamışlardır. Her ne kadar cidar kalınlığı / dış çap oranı 0,1'den küçük olan yapıların sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilirliği mümkünse de literatürde konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışma sayısının oldukça az olduğu tespit edilmiştir.

Bu noktadan hareket ile cidar kalınlığı / dış çap oranı 0,0543 olan boru şeklinde dairesel kesitli yapıları bünyesinde barındıran kardan millerinde, sıcak dövme tekniği kullanılarak termo-mekanik işleme tabi tutulmuş, sabit kardan mafsallının bir parçası olan tüp çatal ile DIN EN 10305-2:2010-5 no'lu uluslararası standarda göre üretimi

yapılan ince cidarlı soğuk çekilmiş dikişli borunun bir katı hal birleştirme yöntemi olan sürtünme kaynağı tekniği kullanılarak kaynak edilebilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Buna ilaveten, ortaya çıkan kaynaklı bağlantının, araç üzerinde gerçekleştirilen testlerden elde edilen saha verileri incelenerek belirlenen farklı burulma yükleri altındaki davranışının incelenmesi ve kardan milini servis ömrünü belirleyen kaynaklı bağlantıların yapısal dayanıklılığının tespit edilmesi hedeflenmiştir.

2.3.1 Sürtünme Kaynak Numuneleri, Üretimi ve Kullanılan Ekipmanlar

Numunelerin kaynak işlemi, Şekil 2.4'te görülen 15 ton vurma ve 1000 devir/dakika dönme hızı kapasiteli, çift kafalı kaynak işlemi yapabilme yeteneğine sahip ve bilgisayar kontrollü sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinası ile kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklı numunelerin üretimi sırasında kullanılan parametreler Tablo 2.1'de listelenmiştir. Tüm parametreler sürekli tahrikli sürtünme kaynağı makinası tarafından anlık olarak bilgisayarlı kontrol sistemi yardımı ile kontrol edilmiş ve kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.4 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı makinası

Tablo 2.1 Sürtünme kaynak parametreleri

	n (dev/dak)	R_s (MPa/sn)	R_u (MPa/sn)	X_u (mm)
Kaynak parametreleri	900	0,55	1,60	3

n: Dönme hızı

R_s: Zamana bağlı sürtünme basıncı uygulama oranı

R_u: Zamana bağlı yığma basıncı uygulama oranı

X_u: Yığma miktarı

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Tablo 2.1’de verilen parametreler kullanılarak Şekil 2.5’te görülen kardan mili numunelerinden 40 adet kaynak edilmiştir. Üretilen numunelerin tam kapalı boyu 800 mm’dir. Kaynaklı bağlantının cidar kalınlığı / dış çap oranı ise 0,0543’tür. Çalışma kapsamında özellikle Şekil 1.2’de gösterilen ve sabit mafsallı oluşturan tüp çatal ile ince cidarlı dikişli boru arasında oluşturulan kaynak dikişi incelenmiştir.

Üretilen numunelerden 14 adedinin proses içi tahribatlı muayene kontrollerinde, 5 adedinin çekme testlerinde, 3 adedinin sertlik taraması işleminde, 6 adedinin statik torsiyon testlerinde ve 12 adedinin ise torsiyonel yorulma testlerinde kullanılması planlanmıştır.



Şekil 2.5 Kardan mili numuneleri

2.3.2 Deney Numunelerine ait Malzemelerin Özellikleri

Üretilen kardan mili numunelerinde, sabit mafsallı oluşturan tüp çatal mikro alaşımlı çelik malzeme ile sıcak dövme tekniği kullanılarak üretilmiştir. Sıcak dövme işlemi sonrasında istenilen mekanik özelliklere ulaşabilmesi için kontrollü soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Diğer yandan ince cidarlı soğuk çekilmiş dikişli boru ise DIN EN 10305-2:2016-08 no'lu standardına göre alaşımsız yapısal çelik kullanılarak üretilmiştir. Her iki malzemenin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 2.2'de ve Tablo 2.3'te verilmektedir.

İnce cidarlı dikişli borunun içyapısında soğuk çekme prosesi nedeni ile oluşan plastik deformasyonun etkisi ile bantlaşmış ferritik ve perlitik yapı gözlemlenmiştir (Şekil 2.6). Sıcak dövme tekniği ile şekillendirilmiş ve kontrollü soğutma işlemine tabi tutulmuş tüp çatalın içyapısında ise perlitik ve tane sınırında ferritik yapı gözlemlenmiştir (Şekil 2.7).

Tablo 2.2 Ana malzemelerin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

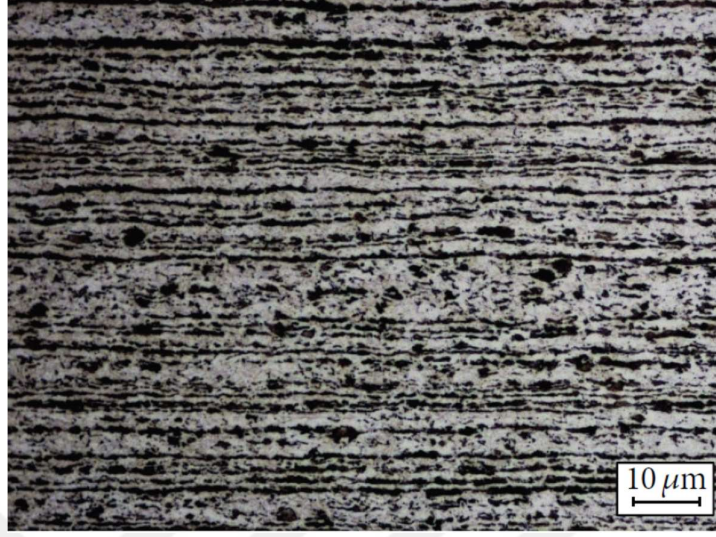
	C	Si	Mn	P	S	V	Al
Alaşımsız yapısal çelik*	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,02**
Mikro alaşımlı çelik	0,32	0,15	1,30	-	0,08	0,02	-
	0,39	0,25	1,50	0,04	0,13	0,2	

*Maksimum, ** Minimum

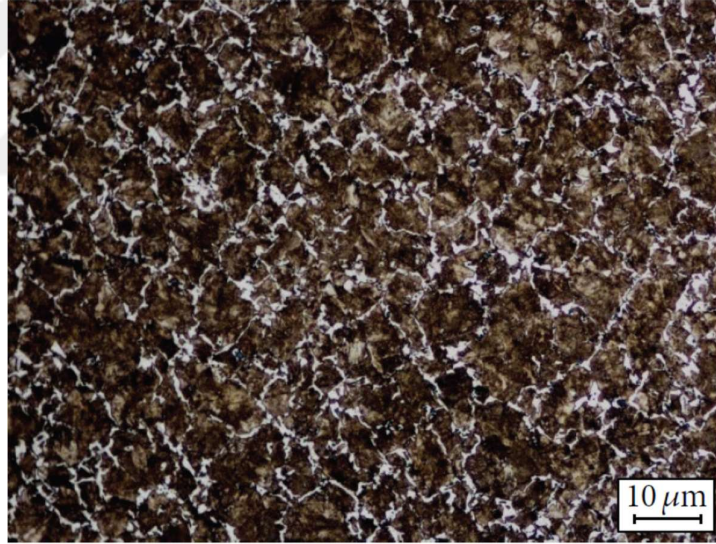
Tablo 2.3 Ana malzemelerin mekanik özellikleri

	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Alaşımsız yapısal çelik	210	640**	8*
Mikro alaşımlı çelik	200	750**	14*

*Maksimum, ** Minimum



Şekil 2.6 İnce cidarlı soğuk çekilmiş dikişli borunun içyapısı

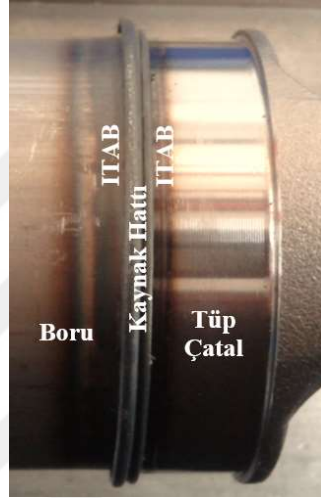


Şekil 2.7 Mikro alaşımlı çelik kullanılarak üretilen tüp çatalın içyapısı

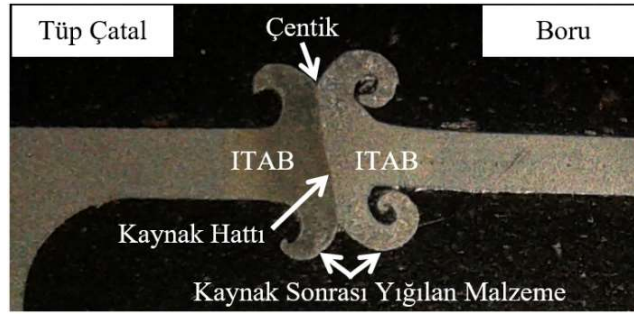
2.3.3 Kaynaklı Bağlantının Makro ve Mikro Yapı Analizi

Sürtünme kaynaklı numune ve kaynaklı bağlantıdan çıkarılan kesit sırasıyla Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’de gösterilmektedir. Sürtünme kaynaklı bağlantılar, her iki ana malzeme üzerinde kaynak sonrası gözlemlenen dar ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve her iki ana malzemenin sürtünen yüzeylerinde kaynak hattı boyunca kaynak işlemi sonrasında dışarıya doğru çepçevre yığılmış fazla malzeme ile karakterize edilir

(ANSI/AWS C6-1, 1989). Kaynak hattı boyunca çepeçevre dışarı yığılan bu malzemeye kaynak çapağı (welding flash) adı verilmektedir. Dışarı yığılan bu malzemenin miktarı, kaynak parametreleri ile ilişkili olduğu kadar kaynağı yapılacak olan malzemelerin mekanik mukavemetleri ve sıcak akma sınırları ile doğrudan ilişkilidir (Işık ve Özses, 2015).



Şekil 2.8 Sürtünme kaynaklı bağlantının makro yapısı (Işık ve Özses, 2016)



Şekil 2.9 Sürtünme kaynaklı bağlantının kesit görüntüsü (Işık ve Özses, 2015)

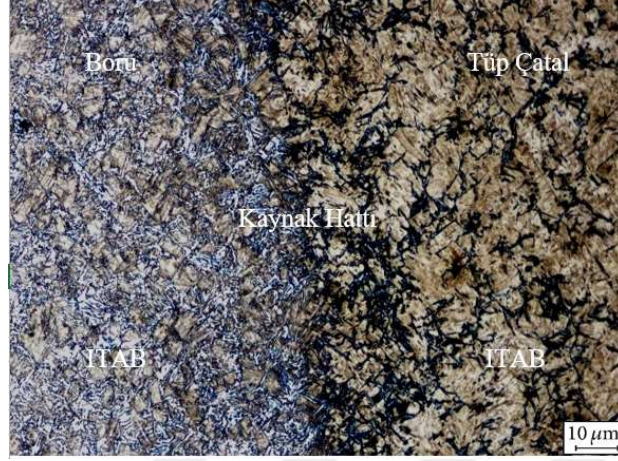
Sürtünme kaynağı işleminde çoğunlukla simetrik parça geometrisine sahip parçaların kullanımı tavsiye edilmektedir. Kaynaklı bağlantılar genellikle dairesel kesitli içi dolu miller ya da boru şeklindeki dairesel kesitli parçalar arasında oluşturulur. Simetrik parça geometrisi, sürtünme kaynağı işlemi sırasında homojen ısı akışının oluşmasını ve kaynak hattı boyunca çepeçevre yığılmış olan fazla malzemenin uzaklaştırılmasında kolaylık sağlar. Buna ilaveten dışarı yığılan fazla malzemenin neden olduğu çentik etkisini azaltır (ANSI/AWS C6-1, 1989).

Sürtünme kaynağı işlemi sonrasında her iki ana malzeme yüzeyinden dışarıya doğru çıkan ve kaynak hattını çepeçevre saran fazla malzeme ruloları arasında bir çentik ya da kertik meydana gelir. Bu çentik, kaynağı yapılan numunelerin dış çapından daha büyük bir çapta ortaya çıktığı için kaynaklı bağlantının mekanik davranışına etki etmez (ANSI/AWS C6-1, 1989).

Sürtünme kaynağı sırasında ortaya çıkan ITAB, ana malzeme özellikleri ile karşılaştırıldığında farklı makro / mikro yapı özellikleri ve mekanik özellikler göstermektedir. Bu farklılığın ana sebebi kaynak sırasında sürtünme nedeni ile ortaya çıkan ısı oluşumu, kaynaklı bağlantı boyunca oluşan ısı akışı ve iş parçalarının sürtünen yüzeylerindeki kalıcı mekanik deformasyondur. Kaynaklı bağlantıda ortaya çıkan ITAB'ın olumsuz etkisini azaltmak için optimize edilmiş kaynak parametreleri ile kaynak işlemi yapılmalıdır. Kalıcı bağlantıyı oluşumunu sağlayan ısı enerjisi, mümkün olduğunca azaltılmalıdır. Bunun için yüksek dönme hızında ve yığma basıncı ile olabildiğince düşük sürtünme süresi ve basıncı kullanılarak kaynak yapılmalıdır (Işık ve Özes, 2016).

Mikro yapı incelemesi amacı ile kaynaklı bağlantının kesiti Metkon Servocut 401 MM marka sıvı soğutmalı abrasif kesme cihazı kullanılarak çıkarılmıştır. Bu şekilde numunenin ısınması engellenerek, kesme sırasında mikro yapı değişikliği oluşması önlenmiştir. Çıkarılan kesit, 30 mm boyunda kesilerek Metkon Ecopres 50 marka kalıplama cihazı kullanılarak bakalite alınmıştır.

Bakalite alınan kesit, yine Metkon Forcipol 2V marka zımpara ve parlatma cihazı kullanılarak sırasıyla 600, 800 ve 1200 yoğunluk değerine sahip zımparalar kullanılarak zımparalanmış ve 3µm'lik parlatma sıvısı kullanılarak parlatılmıştır. Parlatma işlemi sonrasında %97 alkol, %3 nitrik asit çözeltisi kullanılarak 3 ila 5 saniye süresince dağlanmıştır. Dağlama sonrasında yüzey metil alkol ile temizlenerek oksitlenmesi engellenmiştir. Numune hazırlama işlemlerinin ardından kaynak bölgesinin mikro yapısı, 20 kat büyütme ile optik bir mikroskop kullanılarak incelenmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Kaynak bölgesinin mikro yapısı (Işık ve Özes, 2016)

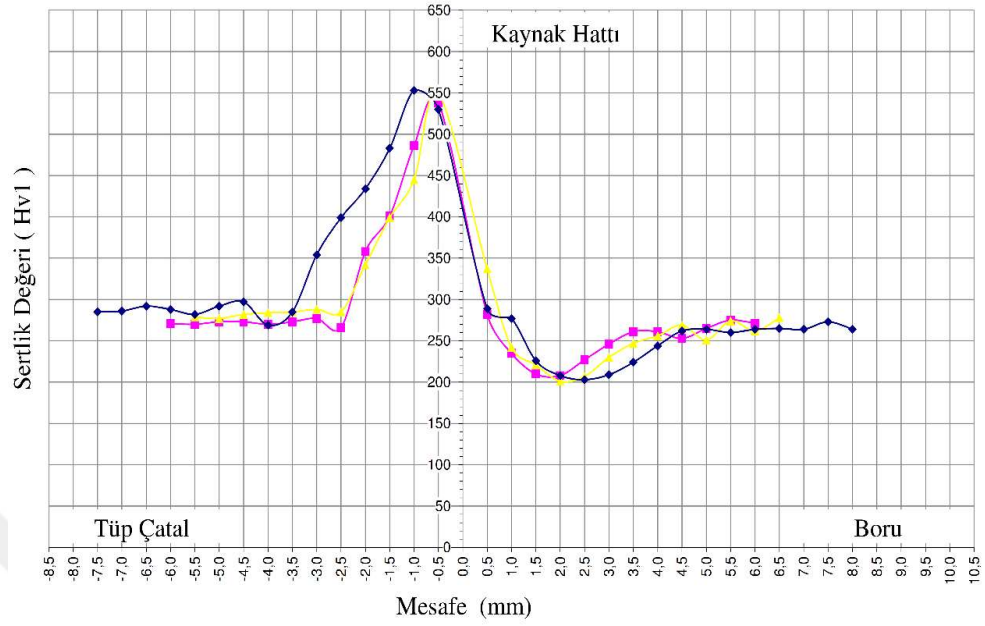
İnce cidarlı dikişli boru tarafından tüp çatala doğru yapılan incelemede ısının etkisi ile karbür yapıların küreselleşme eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. A3 sıcaklığına ulaşan bölgelerin soğuması ile perlit, beynit ve widmanstätten martenzit geçişleri ve tane sınırı ferrit, widmanstätten ferrit, asiküler ferrit oluşumu gözlenmiştir. Tüp çatal tarafında ise kaynak bölgesine yaklaştıkça ince taneli perlitik yapı ve tane sınırı ferrit yapı gözlemlenmiştir. Bu yapıları takiben kaba perlitik yapı ve widmanstätten martenzit yapı gözlenmiştir.

İncelenen numunede ince cidarlı soğuk çekilmiş boru tarafındaki ısı tesiri altından bölgenin uzunluğu 2 mm, tüp çatal tarafındaki ısı tesiri altındaki bölgenin uzunluğu ise 1,5 mm olarak tespit edilmiştir. Sürtünme kaynak işleminin doğası nedeni ile her iki ısı tesiri altındaki bölgede ana malzemede gözlemlenen tane yapısına kıyas ile daha ince yapılı tane gözlemlenmiştir. Sürtünme sonucu oluşan ısı nedeni ile ortaya çıkan sıcaklık artışı, sürtünme ve yığma basıncı nedeni ile kaynak hattında meydana gelen kalıcı plastik deformasyon ve kaynak bölgesinin hızlı soğuması ısı tesiri altındaki bölgede ince taneli yapının oluşmasının temel nedenleridir (Işık ve Özes, 2016). Ortaya çıkan ince taneli bu yapı kaynaklı bağlantının mekanik mukavemetini de arttırmaktadır.

2.3.4 Kaynaklı Bağlantının Sertlik Dağılımı Analizi

Ardışık olarak kaynatılmış ve test edilmiş üç adet numunenin sertlik taraması gerçekleştirilmiştir. Sertlik taraması sırasında izler boru tarafından parça tarafına doğru yatay olarak alınmıştır. Sertlik ölçümü, ISO 6507-1 no'lu standarda göre gerçekleştirilmiş ve test yükü olarak 1 N kullanılmıştır. Her bir iz arasında 0,5 mm mesafe bırakılarak minimum 20 iz oluşturulmuştur. Kaynak bölgesi boyunca ortaya çıkan sertlik dağılımı Şekil 2.11'de verilmiştir.

Aynı kaynak parametreleri ile kaynak edilen 3 adet numune üzerinde yapılan incelemede en yüksek sertlik değeri, mikro alaşımlı malzemeden sıcak dövme tekniği kullanılarak üretilen tüp çatal tarafında kaynak hattından 1 mm uzakta 553 HV1 olarak tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde tespit edilen bu sertlik değeri, ana malzemeye ait sertlik değerinin yaklaşık olarak iki katıdır. Sürtünme sonucu oluşan ısı nedeni ile ortaya çıkan sıcaklık artışı, sürtünme ve yığılma basıncı nedeni ile kaynak hattında meydana gelen kalıcı plastik deformasyon ve kaynak bölgesinin hızlı soğuması sonucu ortaya çıkan ince taneli içyapı, mikro alaşımlı malzeme ile sıcak dövme tekniği kullanılarak üretilen tüp çatal tarafındaki sertlik artışının temel nedenleri olarak düşünülmektedir. Boru tarafında ise sertlik değeri, kaynak hattından 2 mm uzakta 201 HV1 olarak tespit edilmiştir. Bu sertlik değeri, kaynak bölgesi boyunca tespit edilen en düşük sertlik değeridir. Bu değerin, boru ana malzemesinin sertlik değerinden yaklaşık olarak %23,2 daha düşük olduğu görülmüştür. Boru tarafındaki bu sertlik düşüşünün sürtünme kaynağı sırasında oluşan dekarbürizasyonun etkisi ile ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 2.11 Kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı (Işık ve Öz, 2016)

2.3.5 Kaynaklı Bağlantının Çekme Dayanımı

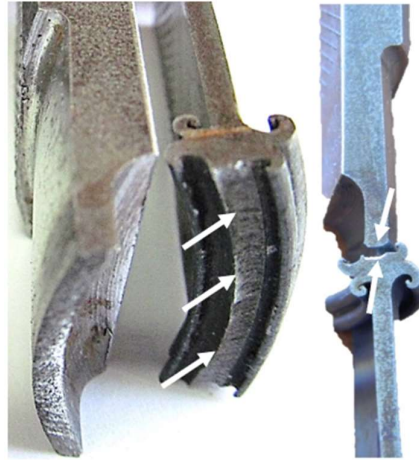
Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılardan, tel erozyon tekniği (Wire EDM) kullanılarak 25 mm genişliğinde, 75 mm uzunluğunda 5 adet numune çıkarılmıştır. Numunelerin kesilmesinin ardından boru tarafı hidrolik pres ile basılarak, tüp çatal tarafı ise freze ile düzleştirilerek çekme cihazı çenelerinin daha sağlıklı tutunması sağlanmıştır. Çekme testleri, 10 ton kapasiteli Shimadzu Autograph AG-IS test cihazı ile hidrolik sıkma çeneleri kullanılarak, oda sıcaklığında ve 1 mm/dakika yük uygulama hızı ile gerçekleştirilmiştir. Test sırasında kuvvet ve uzama değerleri kayıt altına alınarak her bir numune için grafik çizdirilmiştir.

Çekme testi sonrasında kaynaklı numunelerin genel görünümü Şekil 2.12'de verilmiştir. 1'den 4'e kadar numaralandırılan kaynaklı numunelerin, ince cidarlı soğuk çekme boru üzerindeki ısı tesiri altındaki bölgeden kırıldığı görülmüştür. Kırılma bölgelerinin kaynak hattına olan mesafeleri sırasıyla 2,5 mm, 3 mm, 3 mm ve 3,3 mm olarak ölçülmüştür. 1'den 4'e kadar numaralandırılan numunelerin, dekarbürizasyon sonucu en düşük sertlik değerine, dolayısıyla en düşük çekme mukavemetine sahip olan bölgelerden kırıldığı görülmüştür. Kırılmaların tamamının sünek karaktere sahip

olduğu tespit edilmiştir. 5 no'lu kaynaklı numunenin ise sıcak dövme tekniği ile şekillendirilmiş tüp çatal üzerindeki ısı tesiri altındaki bölgeden kırıldığı görülmüştür. Kırılma bölgesinin kaynak hattına olan mesafesi 1,2 mm olarak ölçülmüştür. 5 no'lu kaynaklı numunenin sertlik değeri ve kırılmalığı en yüksek olan bölgeden kırıldığı gözlemlenmiştir. İlk dört numuneye göre kırılma bölgesinin daha gevrek bir kırılma karakterine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 2.13). Çekme testi sonrasında kaynaklı numunelerin hiçbirinde kaynak hattı üzerinde bir süreksizliğe rastlanmamış, kaynak dikişinin çekme testi sonrasında bütünlüğünü koruduğu görülmüştür.

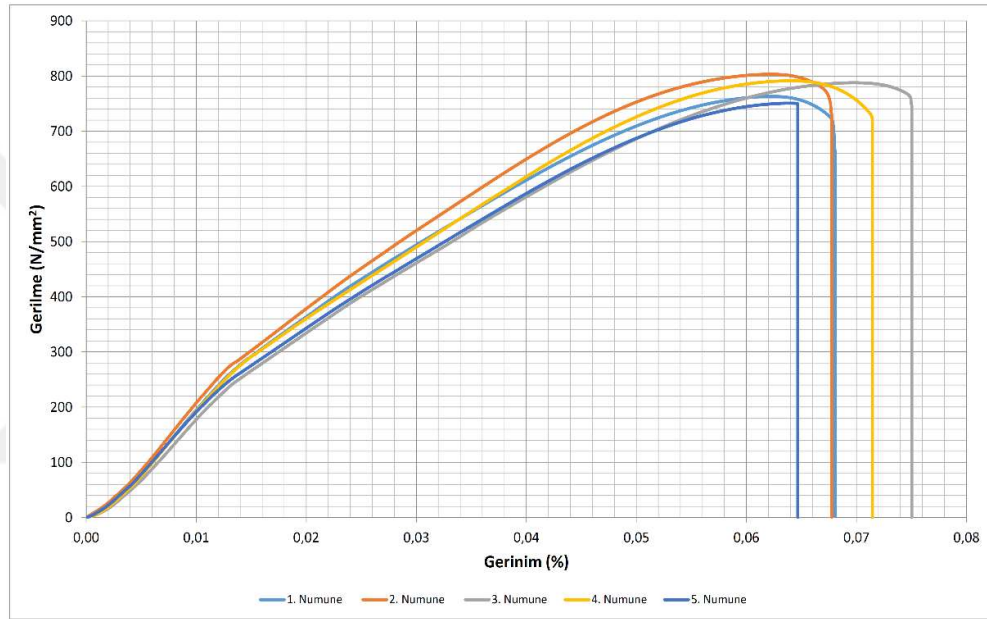


Şekil 2.12 Çekme testi sonrasında numunelerin genel görünümü



Şekil 2.13 Gevrek kırılma karakterine sahip kaynaklı bağlantı

1'den 4'e kadar numaralandırılmış kaynaklı bağlantıların çekme dayanımının ince cidarlı soğuk çekme dikişli boruya ait ana malzeme çekme dayanımından %6 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 5 no'lu kaynaklı bağlantının ise çekme dayanımının sıcak dövme tekniği ile şekillendirilmiş mikro alaşımlı çeliğe ait ana malzeme çekme dayanımından %13 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Tüm numunelere ait çekme testi sonuçları Şekil 2.14'te çekme mukavemetleri ise Tablo 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.14 Çekme testi gerilme – gerinim grafiği

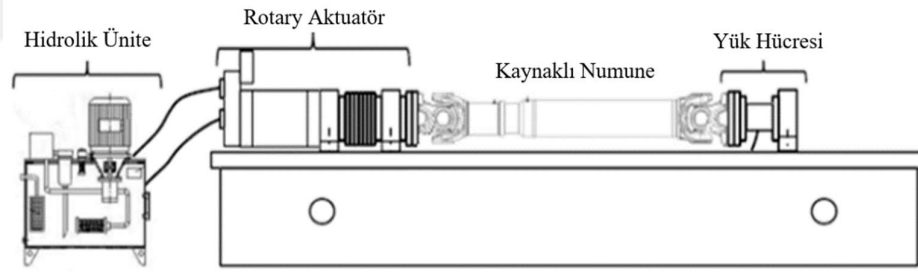
Tablo 2.3 Sürtünme kaynak bağlantıların çekme dayanımları

	1.	2.	3.	4.	5.
	Numune	Numune	Numune	Numune	Numune
Çekme					
Dayanımı	763,16	803,15	787,85	791,32	750,75
(MPa)					

2.3.6 Kaynaklı Bağlantının Burulma Yüğü Dayanımı

Sürtünme kaynak yöntemi ile üretilmiş 6 adet kaynaklı numune, sürtünme kaynaklı bağlantılarının torsiyonel yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla statik torsiyon testine tabi tutulmuşlardır.

Sürtünme kaynaklı numuneler, ± 16 kNm torsiyonel yük uygulama kapasitesine sahip Instron marka servo-hidrolik statik torsiyon test cihazı kullanılarak, oda sıcaklığında 50 Nm/saniye yük uygulama hızı ile test edilmişlerdir. Öncelikle kaynaklı numuneler, yatay eksen ile 0° açı yapacak şekilde bağlantı flanşları aracılığı ile test cihazı üzerinde bulunan flanşlara sabitlenmişlerdir (Şekil 2.15). Sabitlenen noktaların birinde hidrolik güç ile çalışan döner tip eyleyici (rotary aktüatör) diğ erinde ise numune üzerinden geçen burulma yükünü ölçmek için kullanılan yük hücresi bulunmaktadır.



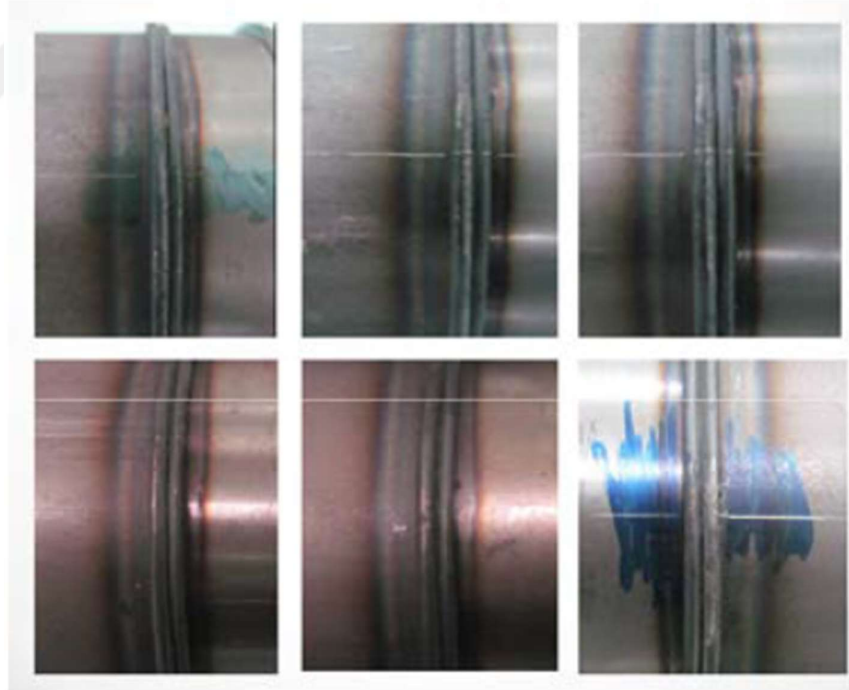
Şekil 2.15 Statik torsiyon test cihazının şematik gösterimi

Kaynaklı numuneler, test cihazı üzerinde bulunan hidrolik döner tip eyleyici (rotary aktüatör) ile bir taraftan burularak yüklenmişler ve yükleme işlemi sonrasında kaynaklı numune üzerinden geçen burulma momenti değ eri ve açısal deformasyon miktarı yük hücresi ve elektronik açı ölçer tarafından ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Her bir test sonrasında burulma momenti – açısal deformasyon grafiğı çizdirilmiştir. 6 adet numunenin statik torsiyon testleri, kardan mili numuneleri kırılıncaya kadar gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında kaynaklı bağlantıların hiçbirinde hasar gözlemlenmemiştir ancak kardan millerine ait diğ er parçalar test sırasında hasar görmüştür (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17).

Kaynaklı bağlantının hasar görmeden taşıyabildiği burulma momenti değerleri Tablo 2.4, statik torsiyon testi sonrası elde edilen burulma momenti – açılal deformasyon grafiği ise Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.16 Statik torsiyon testi sonrası numunelerin genel görünümü

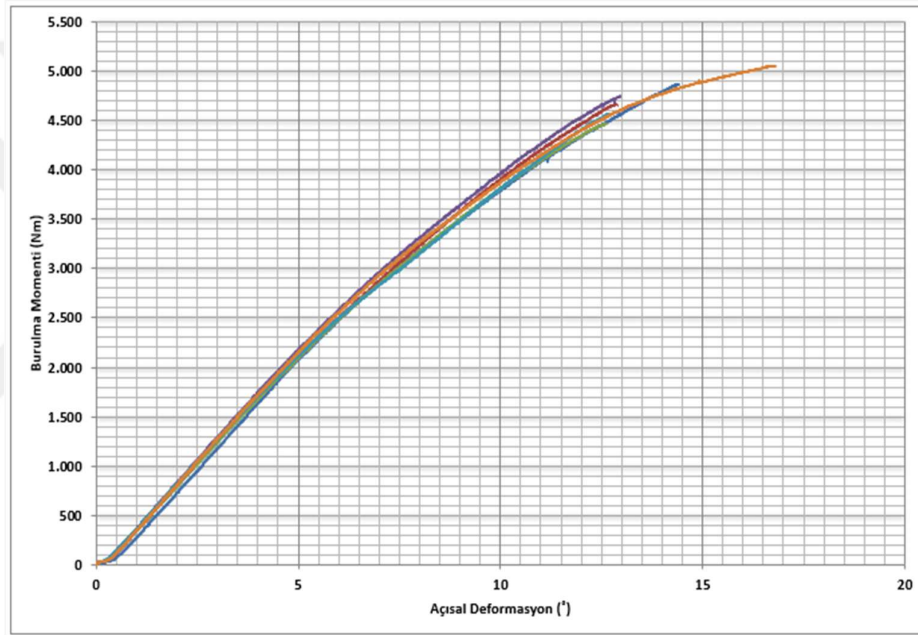


Şekil 2.17 Statik torsiyon testi sonrası hasar görmeyen kaynaklı bağlantılar

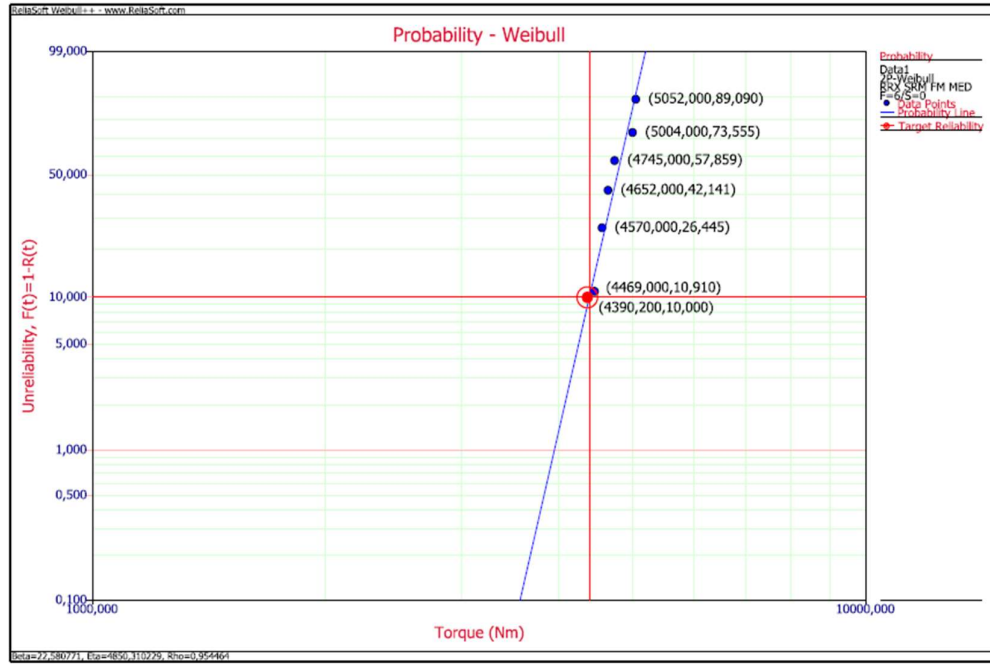
Statik torsiyon testleri sonrasında elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edilmiş, kaynaklı bağlantının %90 güvenilirlik aralığında 4390,2 Nm (Şekil 2.19), %95 güvenilirlik aralığında ise 4252,5 Nm (Şekil 2.20) burulma momentine hasar görmeden dayanabildiği tespit edilmiştir.

Tablo 2.4 Kaynaklı bağlantının statik torsiyon test sonuçları

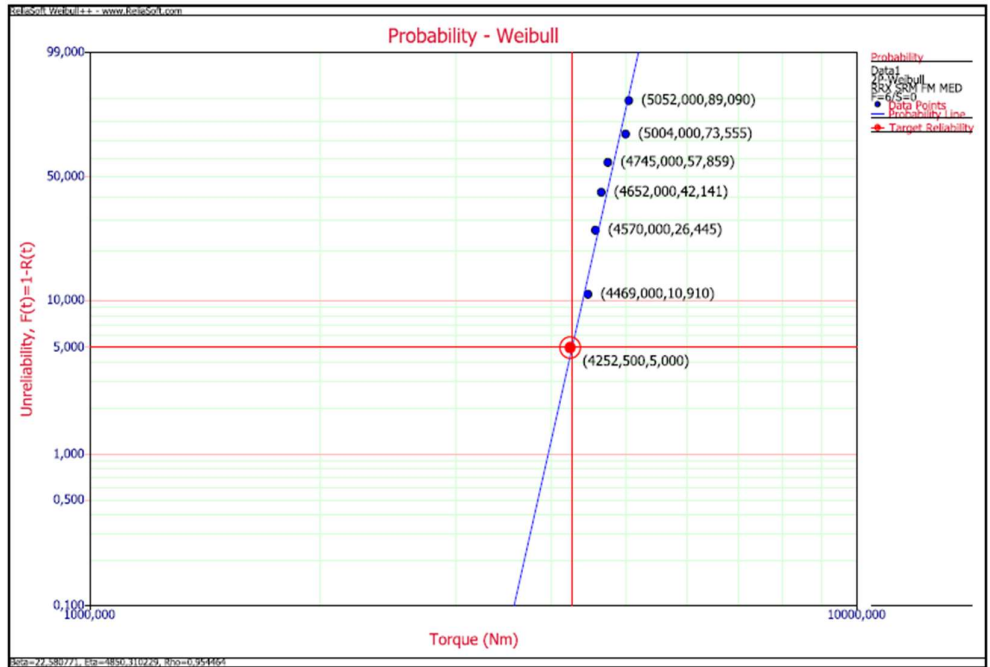
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	Numune	Numune	Numune	Numune	Numune	Numune
Burulma						
Yükü	5004	4652	4469	4745	4570	5052
(Nm)						



Şekil 2.18 Statik torsiyon testi burulma momenti – açılal deformasyon eğrileri



Şekil 2.19 Statik torsiyon testi sonuçlarının istatistiksel analizi (%90)



Şekil 2.20 Statik torsiyon testi sonuçlarının istatistiksel analizi (%95)

2.3.7 Kaynaklı Bağlantının Burulma Yorulma Dayanımı

Kaynaklı bağlantıların servis ömürleri boyunca maruz kaldıkları farklı yükler karşısındaki davranışları birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Özellikle gerçek çalışma koşullarında yani saha verileri gözden geçirilerek belirlenen yükleme miktarları, cinsleri ve süreleri yapının servis ömrünü direkt olarak etkilemektedir.

Arkadan itişli binek otomobil, hafif ticari ve ağır ticari araçlarda kullanılan kardan milleri, servis ömürleri boyunca sıklık ve büyüklük açısından farklı karakterlere sahip burulma yüklerine maruz kalırlar. Kardan millerini oluşturan kaynaklı bağlantıların burulma yükleri altındaki yapısal dayanıklılığı, kardan millerinin servis ömrünü direkt olarak etkilemektedir. Bu bağlamda çalışma kapsamında araç üstü testler sırasında kardan milinin maruz kaldığı burulma yükleri belirlenerek kardan miline ve dolayısıyla kaynaklı bağlantıya en sık etki eden burulma yükleri tespit edilmiştir. Tespit edilen burulma yükleri değerleri ile kaynaklı bağlantının yorulma ömrünü belirlemek amacıyla 12 adet torsiyonel yorulma testi planlanmıştır. Bu noktadan hareket ile dört farklı burulma yükü değerinde, oda sıcaklığında, minimum yük tekrar hızı 3 Hz olacak şekilde, tam değişken ($R = -1$), sinüzoidal yükleme karakterine sahip ve sabit genlikte torsiyonel yorulma testi gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme kaynaklı numuneler, Şekil 2.15'te şematik gösterimi verilen ± 16 kNm torsiyonel yük uygulama kapasitesine sahip Instron marka servo-hidrolik torsiyonel yorulma test cihazı ile test edilmiştir. Kaynaklı numuneler, statik torsiyon testlerinde olduğu gibi yatay eksen ile 0° açı yapacak şekilde bağlantı flanşları aracılığı ile test cihazı üzerinde bulunan flanşlara sabitlenmişlerdir. Sabitlenen noktaların birinde hidrolik güç ile çalışan döner tip eyleyici (rotary aktüatör), diğerinde ise numune üzerinden geçen burulma yükünü ölçmek için kullanılan yük hücresi bulunmaktadır. Kaynaklı numuneler, test cihazı üzerinde bulunan hidrolik döner tip eyleyici (rotary aktüatör) ile bir taraftan her iki yönde 3 Hz'lik yük tekrar hızında ve sabit genlikte burularak yüklenmişler ve yükleme işlemi sırasında kaynaklı numune üzerinden geçen burulma yükü değeri ve burulma açısı, yük hücresi ve cihaz üzerindeki elektronik açı ölçer tarafından ölçülerek kayıt altına alınmıştır.

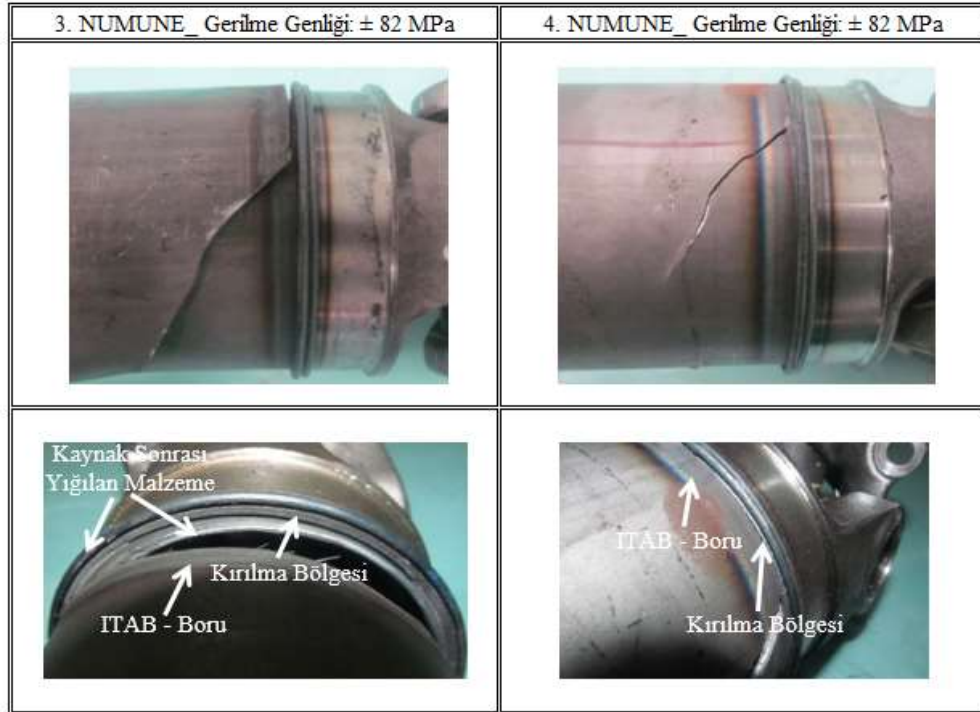
Torsiyonel yorulma testlerinin gerçekleştirildiği burulma yükleri, ince cidarlı soğuk çekme dikişli borunun dış çapında yarattığı maksimum kayma gerilmesi ile tanımlanmıştır. Tüm testler kırılıncaya kadar gerçekleştirilmiştir. Farklı burulma yükü değerlerinde gerçekleştirilen tam değişken torsiyonel yorulma testlerine ait sonuçlar Tablo 2.5'te verilmiştir. Test edilen kaynaklı numunelerin tamamının ince cidarlı soğuk çekme dikişli boru tarafında sürtünme kaynağı sırasında oluşan ısı tesiri altındaki bölgeden (ITAB) hasar görerek kırıldığı görülmüştür. Kırılmalar tipik yorulma kırılması karakteristiği göstermektedir ve Şekil 2.21, Şekil 2.22, Şekil 2.23, ve 2.24'ten de görülebileceği üzere kırılmaların tamamı sertlik değerinin en düşük, dolayısıyla çekme dayanımının boru ana malzemesine göre en düşük olduğu bölgede gerçekleşmiştir.

Tablo 2.5 Tam değişken torsiyonel yorulma testleri test sonuçları

	Kayma Gerilmesi (MPa)	Burulma Yükü ± (Nm)	Çevrim Sayısı	Kaynaklı Numune Hasar Bölgesi
1. Numune	124	2200	23.759	ITAB - Boru
2. Numune	124	2200	23.800	ITAB - Boru
3. Numune	82	1450	159.904	ITAB - Boru
4. Numune	82	1450	192.764	ITAB - Boru
5. Numune	72	1250	254.897	ITAB - Boru
6. Numune	72	1250	307.043	ITAB - Boru
7. Numune	72	1250	326.675	ITAB - Boru
8. Numune	72	1250	382.393	ITAB - Boru
9. Numune	72	1250	341.364	ITAB - Boru
10. Numune	72	1250	428.187	ITAB - Boru
11. Numune	56	1000	847.885	ITAB - Boru
12. Numune	56	1000	1.005.000	ITAB - Boru



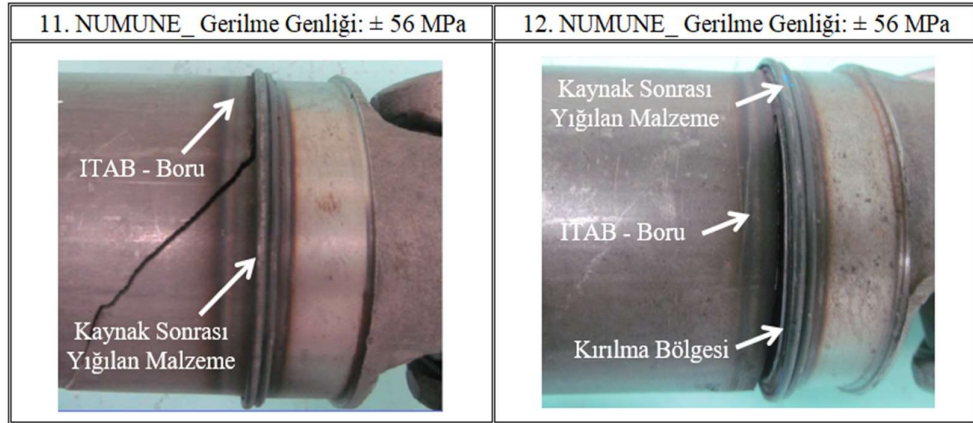
Şekil 2.21 Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılması (± 124 MPa)



Şekil 2.22 Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılması (± 82 MPa)

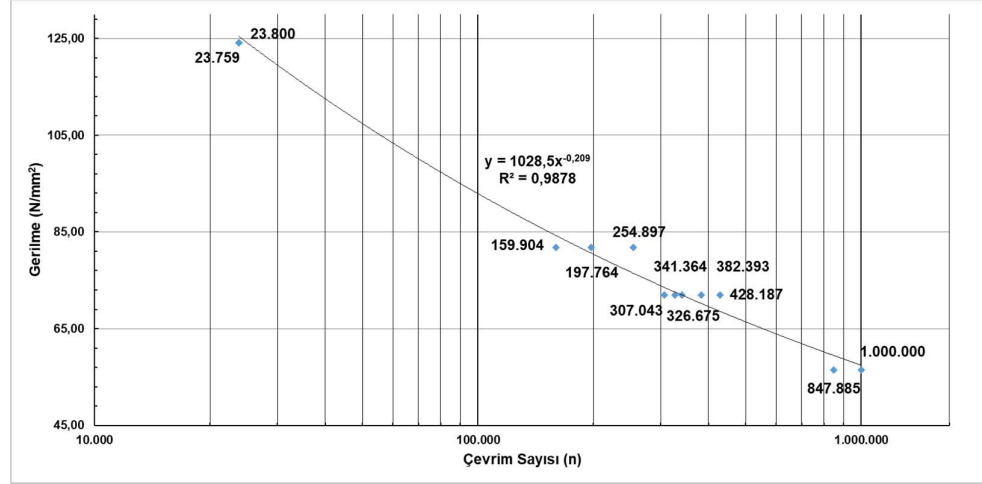


Şekil 2.23 Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılması (± 72 MPa)



Şekil 2.24 Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılması (± 56 MPa)

Tablo 2.5'te verilen test sonuçlarından hareket ile elde edilen gerilme – çevrim sayısı grafiği Şekil 2.25'te verilmiştir. Verilen grafiğe ait fonksiyondan hareket ile kaynaklı bağlantının sonsuz ömre ulaşabileceği tork değeri 50 MPa gerilme genliğinde ± 892 Nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.25 Yorulma testi gerilme – çevrim sayısı grafiği

2.3.8 Deneyisel Çalışmaların Sonuçları

Gerçekleştirilen deneyisel çalışma kapsamında sabit kardan mafsalının bir parçası olan tüp çatal ile ince cidarlı soğuk çekme dikişli boru bir katı hal birleştirme yöntemi olan sürtünme kaynağı tekniği kullanılarak birleştirilmiş ve kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Cidar kalınlığı / dış çap oranı 0,0543 olan ince cidarlı mikro alaşımlı tüp çatal parçası ile soğuk çekilmiş alaşımsız çelik boru sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak başarı ile kaynak edilebilmiştir.
- Kaynak kesitlerinde gerçekleştirilen mikro yapı incelemesi sonucunda ince cidarlı soğuk çekilmiş boru tarafındaki ısı tesiri altındaki bölgenin uzunluğu 2 mm, tüp çatal tarafındaki ısı tesiri altındaki bölgenin uzunluğu ise 1,5 mm olarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak ince cidarlı dikişli boru tarafından tüp çatala doğru yapılan incelemede ısıнын etkisi ile karbür yapıların küreselleşme eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. A3 sıcaklığına ulaşan bölgelerin soğuması ile perlit, beynit ve widmanstätten martenzit geçişleri ve tane sınırı ferrit, widmanstätten ferrit, asiküler ferrit oluşumu gözlenmiştir. Tüp çatal tarafında ise kaynak bölgesine yaklaştıkça ince taneli perlitik yapı ve tane sınırı ferrit yapı gözlemlenmiştir.

Bu yapıları takiben kaba perlitik yapı ve widmanstätten martenzit yapı gözlenmiştir

- Aynı kaynak parametreleri ile kaynak edilen 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilen sertlik taramasında en yüksek sertlik değeri, mikro alaşımlı malzemeden sıcak dövme tekniği kullanılarak üretilen tüp çatal tarafında kaynak hattından 1 mm uzakta 553 HV1 olarak tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde tespit edilen bu sertlik değeri, ana malzemeye ait sertlik değerinin yaklaşık olarak iki katıdır. Sürtünme sonucu oluşan ısı nedeni ile ortaya çıkan sıcaklık artışı, sürtünme ve yığılma basıncı nedeni ile kaynak hattında meydana gelen kalıcı plastik deformasyon ve kaynak bölgesinin hızlı soğuması sonucu ortaya çıkan ince taneli içyapı, mikro alaşımlı malzeme ile sıcak dövme tekniği kullanılarak üretilen tüp çatal tarafındaki sertlik artışının temel nedenleri olarak düşünülmektedir. Diğer yandan boru tarafındaki sertlik değeri kaynak hattından 2 mm uzakta 201 HV1 olarak tespit edilmiştir. Bu sertlik değeri, kaynak bölgesi boyunca tespit edilen en düşük sertlik değeridir. Bu değer, boru ana malzemesinin sertlik değerinden yaklaşık olarak %23,2 daha düşük olduğu görülmüştür. Boru tarafındaki bu sertlik düşüşünün sürtünme kaynağı sırasında oluşan dekarbürizasyonun etkisi ile ortaya çıktığı düşünülmektedir.
- Sürtünme kaynaklı numunelerin çekme dayanımını tespit edebilmek için beş adet numune çekme testine tabi tutulmuştur. Numunelerden dördü alaşımsız ince cidarlı soğuk çekilmiş boru ITAB bölgesinden kırılırken numunelerin biri sıcak dövme tekniği ile şekillendirilmiş mikro alaşımlı çelik tüp çatal tarafından kırılmıştır. Çekme testi sonucunda ilk dört numunenin çekme dayanımı minimum 763,16 MPa olarak tespit edilirken, son numunenin çekme dayanımı 750,75 MPa olarak tespit edilmiştir.
- 6 adet numunenin statik torsiyon testleri, kardan mili numuneleri kırılıncaya kadar gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında kaynaklı bağlantıların hiçbirinde hasar gözlemlenmemiştir ancak kardan millerine ait diğer parçalar test

sırasında hasar görmüştür. Statik torsiyon testleri sonrasında elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edildiğinde kaynaklı bağlantının %90 güvenilirlik aralığında 4390,2 Nm, %95 güvenilirlik aralığında ise 4252,5 Nm burulma momentine hasar görmeden dayanabildiği tespit edilmiştir.

- Sürtünme kaynaklı bağlantının yorulma ömrünü belirlemek amacıyla 12 adet tam değişken torsiyonel yorulma testi gerçekleştirilmiştir. Testleri gerçekleştirilen kaynaklı numunelerin tamamının ince cidarlı soğuk çekme dikişli boru tarafında sürtünme kaynağı sırasında oluşan ısı tesiri altındaki bölgeden (ITAB) hasar görerek kırıldığı görülmüştür. Kırılmalar tipik yorulma kırılması karakteristiği göstermektedir. Farklı gerilme seviyelerinde gerçekleştirilen testler sonucunda kaynaklı bağlantının sonsuz ömre ulaşabileceği tork değeri 50 MPa gerilme genliğinde ± 892 Nm olarak hesaplanmıştır.

BÖLÜM ÜÇ

YAPIŞTIRMA BAĞLANTISININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Giriş ve Literatür İncelemesi

Başta havacılık ve otomotiv sanayi olmak üzere birçok endüstriyel alanda metal yapıların yerini kompozit yapılar almaktadır. Kompozit malzemelerin sahip olduğu yüksek mukavemet-yoğunluk oranları, yüksek özgül katılık ve özgül dayanım özellikleri alışlagelmiş metal yapılar yerine kompozit yapıların kullanımını oldukça yaygın bir hale getirmiştir. İlaveten metal yapıların zorlu çalışma koşullarındaki korozyon ve aşınma gibi olumsuz etkilere daha yatkın olması bu geçişi hızlandırmıştır.

Otomotiv endüstrisinde de ince cidarlı dairesel kesitli kompozit boruların kullanımı hem dayanıklılık açısından hem de hafiflik açısından büyük avantajları beraberinde getirmektedir. Günümüzde araçlarda aranan yüksek performans, yakıt verimliliği ve düşük karbon salınımı gibi çevreci özellikler, güç ve hareket aktarımı uygulamalarında alternatif düşük yoğunluğa karşın yüksek dayanım ve rijitlik sağlayan kompozit malzeme kullanımını da öne çıkarmaktadır.

Dairesel kesitli içi boş kompozit yapılar, enerji ve kimya sektörlerinde büyük miktarda basınç yüklerine maruz kalırken, havacılık ve otomotiv sanayinde birçok noktada balistik koruma, darbe emilimi, hareket ve güç aktarımı uygulamalarında kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisi özelinde ise binek, hafif ve ağır ticari araç uygulamalarında aktarma organlarının önemli bir elemanı olan kardan millerinde de geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Düşük yoğunluk, yüksek özgül katılık, düşük döngüsel atalet ve yüksek titreşim sönümleme kabiliyeti fiber takviyeli polimer matrisli kompozit boruların kullanımını daha da popüler bir hale getirmiştir.

Endüstride fiber takviyeli polimer matrisli kompozit boru bağlantıları mekanik ya da yapıştırma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Mekanik bağlantı şekilleri çoğunlukla yapının dayanımını etkileyen hatta yapıyı zayıflatan kesme ve

delme gibi gerilme yığılmasına neden olan işlemleri kapsamaktadır. Bu nedenle kompozit boru – metal bağlantılarında bahsedilen olumsuz yönleri ortadan kaldırmak için yapıştırma bağlantısının kullanımı tercih edilmiştir. Yapıştırma bağlantılarında en öne çıkan özellik yükün geniş bir alan boyunca dağıtılarak bağlantı bölgelerinde homojen bir yük dağılımı oluşturulmasıdır. Bu şekilde bağlantı bölgelerinde gerilme yığılmalarının da önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Diğer yandan yapıştırıcılar polimerik yapısı nedeni ile bağlantıların yorulma direncini arttırmaktadır. Yapıştırıcılar farklı termal genişleme katsayılarına sahip farklı malzemelerin birleştirilebilmesine de olanak tanımaktadır. Özellikle ince cidarlı yapılarda (plaka, boru, vb.) oldukça iyi sonuçlar alınmaktadır. Metal yapılara göre daha düşük dayanıma sahip olsalar da yapıştırıcılar geniş bir tutunma alanında yapısal uygulamalarda kullanılabilecek kadar yeterli dayanım sağlamaktadırlar (Da Silva, Öchsner, Adams, 2011).

Tüm bu avantajların yanında yapıştırma bağlantılarının konstrüksiyonunda yükleme sırasında ortaya çıkması muhtemel soyulma ve ayrılma gerilmeleri göz önünde bulundurularak tasarım yapılması gerekmektedir. Yapıştırıcıların ise polimerik yapıları nedeni ile aşırı sıcak ve nemin bulunduğu çevresel koşullarda dayanım değerleri sınırlıdır. Uygulama yüzeyinin solvent bazlı kimyasallar ile temizlenmesi ve ihtiyaç halinde mekanik aşındırıcılar ile yüzey pürüzlülüğünün artırılması gerekmektedir. Uygulama özelinde ise yapıştırıcının bağlantı bölgesine dağıtılması için özel ekipmanlara ihtiyaç duyulurken, yapıştırıcının sertleşerek kürlenebilmesi için sıcaklığa ihtiyacı bulunmaktadır (Da Silva, Öchsner, Adams, 2011).

Kardan mili uygulamalarında kullanılan fiber takviyeli polimer matrisli kompozit boruların her iki uç kısmına ise kardan milinin vites kutusu çıkışı ve arka aks girişine bağlantısını sağlayan sabit mafsallık ve kayıcı mafsallık alt kompleleri yapıştırma yöntemi kullanılarak monte edilmektedir.

Soo Kim, Tae Kim ve Lee (1992) S45C kalite alaşımsız orta karbonlu çelik malzemeden üretilmiş yorulma testi numuneleri kullanılarak gerçekleştirilmiş tek

tarafli bindirme formuna sahip yapıştırma bağlantıları kullanılarak yapıştırıcı kalınlığının ve yapıştırılan yüzeylerin yüzey kalitelerinin yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen yorulma testlerinden hareket ile optimal ortalama yüzey pürüzlülüğü 2 μm , optimal yapıştırıcı kalınlığı ise 0,15 mm olarak tespit edilmiştir. Elde edilen optimal değerler ışığında otomobil uygulamalarında ya da küçük helikopterlerde kullanılan güç aktarma mili prototipi yapıştırma bağlantıları kullanılarak üretilmiş ve test edilmiştir. Çalışma kapsamında dış çapı 66 mm olan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit boru ve S45C çelik boru kullanılarak üretimi gerçekleştirilen tek tarafli bindirme, çift tarafli bindirme, konik tek tarafli ve konik çift tarafli bindirme formuna sahip yapıştırma bağlantıları test edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda çift tarafli bindirme formuna sahip yapıştırma bağlantısının en fazla torsiyonel yük taşıyan bağlantı formu olduğu tespit edilmiştir.

Kim ve Lee (1995) dairesel, hegzagonal ve eliptik profile sahip bindirme bağlantılarının gerilme ve tork aktarım kapasitesini üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi analiz etmişler ve çıktıları deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında karbon fiber takviyeli epoksi reçineli kompozit boru ve çelik mil yapıştırılmıştır. Tork aktarım kapasitesi hesaplamasında kompozit malzemenin doğrusal tabaka özellikleri kullanılırken, yapıştırıcının doğrusal olmayan özellikleri kullanılmıştır. Yazarlar çalışma kapsamında dış çapı 66 mm ve et kalınlığı 3 mm, sarım açıları ise her bir altışar adetlik numune grubu için $[\pm 15]_{nT}$, $[\pm 30]_{nT}$, $[\pm 45]_{nT}$ olan karbon fiber takviyeli kompozit boru kullanmışlardır. Karbon fiber takviyeli borular dairesel, hegzagonal ve eliptik formlarda epoksi yapıştırıcı kullanarak çelik miller ile birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi öncesinde her iki parçaya ait yapışma yüzeyleri ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 1,5 – 2 μm olacak şekilde işleminden geçirilmiştir. Diğer yandan yapıştırma bağlantısının geçme (bindirme) boyu 60 mm, yapıştırıcı kalınlığı ise 0,15 mm olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda hegzagonal tip profile sahip tek tarafli bindirme formuna sahip yapıştırma bağlantısının en yüksek tork taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

Kara taşıtlarında ve endüstriyel ekipmanlar, kardan millerinin kendilerine özgü titreşim karakteristiğinden, ağırlığından ve kritik hız limitlerinden negatif şekilde etkilenmektedir. Kompozit borulu kardan millerinin ise bu olumsuzlukların üstesinden geldiği kanıtlanmış hatta uygulamaya özel titreşim ve kritik hız karakterine sahip kardan millerinin tasarımına olanak tanıdığı görülmüştür. Leslie ve arkadaşları (1996) gerçekleştirdikleri çalışma kapsamında 1960 yılından bu yana ağır ticari araç, hafif ticari araç ve endüstriyel uygulamaları özelinde gerçekleştirilen metal kardan mili uygulamalarının titreşim ve hız özelliklerine odaklanarak incelemişlerdir. Diğer yandan endüstrinin önde gelen firmalarının ağır ticari ve hafif ticari araç uygulamaları için gerçekleştirdiği uygulamalardan hareketle kompozit kardan mili uygulamaları özetlenmiştir. Yine çalışma kapsamında kompozit boru üretiminde kullanılan takviye elemanlarının mekanik özellikleri, boruların üretim yöntemi, sarım açıları ile ilgili bilgi verilerek torsiyonel dayanım hesaplarında kullanılan formüller verilmiştir. Son olarak hafif ticari araç ve ağır ticari araç uygulamaları özelinde karbon fiber, çelik ve alüminyum boru malzemeli kardan millerinin boyutsal, dayanım ve titreşim özellikleri karşılaştırılmış, kompozit boruya sahip kardan millerinin titreşim, gürültü ve sarsıntı özellikleri bakımında avantaj yaratarak kardan milinin yüksek devirlerde çalışmasına olanak tanıdığı belirtilmiştir.

Geun Bang ve Gil Lee (2002) yüksek hızda dönen hava soğutmalı fener millerinde kullanılmak üzere çalışma sıcaklıkları, maksimum dönme hızı, eğilme yükleri ve santrifüj etkisi ile ortaya çıkan radyal genleşme durumu göz önünde bulundurularak karbon fiber takviyeli ve epoksi matrisli kompozit boruya ve iki adet çelik bağlantı flanşına sahip tahrik mili tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Kompozit boruya ait sarım açıları / et kalınlığı ve yapıştırma bağlantısının özellikleri eğilme katılığı ve santrifüj özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilen titreşim hesaplamaları ve sonlu elemanlar ile analiz çalışmaları sonrasında belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında $[(90)_2/(\pm 5)_4/(90)_2/(\pm 5)_4]$ sarım açılarına ve 3 mm et kalınlığına sahip dış çapı 25 mm olan 250 mm uzunluğunda bir kompozit tahrik mili tasarlanmış ve üretilmiştir.

Shokrieh, Hassani ve Lessard (2004) farklı sarım açlarına ve boyutsal özelliklere sahip kompozit boruların torsiyonel burkulma özelliklerini analitik ve nümerik çalışmalar ile hesaplamışlardır. Gerçekleştirilen çalışma ile dış çapı 125,7 mm, boyu 2,47 m, et kalınlığı 1,32 mm olan kompozit borunun nümerik analizler yardımı ile 2.400 Nm torsiyonel yük altında torsiyonel burkulmaya uğradığı tespit edilmiştir. Diğer yandan yazarların gerçekleştirdiği sonlu elemanlar ile analiz çalışmaları, sarım açısının ve sarım sıralamasının torsiyonel burkulma dayanımına etki etmekte olduğunu göstermiştir.

Hoon Oh (2007) yapmış olduğu çalışmada kompozit malzemeler kullanılarak oluşturulmuş boru şeklindeki yapıştırma bağlantılarının dayanımını termal ve mekanik sanal analizleri birleştirerek öngörmeye çalışmıştır. Yazar, yapıştırıcının kurlenme sıcaklığından soğumasıyla yapıştırma bağlantısında ortaya çıkan artık termal gerilmeleri hesaplamak için sonlu elemanlar ile analiz yöntemlerini kullanılmış ve yapıştırıcıda ortaya çıkan mekanik gerilmeleri doğru bir şekilde modellemek için doğrusal olmayan yapıştırıcı davranışını içeren, doğrusal olmayan bir analiz gerçekleştirmiştir. Diğer yandan kalıntı termal gerilmelerin dağılımları çeşitli sarım açıları için incelenmiş ve kalıntı termal gerilmelerin bağlantının dayanımı üzerindeki etkisi de dikkate alınmıştır. Sonuçlar, kompozit borunun sarım açısına bağlı olarak artık termal gerilmelerin, mekanik yük uygulandığında yapıştırma bağlantısının hata türü ve dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yapıştırıcı bağlantılar, yükü mekanik bağlantılardan daha geniş bir alana dağıttıkları ve delik gerektirmedikleri için kompozit yapılar için yaygın olarak kullanılmaktadır, bu da gerilme yığılmasının azalmasına ve bağlantı mukavemetinin artmasına neden olmaktadır.

Hoon Oh (2007) yapmış olduğu bir diğer çalışmada kompozit malzemeler kullanılarak oluşturulmuş tek taraflı bindirme formuna sahip boru şeklindeki yapıştırma bağlantılarının doğrusal olmayan analizini yapıştırıcının doğrusal olmayan özelliklerini analize dahil ederek gerçekleştirmiştir. Bu amaçla çalışma kapsamında öncelikle genel bir yükleme karakterinde çok katmanlı kompozit borudaki gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmıştır ardından yapıştırıcının doğrusal özellikleri dahil

edilerek yapıştırma bağlantıları için iteratif çözüm üretmiştir. İlaveten yazar tarafından farklı tip kompozit malzemeler için yapıştırma bağlantısında kullanılan yapıştırıcıdaki gerilme dağılımları incelenmiş, sonuçlar lineer sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen nümerik analizlerin sonuçları, doğrusal analiz çalışmalarında yapıştırma bağlantılarının uç kısımlarında ortaya çıkan gerilme yığılmalarının, doğrusal olmayan analizlerde, yapıştırıcının katılığındaki yumuşama nedeni ile daha düşük seviyelerde ortaya çıktığı belirtilmiştir. Diğer yandan yazar, yapıştırma bağlantısında bindirme mesafesinin artırılmasına rağmen belli bir bindirme mesafesine ulaşıldıktan sonra tork taşıma kapasitesinin sabitlendiğini belirtmiştir.

Hoon Oh (2007) son çalışmasında ise farklı ana malzemelerin, tek taraflı bindirme formuna sahip boru şeklindeki yapıştırma bağlantılarının torsiyonel dayanımını üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında karbon fiber epoksi ve cam elyaf epoksi kompozit malzemeler kullanılmış, yapıştırıcı kalınlığı ve boru sarım açılarının yapıştırma bağlantısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda yapıştırma bağlantılarında ortaya çıkarın hasar türünün boru sarım açısı, yapıştırıcı kalınlığı ve ana malzemeler ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Termal genleşme katsayısındaki değişkenliklerden dolayı artık termal gerilmelerden çelik-karbon epoksi kompozit yapıştırma bağlantısının çelik-cam elyaf epoksi kompozit yapıştırma bağlantısına göre daha çok etkilendiği belirlenmiştir. Büyük sarım açılarında ve küçük yapıştırıcı kalınlıklarında çelik-karbon epoksi kompozit yapıştırma bağlantılarının tork taşıma kapasitesinin düşük olduğu görülürken aynı yapıştırıcı kalınlığında büyük sarım açılarında çelik-cam elyaf epoksi kompozit yapıştırma bağlantılarının daha fazla tork taşıma kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Artık termal gerilmelerin yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkisinin ise yapıştırıcı kalınlığının artırılması ile azaldığı vurgulanmıştır.

Hosseinzadeh ve Taheri (2009) kompozit boruların tek taraflı bindirme formuna sahip yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğunun bağlantının torsiyonel yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yazarlar daha önce gerçekleştirdikleri doğrusal elastik sonlu elemanlar ile analiz çalışmaları ile daha önce

gerçekleştirmiş olduğu çalışmalarda bindirme bölgelerinin uç kısımlarındaki kayma gerilmelerinin bindirme boyu uzatılarak azaltılamayacağını ispat etmişlerdir. Bu bulgu efektif bindirme boyu kavramının ortaya atılmasına neden olmuştur. Bu olgu, yazarlar tarafından, alüminyum-kompozit yapıştırma bağlantısına sahip bir sistemin tam elasto-plastik sonlu elemanlar ile analiz modeli geliştirilmiş ve sonlu elemanlar ile analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar ise deneysel çalışmalar ile doğrulanmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kompozit – alüminyum yapıştırma bağlantılarının statik tork taşıma kapasitesinin, yapıştırma bağlantısına ait bindirme uzunluğunun arttırılması ile arttığı tespit edilmiştir ancak bindirme boyunun efektif bindirme uzunluğunu aşması durumunda tork taşıma kapasitesinin sabit kaldığı görülmüştür.
- Belirli bir bindirme boyuna kadar yapıştırma bağlantısının yük taşıma kapasitesi artışının sınırlı bir seviyede kalması, bağlantının gerçekleştirilmesi sırasında ortaya çıkan süreksizliklerin bir etkisi olduğu belirtilmiştir.
- Yapıştırma bağlantısını oluşturan ana malzemelerin yapıştırma öncesi yüzey temizliklerinin deneysel çalışma sonuçlarının tutarlılığı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Bu bağlamda sonlu elemanlar ile analiz çalışmaları ile gerçekleştirilen çalışmaların ancak ideal yapıştırma bağlantısının simülasyonunu gerçekleştirebileceği belirtilmiştir.

Rao, Srikanth, Kumar, Sreenivasa Rao (2016) yapmış oldukları çalışma kapsamında otomobil uygulamalarında kullanılan karbon fiber ve cam elyaf takviyeli kompozit borulu kardan millerini araştırmışlardır. Doğru bir hesaplama için ANSYS yazılım paketi ile sonlu elemanlar ile analiz yöntemi kullanılarak kardan mili analizleri gerçekleştirilmiş ve doğrusal statik, doğal frekans, torsiyonel burkulma ve harmonik analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonunda cam elyaf takviyeli kompozit kardan milinin karbon fiber takviyeli kompozit kardan miline kıyas ile torsiyonel yük altında iki kat daha fazla deplasman yaptığı tespit edilmiştir. İlaveten karbon fiber takviyeli kompozit boruya sahip kardan milinin doğal frekansının cam

elyaf takviyeli kompozit boruya sahip kardan miline göre daha düşük bir doğal frekans değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Filho, Almeida Jr, Amico (2017) aks millerinde kullanılan filaman sarım tekniği kullanılarak üretilmiş karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit boruları incelemişlerdir. Üç farklı sarım açısına sahip olan numune grubu seçilmiş ve öncelikli olarak $[\pm 45]_5$ sarım açısına sahip borular torsiyonel teste tabi tutulmuştur. Torsiyonel teste ilaveten radyal ve boyuna bası testleri de gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan yazarlar test sonuçları ile ilişkilendirmek amacı ile nümerik çalışmalar da gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı sarım açısına sahip boru numuneleri içinde sarım açısı $[\pm 45]_5$ olan kompozit borunun en iyi tork ve radyal / boyuna bası yükü taşıma kapasitesine sahip numune olduğu tespit edilmiştir. Yazarlar deneysel olarak elde edilen sonuçların nümerik analizler ile ulaşılan sonuçlarla oldukça uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Badie, Mahdi ve Hamouda (2011) yapmış oldukları çalışmada sarım açılarının ve kompozit katmanlar diziliminin kompozit boruların torsiyonel katılığı, doğal frekansı, burkulma dayanımı, yorulma ömrü ve yorulma hata modları üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında kullanılan deney numuneleri el yatırma tekniği kullanılarak üretilmiştir. Çalışma sonucunda fiber açısı azaltılarak doğal frekans değerinin arttırılabileceği görülmüştür. Diğer yandan 90° sarım açısına sahip fiberler ilave edilerek radyal yöndeki elastisite modülünün arttırılması ile burkulma dayanımının arttırılabileceği tespit edilirken katman diziliminin de burkulma dayanımına etki ettiği belirtilmiştir. ± 45 derece sarım açısına sahip takviye elemanlarına sahip kompozit borunun yorulma dayanımının diğer sarım açılara sahip kompozit borulara göre daha iyi olduğu belirtilirken katman diziliminin de yorulma dayanımı üzerine etki ettiği vurgulanmıştır.

Çalışmamızın bu bölümünde ise filaman sarım tekniği kullanılarak üretilmiş karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit boru kullanılarak üretilen bir kardan milindeki yapıştırma bağlantısı incelenmiş ve bağlantının mekanik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılması planlanan çalışmanın çıktıları ile firmaların endüstriyel

anlamda kompozit borulu kardan mili ya da transmisyon şaftları tasarlayarak üretebilmesi hedeflenmiştir.

3.1.1 İnce Cidarlı Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Borular

Temelde kompozitler makroskobik düzeyde birbiri içinde çözünmeyen en az iki farklı malzemenin bir araya gelerek yeni özelliklere sahip farklı bir malzeme oluşturduğu yapılanmalardır. Bu malzemelerden süreksiz, sert, katı ve güçlü olana takviye adı verilirken, sürekli ancak daha yumuşak ve zayıf olana matris adı verilir. Kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesi ve katılığı çoğu zaman takviye elemanının özelliklerine ve hacimsel oranına bağlıdır. Her ne kadar takviye elemanları kompozit malzemelerin temel yük taşıma elemanları olsa da küçük kesitleri nedeni ile tek başlarına yük taşıyamazlar, ilaveten sürekli bir ortam içinde yani matris içinde bulunmadıkları için kuvvet de iletemezler. Dahası takviye elemanlarının bası yükü altındaki burkulma dayanımı o kadar düşüktür ki takviye elemanları bir yapı oluşturacak şekilde bir arada tutulamazlar. Kullanımda ortaya çıkan bu kısıtlamalar, takviye elemanlarının sürekli bir ortam sağlayan matris malzemeleri ile birleştirilerek kompozit yapıları oluşturması ile ortadan kaldırılmıştır. Matris malzemeler takviye elemanları bir arada tutarak yükün takviye elemanlara iletilmesini sağlarken, onları olumsuz dış ortam etkilerinden korur. Ancak matrislerin enine katılık değeri, dayanımı, kayma ve bası özellikleri, çalışma sıcaklık aralıkları ve kimyasal özellikleri kompozit malzemenin özelliklerini belirlemede baskın rol oynar (Derisi, 2008).

Polimer matrisli takviyeli kompozit yapılar oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Matris olarak kullanılan polimerler reçine olarak adlandırılmaktadır. Polimer matrislerin kompozit malzemeler içindeki hacimsel oranı %30 ile %40 arasında değişmektedir. Düşük yoğunluklu ve maliyetli, kolay işlem görebilen, iyi bir kimyasal dirence sahip olan ve düşük sıcaklıklarda işlem gören bir malzeme olması reçinelerin kullanımının yaygınlaşmasına neden olmuştur. Ancak reçinelerin düşük dayanım ve katılık özellikleri, düşük çalışma sıcaklığı aralıkları ve ultraviyole ışık hassasiyetleri bazı uygulama kısıtlamalarını da beraberinde getirmektedir (Derisi, 2008).

Reçineler termoset ve termoplastik olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Termoset reçineler geri dönüştürülemeyen kimyasal reaksiyon gösterirler, camlaşma sıcaklığı adı verilen bir sıcaklığın üzerine ısıtıldıklarında yapısal özelliklerini kaybederler ve kolayca deforme olurlar. Termoplastikler ise ısıtıldıklarında erirler ancak tekrar soğutulduklarında eski yapısal özelliklerini geri kazanırlar. Endüstride en yaygın kullanılan termoset reçineler polyesterler, vinil esterler ve epoksilerdir. Epoksiler iyi mekanik özelliklere sahip oldukları kadar olumsuz çevresel şartlara da oldukça dayanıklıdır. Yapışma dayanımları yüksek olduğu için yapıştırma uygulamalarında da yaygın olarak kullanılırlar. Epoksi reçinelere mekanik özelliklerini sertleştiriciler kazandırır. Çoğu zaman kullanılan sertleştiricinin tipi ve miktarı reçinenin mekanik özelliklerinde belirleyici rol oynar. Reçineler yüksek tokluk değerine, iyi yapışma ve çevresel direnç özelliklerine sahip olmalıdır. Diğer yandan reçinelerin hasara uğradıkları gerinim değerleri en azından takviye elemanların hasara uğradıkları gerinim değerlerine eşit olmalıdır. Bu durum matrisin yani reçinenin takviye elemanından önce hasara uğramasını engelleyecektir. Diğer yandan reçinelerin yapışma özelliklerinin iyi olması kompozit yapı içerisinde takviye elemanlarına kuvvet aktarımının da homojen bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayacaktır (Balya, 2004).

Takviye elemanlarının yani fiberlerin mekanik özellikleri, kaplamaları, kompozit yapı içindeki hacimsel oranı ve yönelim açısı kompozit yapıların mekanik özelliklerini belirler. Mekanik özellikler kullanılan fiber malzemenin cinsine göre değişirken kaplama fiberin reçine ile arasındaki bağ kuvvetlerini belirler. Fiberin kompozit içindeki hacimsel oranı kompozit yapının üretim tekniği ile sınırlı olsa da hacimsel oran arttırıldıkça kompozit malzemenin mekanik dayanımı ve katılığı artar (Balya, 2004).

Endüstriyel alanda, cam elyaf, aramid ve karbon fiber takviye elemanları yaygın olarak kullanılırken, yüksek dayanım ve düşük termal genleşme özelliği bulunan uygulamalarda çoğunlukla karbon fiber takviyeler kullanılmaktadır. Diğer takviye elemanlarına göre çekme / basma ve yorulma dayanımları daha yüksek olduğu gibi

maliyetleri de daha fazladır. PAN bazlı karbon fiber en yaygın kullanıma sahip olan fiberdir (Balya, 2004).

Giriş bölümünde de belirtildiği gibi otomotiv endüstrisinde ince cidarlı dairesel kesitli kompozit boruların kullanımı hem maliyet açısından hem de hafiflik açısından büyük avantajları beraberinde getirmektedir. Günümüzde araçlarda aranan yüksek performans, yakıt verimliliği ve düşük karbon salınımı gibi çevreci özellikler, güç ve hareket aktarımı uygulamalarında alternatif düşük yoğunluğa karşı yüksek dayanım ve rijitlik sağlayan kompozit malzeme kullanımını da öne çıkarmaktadır.

Kompozit borular otomotiv endüstrisi özelinde ise binek, hafif ve ağır ticari araç uygulamalarında aktarma organlarının önemli bir elemanı olan kardan millerinde de geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Düşük yoğunluk, yüksek özgül katılık, düşük döngüsel atalet ve yüksek titreşim sönümleme kabiliyeti fiber takviyeli polimer matrisli kompozit boruların kullanımını daha da popüler bir hale getirmiştir.

Sürekli takviyeli kompozit boruların üretiminde filaman sarım yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Filaman sarım yönteminin temel prensibi, reçine emdirilmiş elyaf takviyesinin, taşıyıcı çeviri ve mandrel dönüş hareketleri kullanılarak döner bir mandrel üzerine sarılmasına dayanmaktadır (Özbek, Kılınç, Bozkurt, 2020). Tekniğin geçmişi kuru tel ile güçlendirme ihtiyacı olan roket motoru hamillerinin sarımına kadar gitmektedir. Günümüzde ise havacılıkta, yüksek basınç boru hatlarında, basınçlı kaplarda ve güç / hareket ileten millerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Filaman sarma makinelerinin çoğu torna tezgahına benzerdir. Döner bir mandrel yatay olarak bir ayna ile gezer punta arasında desteklenir. Gezer punta yatay düzlemde serbestçe hareket ederken, ayna bilgisayar yardımı ile istenilen açı ve hızda döndürülür. Mandrel kendi eksenini etrafında dönerken, bir fiber taşıyıcı mandrel eksenini boyunca hareket ederek fiberi belirli bir açısal konumda ve gerginlikte mandrel çevresine sarar. Taşıyıcının hareketi ise aynanın dönüşü ile uyumlu bir şekilde bilgisayar tarafından kontrol edilir (Balya, 2004).

The diagram illustrates the filament winding process. It shows a spool of carbon fiber (Karbon Fiber Makara) on the left, which feeds fibers into a resin bath (Reçine Banyosu). The fibers then pass through a crosshead mechanism (Travers Mekanizması) and are wound onto a rotating mandrel (Mandrel) on the right. Arrows indicate the direction of fiber movement and the rotation of the mandrel.

Filaman sarım tekniği, yüksek dayanımlı kompozit boruların üretimi için kullanılan en etkin ve en yaygın yöntemdir. Özellikle iki ucu açık ince cidarlı dairesel formlu yapıların yani boruların üretiminde oldukça ekonomik ve güvenilir bir yöntemdir.

65

Kompozit boruya ait nümerik analiz çalışmalarında prototip üretiminde de kullanılması planlanan karbon fiber ve epoksi malzemeye ait mekanik özellikler kullanılmıştır, malzemelere ait değerler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Bu bağlamda nümerik çalışmalarda Toray firması tarafından üretilen 24K _T700s standart modül karbon fiber ve Hexion firması tarafından üretilen MGS L285 epoksi reçine malzemesinin mekanik özellikleri kullanılmıştır.

Tablo 3.1 Karbon fiber ve epoksi malzemelere ait mekanik özellikler

	Birim	Karbon fiber T700s	Epoksi MGS L 285
Özgül ağırlık	g/cm ³	1,80	1,18 – 1,20
Elastisite modülü	GPa	230	3,0 – 3,3
Maksimum Çekme Dayanımı	MPa	4900	70 – 80
Uzama	%	2,1	5,0 – 6,5

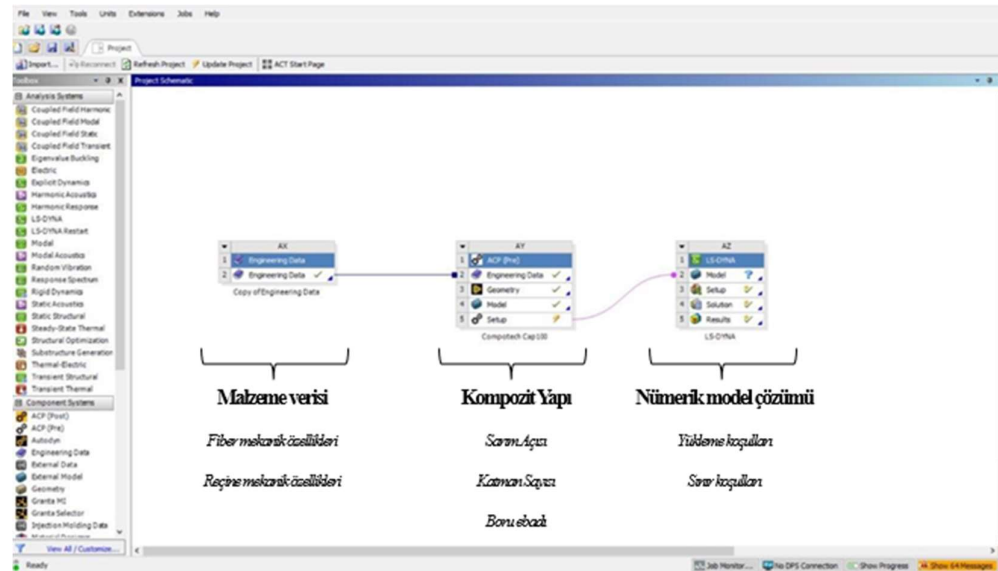
Nümerik analizlerde kullanılmak amacı ile kompozit boru, ANSYS 2022_R2 ileri kompozit modelleme modülü (ACP) kullanılarak modellenmiştir. ACP modülüne öncelikle fiber ve matris malzemelerin mekanik özellikleri tanıtılmış, ardından Tablo 3.3’de verilen katman kalınlık değerleri ve fiber sarım yönleri tanımlanarak kompozit boru geometrisi Tablo3.2’de belirtilen boru ebatlarına göre modellenmiştir. Kompozit boru modellemesi tamamlandıktan sonra LS_DYNA çözücüsü yardımı ile kompozit borunun burulma yükü altındaki davranışı incelenmiştir. İleri kompozit tasarım modülü ile gerçekleştirilen modellemeye ait iş akışı Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Fiber takviyeli kompozit borunun nümerik modellemesinde eleman tipi olarak “LS-DYNA finite element code shell” elemanı seçilmiştir. Modelleme işlemi gerçekleştirilirken kompozit borunun katılık davranışı esnek, burulma yükünün uygulanacağı plaka yapılanmasının katılık davranışı ise rijit olarak seçilmiştir. Modelleme sonunda boru üzerinde 1916 düğüm sayısı, 1824 adet eleman sayısı ortaya çıkmıştır. Diğer yandan modelleme sırasında kullanılan borunun ebatları prototip üretimi sırasında kullanılabilecek standart mandrel çaplarına uygun olarak seçilmiştir

Tablo 3.2 Karbon fiber takviyeli kompozit boruya ait boyutsal özellikler

	Birim	Kompozit Boru
İç çap (Mandrel çapı)	mm	100
Et kalınlığı	mm	4,1
Uzunluk	mm	1000
Ağırlık	kg/m	2,1

Tablo 3.3 Kompozit boruya ait fiber sarım yönleri ve katman sıralaması

Katman Sıra No	Kalınlık mm	Sarım Açısı °	Kesit Alanı mm ²
1	0,45	45	143
2	0,23	90	73
3	0,84	0	270
4	0,45	45	145
5	1,63	0	541
6	0,48	45	162



Şekil 3.3 İleri kompozit modelleme modülü iş akışı

Modelleme sırasında gerçekleştirilen malzeme tanımlamaları sonrasında kompozit boruya malzeme özellikleri eksenel yöndeki elastik modülü (E_1), radyal yöndeki elastik modülü (E_2) ve kayma modülü (G_{12}) Tablo 3.4 ‘de verilmiştir.

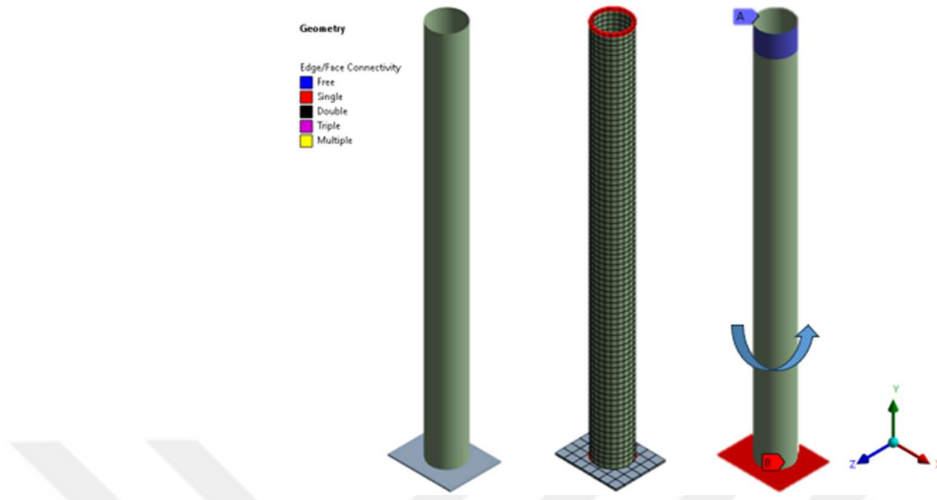
Tablo 3.4 Kompozit boruya ait mekanik özellikler

	Birim	Karbon /Epoksi
E_1	MPa	73.448,7
E_2	MPa	20.121,7
G_{12}	MPa	12.671,2
ρ	kg/m ³	1476

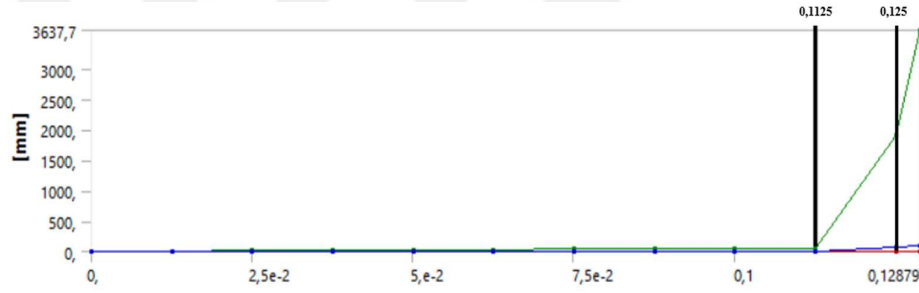
Kompozit boruya ait nümerik model, ağ yapı görünümü, sınır ve yükleme koşulları Şekil 3.5’de verilmiştir. Modelleme işlemleri tamamlanan kompozit borunun LS-DYNA çözücüsü ile sonlu elemanlar ile analizi gerçekleştirilmiştir. Kompozit boruya 0,25 sn içinde 30 kNm burulma yükü uygulanmıştır.

LS-DYNA çözücüsü yardımı ile koşturulan analizlerde kompozit boruda yüklemenin 0,1125. saniyesinde delaminasyon başlangıcı, 0,125. saniyede ise kompozit borunun tamamen hasara uğradığı görülmüştür. Şekil 3.5’te yükleme sırasında ortaya çıkan şekil değiştirme zamana bağlı olarak grafik şeklinde verilmiştir.

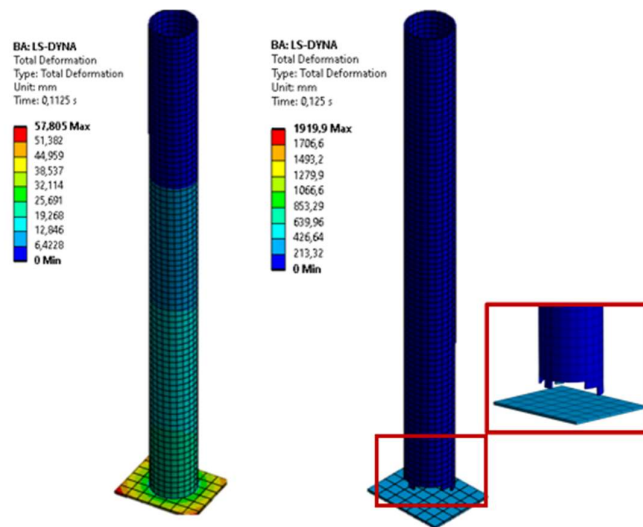
Nümerik analiz sırasında 0,1125’inci saniyede delaminasyon hatasının başladığı noktada uygulanan burulma yükü değerinin 16250 Nm olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Nümerik analiz sonuçları Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.4 Kompozit boruya ait nümerik model



Şekil 3.5 Zamana bağlı şekil değiştirme grafiği



Şekil 3.6 Kompozit boruya ait nümerik analiz sonuçları

Farklı sarım açlarına ve boyutsal özelliklere sahip kompozit boruların torsiyonel burkulma özellikleri Shokrieh, Hassani ve Lessard (2004) tarafından analitik ve nümerik çalışmalar ile hesaplanmıştır. Çalışmaları kapsamında kullandıkları ampirik formülün sonlu elemanlar ile analiz sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir. Diğer yandan Badie, Mahdi ve Hamouda' nın (2011) yapmış oldukları çalışma kapsamında karbon fiber takviyeli kompozit boruların burkulma dayanımı belirlemek için kullanmış oldukları formüle ait sonuçların nümerik analiz çalışmaları ile elde edilen sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu kapsamda Formül 3.1 ve Formül 3.2'ye ait sonuçlar Tablo 3.5'te nümerik analiz çalışmalarına ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde analitik ve nümerik sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

$$T_{burkulma} = \frac{1,854}{\sqrt{L}} \times E_1^{0,375} \times E_2^{0,625} \times t^{2,25} \times D^{1,25} \quad (3.1)$$

$$T_{burkulma} = (2\pi r^2 t)(0,272) \times [E_1 E_2^3]^{0,25} \times (t/r)^{1,5} \quad (3.2)$$

Tablo 3.5 Burulma burkulması sonuçlarının karşılaştırma

	Birim	Formül 3.1	Formül 3.2	Nümerik Analiz Sonucu
T_{burkulma}	Nm	15.268,7	16.516,64	16.250

Elde edilen sonuçlar ışığında Tablo 3.2'de verilen boyutsal özelliklere sahip karbon fiber takviyeli epoksi reçineli kompozit borunun burulma burkulma dayanımı 16.250 Nm olarak bulunmuştur ve fiziksel kompozit boru prototiplerinin bu ebatlarda hazırlanması uygun bulunmuştur.

3.1.2 Kompozit Boru – Metal Yapıştırma Bağlantısı

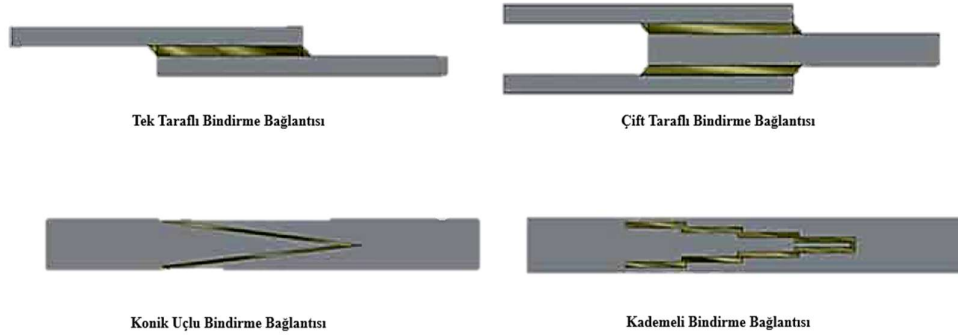
Enerji verimliliği yüksek taşıtlara olan talebin her geçen gün artıyor olması, taşıtların yapısal elemanlarında ve güç aktarma organlarında kompozit yapıların kullanımını arttırmıştır (He, 2011). Çoğu zaman yapının tamamında üretim ve maliyet kısıtlarından dolayı kompozit malzeme kullanılamayacağı için kompozitler metal parçalar ile mekanik ya da yapıştırma yöntemleri kullanılarak birleştirilir. Bağlantı elemanları ve perçin gibi geleneksel birleştirme yöntemlerinin malzemeler üzerinde yarattığı süreksizliklerin neden olduğu gerilme yığılmaları ve hazırlık aşamasında ortaya çıkması muhtemel delaminasyon ve fiber hasarları bağlantının dayanımını dramatik şekilde düşürmektedir. Bu nedenle birçok uygulamada kompozit malzeme ve metal arasında yapıştırma bağlantılarının kullanımı söz konusu olmuştur.

Yapıştırma bağlantıları, tasarım esnekliği, homojen gerilme dağılımı ve farklı malzemeleri birleştirme esnekliği ile mekanik bağlantıların yerini almakta, kullanımı her geçen gün artmaktadır (Xu, Li, 2010). Özellikle birleşme bölgesi boyunca sağladıkları homojen gerilme dağılımı, düşük çentik etkisi, bağlantının yüksek katılık değerine, yük taşıma kapasitesinin artmasına, ağırlığın azalmasına ve maliyetlerin düşmesine neden olmaktadır. Diğer yandan polimerik yapıları nedeni ile sahip oldukları yüksek sönümlenme özellikleri, yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımının iyi bir noktaya ulaşmasını sağlamaktadır. Yapıştırıcı malzemelerin sahip olduğu esneklik sebebi ile farklı termal genleşme katsayısına sahip olan malzemeler birleştirilebilmekte, özellikle ince cidarlı yapıların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar yapıştırılan malzemelere göre daha düşük mekanik özelliklere sahip olsalar da uygun bağlantı boylarında yapısal dayanım hedeflerini yakalanabilmektedir (Da Silva, Öchsner, Adams, 2011).

Yapıştırma bağlantıları beraberlerinde bazı dezavantajları da getirmektedir. Özellikle bağlantı tasarımlarında dayanımı arttırarak daha iyi noktalara taşımak için yırtılma ve ayrılma gerilmelerini olabildiğince azaltacak çözümlere odaklanılmalıdır. Diğer yandan yapıştırıcılar polimerik yapıları nedeni ile ekstrem sıcaklık ve nem koşullarına sınırlı dayanım gösterirler. Yapıştırma işlemi çoğu zaman aniden

gerçekleşmez ve zamana ihtiyaç duyar, dahası birçok uygulamada yapıştırıcının kürlenebilmesi için ısıya ihtiyaç vardır. Bu durum çok büyük ekonomik dezavantaj yaratır. İlavenen yapıştırılacak olan yüzeylerin temizliği birleşme bölgesinin dayanımını doğrudan etkiler. Yapıştırılacak yüzeyler, işlem öncesi kimyasallar kullanarak temizlenmeli ihtiyaç duyulması halinde mekanik temizlik de yapılmalıdır (Da Silva, Öchsner, Adams, 2011).

İnce cidarlı kompozit boruların birleştirilmesinde yaygın olarak uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti nedeni ile tek taraflı bindirme tipi yapıştırma bağlantısı formu tercih edilmektedir. Ancak bu tip birleştirme formu yapıştırma bağlantısının uç kısımlarında yüksek gerilme değerlerine ve yükleme durumunda ani gerilme dalgalanmalarına neden olmaktadır. Bu sakıncaları ortadan kaldırmak amacı ile uygulanabilirliği göz önünde bulundurularak çift taraflı bindirme formu, konik uçlu bindirme formu ya da kademeli bindirme formları da uygulamanın esnekliğine bağlı olarak kullanılabilir. Şekil 3.7’de farklı bağlantı formlarına ait görsel verilmektedir. Bağlantı tipinin yanı sıra yapıştırıcının kalınlığı, yapıştırılan malzemelerin yüzey kalitesi, yapıştırıcının kürlenme süresi ve çevresel koşullar da yapıştırma bağlantısının statik ve dinamik dayanımını etkilemektedir (Soo Kim, Tae Kim, Gil Lee, 1992).



Şekil 3.7 Yapıştırma bağlantısı formları (Banae, Da Silva, 2008)

Filaman sarım tekniği kullanılarak üretilmiş karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit boru kullanılarak üretilen kardan millerinde kompozit boru ile metal parçalar arasındaki yapıştırma bağlantısı, kardan milinin araç üzeri uygulamalardaki fonksiyonelliğini direkt olarak etkilemektedir. Bu bağlamda kompozit borunun metal

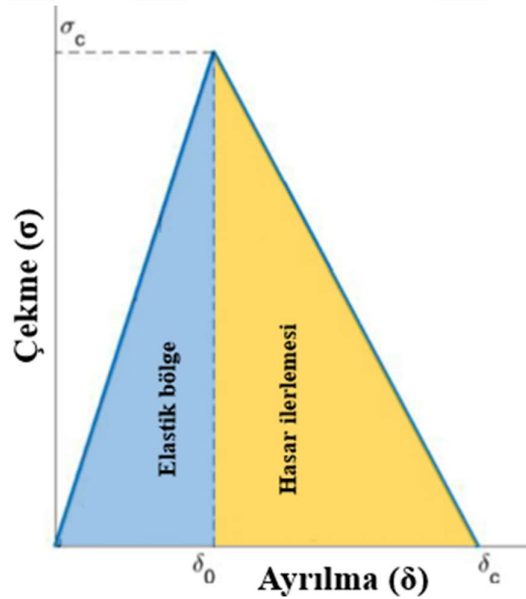
parçalar ile gerçekleştirdiği Şekil 1.4'te görülen tek taraflı bindirme formuna sahip yapıştırma bağlantısının burulma yükü taşıma kapasitesinin nümerik yöntemler ile doğru bir şekilde hesaplanması çok büyük önem taşımaktadır.

Sonlu elemanlar ile analiz yöntemleri karmaşık geometrik şekillere sahip yapılarda yükleme durumunda ortaya çıkan gerilme ve gerinim değerlerini belirlemede kullanılan oldukça yaygın bir yöntemdir. Yapıştırma bağlantılarının nümerik modellemelerinde ise yapıştırıcı ince bir ağ yapı şeklinde modellenerek analizin hassasiyeti artırılır ve birleşme bölgesindeki gerilim ve gerinim değerleri tespit edilir (Banae, Da Silva, 2008).

Yapıştırma bağlantıları doğaları gereği üretim kaynaklı hatalar barındırmaktadır. Çatlak ilk olarak bahse konu hata noktaların başlar ve ilerledikçe bağlantının hasara uğramasına neden olur. Yapıştırma bağlantılarının hasar dayanımı yapıştırıcının tipi, kurlenme çevrimi, yapıştırılan malzemelerin cinsi ve yapıştırıcı kalınlığı gibi faktörlere ya da bu faktörlerin kombinasyonuna bağlıdır. Bu noktada pahalı doğrulama testlerine duyulan ihtiyacı azaltarak yapıştırma bağlantısının dayanımını nümerik hesaplar ile öngörmek oldukça önemlidir. Bu bağlamda gerilme bazlı sürekli ortam mekaniği yaklaşımı, kırılma mekaniği yaklaşımı ve hasar modelleme yaklaşımı arasında gerçek yapıştırıcı davranışına en yakın sonucu hasar modelleme yaklaşımı vermektedir (Banae, Da Silva, 2008).

Hasar modelleme yaklaşımı ile tek bir nümerik analiz kapsamında yapıştırma bağlantısını oluşturan malzemelerin önceden belirlenmiş bir çatlak ilerleme hattı boyunca ya da rastgele seçilmiş bir bölgede hasar gerçekleşinceye kadar gösterdiği davranış adım adım gözlemlenebilir. Bilinen yaklaşımlar ile hasarın modellenmesi, yükleme sonucu ortaya çıkan hasarın yapıştırıcı bölgesi içinde hangi noktada ortaya çıktığını tahmin etmeyi mümkün kılar. Yapıştırıcı bölgesi modellenmesi (cohesive zone method_CZM), yapıştırıcı bölgesinde ortaya çıkan hasarın önceden belirlenmiş bir hasar hattı boyunca birbirine bağlanmış olan düğüm noktalarının arasındaki çekme-ayrılma davranışına göre makroskobik olarak simüle edilmesine olanak tanır (50_Banae, 2008).

Bu yöntemde yapıştırıcı tabakası, yapıştırıcı çekimi ile bir arada duran tek sıra kontak elemanlar ile değiştirilir. Nümerik analizin doğruluğu kontak elemanlara yapıştırıcının çekme-ayrılma davranışının doğru bir şekilde tanımlanması ile mümkündür nitekim çekme-ayrılma davranışı yapıştırıcının yük altındaki davranışını tanımlar. Diğer yandan yapıştırıcı tabakasının kontak elemanlar ile değiştirilmesi nümerik analize ait çözüm süresini kısaltarak keskin köşelerde ve süreksizlik noktalarındaki tekil gerilme artışlarını ve ağ yapı sorunlarını da ortadan kaldırır. Çekme – ayrılma davranışı hasarın oluşmadığı elastik bölge ve hasarın gelişim gösterdiği plastik bölge olarak ikiye ayrılabilir. Hasar başlangıcı öncesinde yapıştırıcı elastik malzeme olarak modellenir. Hasar, spesifik bir hasar başlangıç noktasına ulaşıldığında (σ_c) ortaya çıkar, o noktaya kadar ana malzemeler ayrılmaya zorlanır. Çatlak başlangıcı ortaya çıktığında çatlak ilerledikçe çekme azalmaya başlar ve yumuşama ortaya çıkar. Son olarak şekil değiştirme miktarı (δ_c) değerine ulaştığında yapıştırma bağlantısı tamamıyla ayrılarak yük taşıyamaz hale gelir. Şekil 3.8’de yapıştırıcıların çekme ve ayrılma davranış grafiği görülmektedir (3M, 2020).

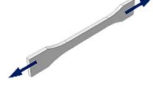
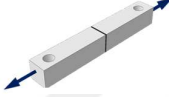
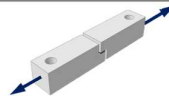
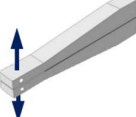
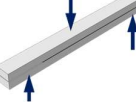


Şekil 3.8 Yapıştırıcıya ait çekme – ayrılma grafiği (3M, 2020)

Bu yaklaşım ile gerçekleştirilecek nümerik analizlerde kullanılmak üzere yapıştırıcının çekme-ayrılma davranışı tespit edilmeli ve elde edilen malzeme özellikleri malzeme kartına yüklenmelidir.

Tablo 3.6’da yapıştırıcı alan modelini oluşturmak için ihtiyaç duyulan malzeme özellikleri ve gerçekleştirilmesi gereken testler verilmiştir (3M, 2020).

Tablo 3.6 Yapıştırıcı malzeme özellikleri ve test yöntemleri (3M, 2020)

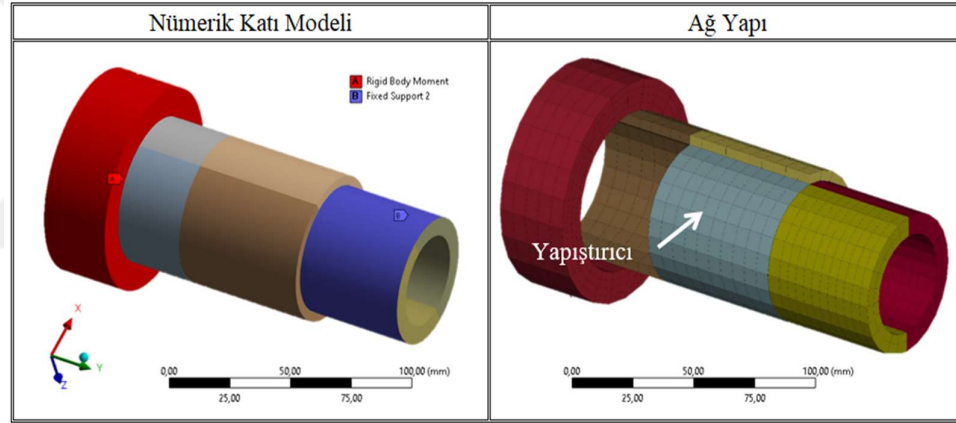
Bölge	Test Adı	Gösterim	Malzeme Sabiti
Elastik	Çekme Testi (yapıştırıcı)		Young Modülü Poisson Oranı
Hasar Başlangıcı	Çekme Testi Alın altına bağlantı (kalın yapıştırıcı)		Çekme Dayanımı
	Kesme Testi (kalın yapıştırıcı)		Kayma Dayanımı
Hasar İlerleme	Konik ankastre çift kiriş ayırma testi (TDCB)		Mode I Kırılma Enerjisi
	Uç çentikli eğilme testi (ENF)		Mode II Kırılma Enerjisi

Çalışmanın bu bölümünde filaman sarım tekniği kullanılarak üretilmiş karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit boru ile metal parçalar arasındaki yapıştırma bağlantısının nümerik analizinin daha kısa sürede gerçekleştirilmesi amacı ile Şekil 3.9’da görülen basitleştirilmiş tek taraflı bindirme formuna sahip bağlantı modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bağlantı modellemesi gerçekleştirilirken yapıştırıcı iki metal parça arasında modellenmiştir. Modellemede Tablo 3.7 verilen ISO 683-1 standardına uygun C45 E karbon çeliğine ait malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Nümerik model oluşturulurken yapıştırıcının kalınlığı ve bindirme boyu Kim ve Lee’nin (1995) yapmış olduğu çalışmadan hareket ile sırasıyla 0,15 mm ve 60 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.7 TS EN ISO 683-1 C45 E malzeme özellikleri

	Birim	Değer
Elastisite modülü	GPa	210
Akma Dayanımı	MPa	370
Çekme Dayanımı	MPa	630 ÷ 780
Yüzde Uzaması	%	17



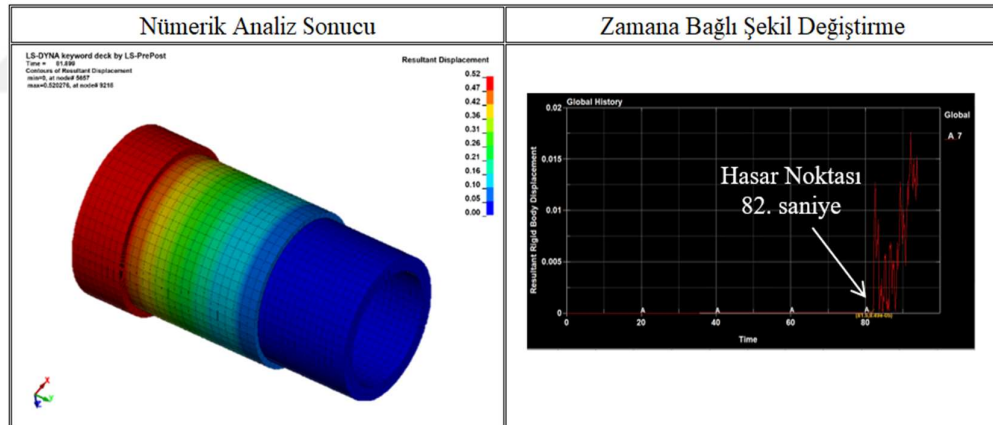
Şekil 3.9 Yapıştırıcı bağlantısı nümerik modeli ve ağ yapısı

Diğer yandan yapıştırıcı malzemesinin malzeme tanımlaması için LS-DYNA MAT 138 malzeme kartı kullanılarak 3M DP490 akrilik yapısal yapıştırıcıya ait Tablo 3.8’de verilen değerlerin tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcıya ait malzeme bilgileri 3M firmasından temin edilmiştir. Analiz sırasında nümerik modele 0-100 sn zaman aralığında kırmızı renkli halka üzerinden statik olarak 30 kNm burulma yükü uygulanırken, model mavi renkli alandan sabitlenmiştir.

Zamana bağlı olarak gerçekleştirilen analizin 82. saniyesinde 24,6 kNm burulma yüküne ulaşıldığında yapıştırıcının koparak ayrıldığı görülmüştür. Şekil 3.10’da nümerik modelin burulma yükü altındaki davranışı ve zamana bağlı şekil değiştirme grafiği görülmektedir.

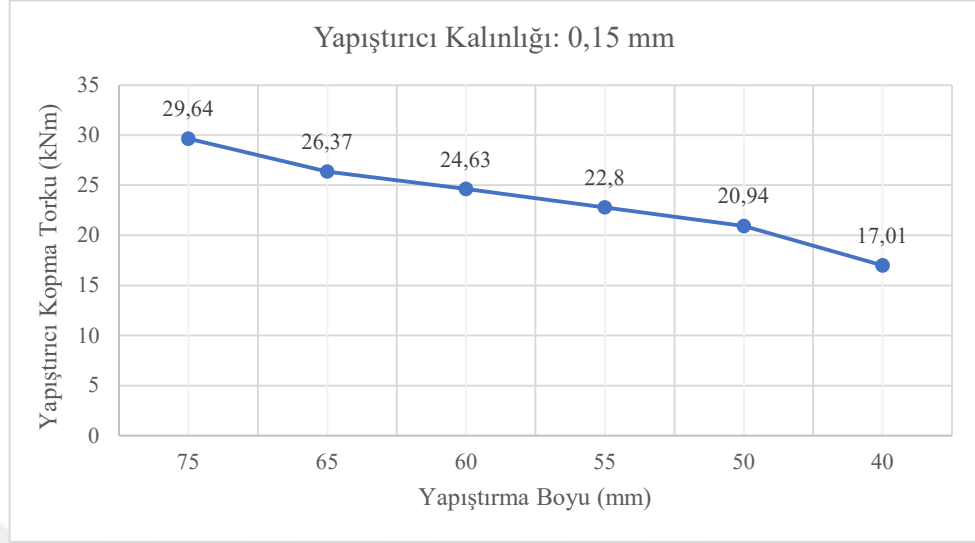
Tablo 3.8 3M DP 460 Yapısal yapıştırıcıya ait malzeme özellikleri

DP 460	Malzeme Özellikleri	
	0,3 mm kalınlık	
R₀	t/mm ³	1,08e-06
EN	MPa	1635
ET	MPa	568
GI_c	kJ/m ²	2,1
GII_c	kJ/m ²	6,0
GIII_c	kJ/m ²	6,0
T	MPa	32,2
S	MPa	27,8
UND	mm	0,125
UTD	mm	0,23

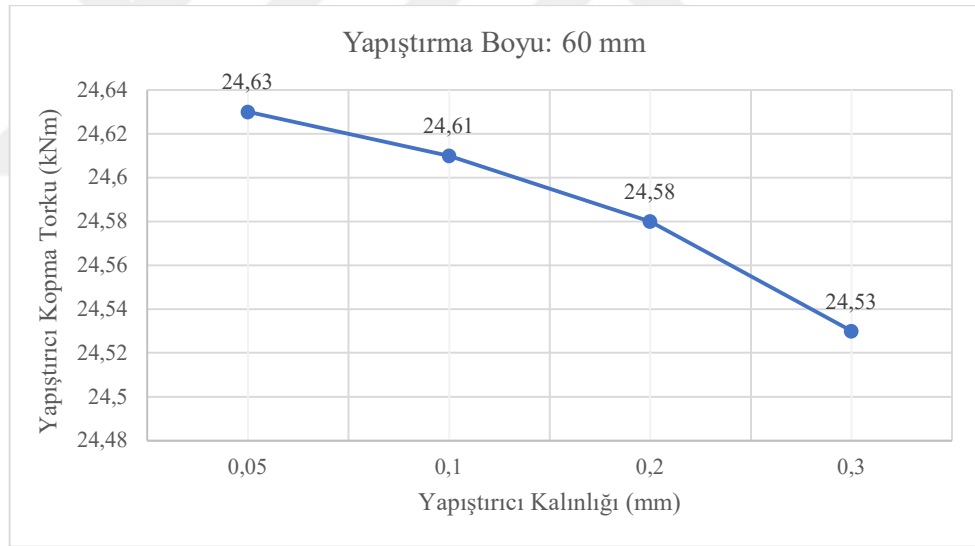


Şekil 3.10 Nümerik analiz sonucu ve zamana bağlı şekil değiştirme grafiği

Nümerik sonuçların elde edilmesini takiben, yapıştırma bağlantısının boyutsal optimizasyonu için farklı yapıştırıcı kalınlıkları ve bindirme boylarında nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen nümerik analizlerde ulaşılan sonuçlar sırası ile Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.11 Yapıştırma boyu – kopma torku grafiği



Şekil 3.12 Yapıştırıcı kalınlığı – kopma torku grafiği

Elde edilen nümerik sonuçlar ışığında yapıştırıcı kalınlığı arttıkça ve yapıştırma uzunluğu yani bindirme boyu azaldıkça burulma yükü taşıma kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Bu bağlamda nümerik sonuçlara göre bindirme boyu ve yapıştırıcı kalınlığı için en iyi kombinasyonun sırasıyla 60 mm ve 0,15 mm olduğu görülmüştür.

Ancak üretim sırasında ortaya çıkması muhtemel süreksizliklerin ve montaj hatalarının yapıştırma bağlantısı üzerindeki olumsuz etkilerini dengelemek için fiziksel prototiplerin üretiminde bindirme boyu 70 mm olarak belirlenmiştir.

3.2 Kompozit Kardan Mili Üretim ve Test Süreçleri

3.2.1 Karbon fiber takviyeli kompozit boru üretimi

Bölüm 3.1.1’de gerçekleştirilen nümerik analizler sonrasında Tablo 3.1’de verilen karbon fiber ve epoksi reçine malzemeler kullanılarak, Tablo 3.2’de boyutsal özellikleri listelenen karbon fiber takviyeli epoksi reçineli kompozit boru Şekil 3.13’te görülen filaman sarım makinası kullanılarak Tablo 3.3’te belirtilen sarım açıları ve katman kalınlıklarına sahip olacak şekilde üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.13 Filaman sarım makinası (Compo Tech Plus, 2023)

Karbon fiber takviyeli kompozit boruların üretimi Compo Tech Plus spol. s r.o. firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Kompozit borular, boyu 3,5 m, dış çapı ise 100 mm olan mandrel kullanılarak sarılmıştır.

Sarım işlemi sonrasında kompozit borunun dış çapının korunması amacı ile dış çap plastik bant ile kaplanmıştır. Kompozit borular sevkiyat öncesinde 1183 mm boya kesilmiş ve daha sonra 9 adet borunun sevkiyatı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te sırasıyla teslim alınan kompozit borular ile bir boruya ait kesit görülmektedir.



Şekil 3.14 Karbon fiber takviyeli kompozit boru numuneleri

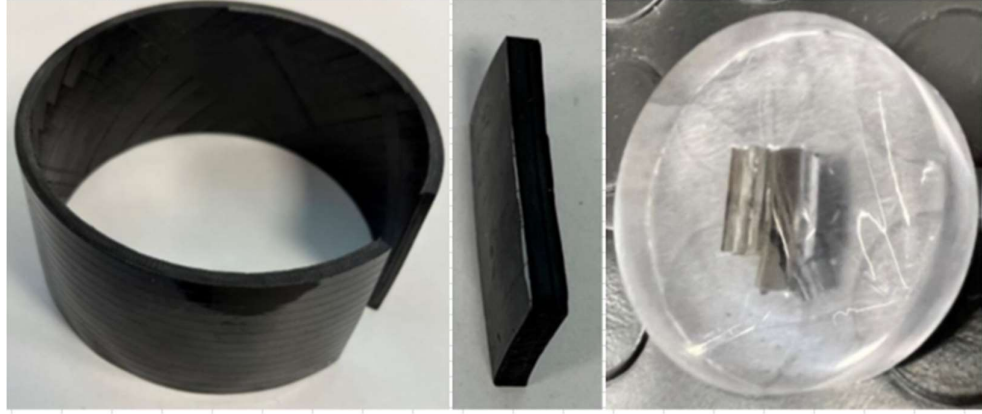


Şekil 3.15 Karbon fiber takviyeli kompozit boru kesit görüntüsü

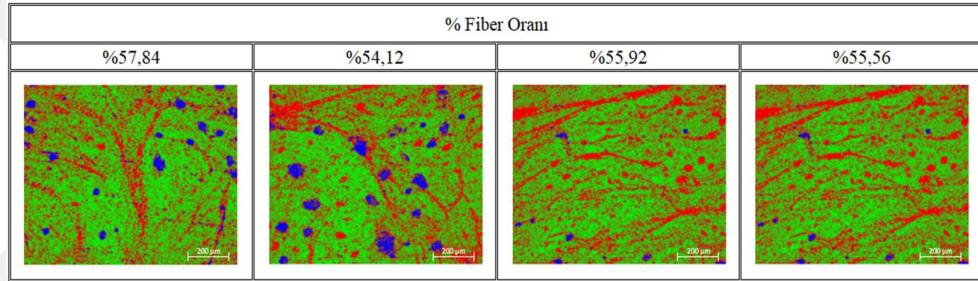
Kompozit boruların Compo Tech Plus firması tarafından verilen teknik verileri Tablo 3.7’de listelenmiştir. Diğer yandan kompozit borulara ait fiber oranının tespit edilmesi amacı ile mikro yapı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla temin edilen boruların içinden rastgele seçilen bir numuneden 10 cm uzunluğunda bir parça kesilmiştir. Kesilen parçadan inceleme için kesit çıkarılarak bakalite alınmış ve mikro yapı görüntüleri dört farklı bölgeden Nikon marka MQ100H optik mikroskop kullanılarak alınmıştır. Alınan görüntüler daha sonra Clemex görüntü işleme yazılımı kullanılarak incelenmiş ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozit boru içindeki fiber oranı, reçine oranı ve boşluk oranları tespit edilmiş. Şekil 3.16’da incelenen numuneler, Şekil 3.17’de ise Clemex görüntü işleme yazılımı ile elde edilen kesit görüntüleri ve karbon fiber oranları verilmiştir. Tablo 3.8’de ise kompozit boru kesitlerinden elde edilen oranlar verilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda birçok boru üreticisi takviyeli kompozit borularda fiber oranı $\%55 \pm 2$ aralığında garanti etmektedir. Mikroyapı incelemesi sonuçları incelendiğinde tedarikçi firmanın garanti etmiş olduğu fiber oranlarını sağladığı görülmektedir.

Tablo 3.9 Karbon fiber takviyeli kompozit boru teknik verileri

Özellik	Birim	Değer
Dış çap	mm	108,2
İç çap	mm	$100 \pm 0,05$
Et kalınlığı	mm	4,1
Uzunluk	mm	1000
Ağırlık	kg/m	2,1
E ₁	MPa	88.978
E ₂	MPa	15.202
G ₁₂	MPa	14.171
ρ	kg/m ³	1476
Eğilme Katılığı	Nmm ²	$1,6E+11$
Burulma Katılığı	Nmm ²	$5,1E+10$
Fiber oranı	%	58^{-3}



Şekil 3.16 Kompozit boru mikroyapı kesitleri



Şekil 3.17 Kompozit boru yüzde karbon fiber oranı

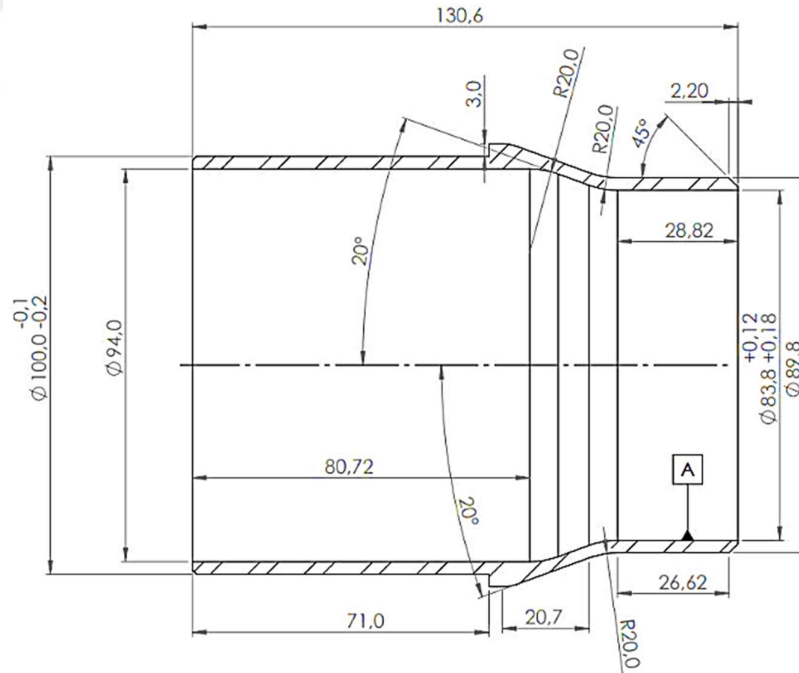
Tablo 3.10 Kompozit boru fiber, reçine ve boşluk oranları

		1. ölçüm	2. ölçüm	3. ölçüm	4. ölçüm
Fiber oranı	%	57,84	54,12	55,92	55,56
Reçine oranı	%	37,98	41,23	43,12	42,55
Boşluk oranı	%	4,17	4,78	0,94	1,84

Mikroyapı incelemesi sonrasında 1183 mm uzunluğundaki borularda radyal salgı kontrolü yapılmıştır. Boru ortasındaki radyal salgı değeri toplam indikatör sapması göz önünde bulundurularak 0,8 – 1 mm arasında tespit edilmiştir. Diğer yandan teslim edilen boru numunelerinin görsel kontrolünde iç çap ve dış çap yüzeyleri üzerinde çizilme, ezik, kırılma, delaminasyon, fiber kalkması gibi hasarlar tespit edilmemiştir. Bu bağlamda boruların doğrulama çalışması için kullanımı uygun bulunmuştur.

3.2.2 Kompozit kardan mili üretimi

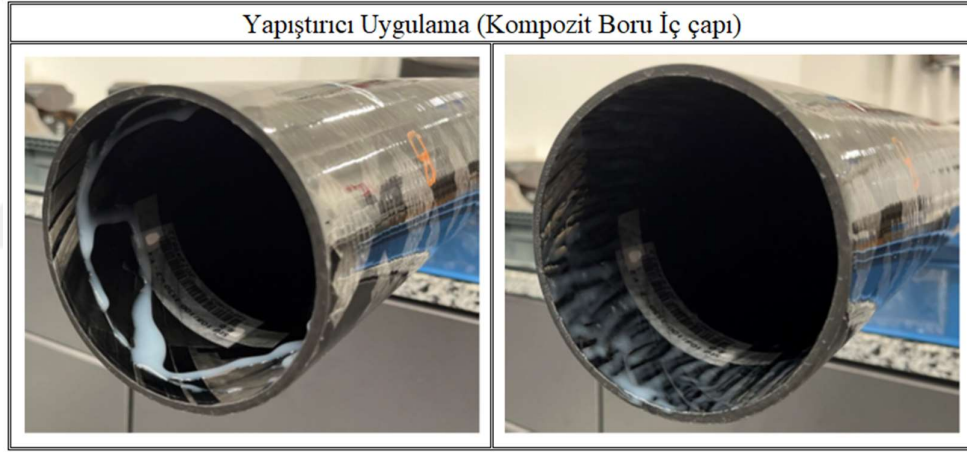
Kompozit boruya ait kontrollerin tamamlanmasını takiben kardan milinin üretiminin gerçekleştirilebilmesi için öncelikli olarak Tablo 3.7 malzeme özellikleri verilen C45 E karbon çeliğinden üretilmiş metal adaptörlerin yapışma bölgelerindeki yüzey temizlikleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey temizleme işlemi sırasında metal adaptörün bindirme bölgesi metanol ile temizlenerek yapışmayı etkilemesi muhtemel etkiler ortadan kaldırılmıştır. Diğer yandan metal adaptörün kompozit boru içerisine geçen çapı nümerik analizler ile belirlenen yapıştırıcı kalınlığının sağlanabilmesi için hassas bir şekilde işlenmiştir. Metal adaptöre ait boyutsal özellikler Şekil 3.18'deki çizimde verilmiştir. İlâveten kompozit borunun da iç çapında bulunan yapıştırma yüzeyleri metanol ile temizlenerek yapıştırma bağlantısının kalitesini etkileyecek unsurlardan temizlenmiştir.



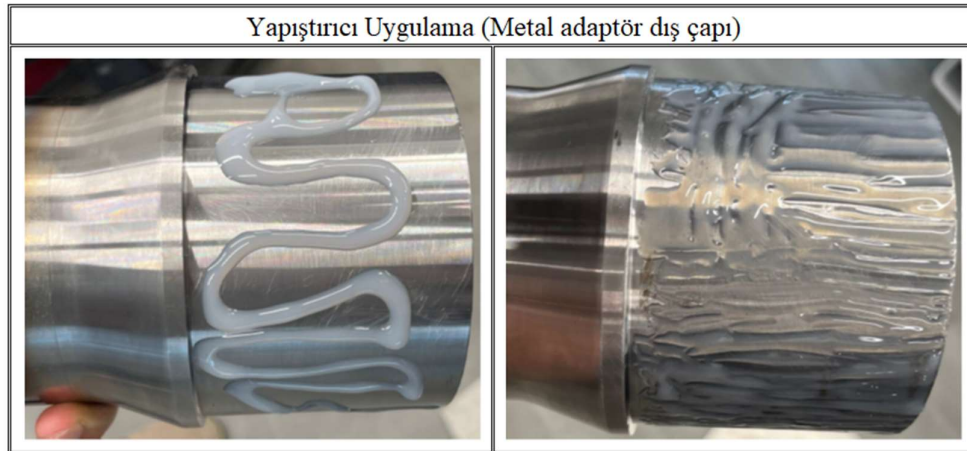
Şekil 3.18 Metal adaptöre ait boyutsal özellikler

Yapıştırma bağlantısının oluşturulması amacı ile Bölüm 3.1.2’de detaylandırılan nümerik analizlerde malzeme bilgileri kullanılan, Tablo 3.6’da da malzeme özellikleri verilen 3M DP460 çift komponentli akrilik tip yapıştırıcı kullanılmıştır.

Yapıştırıcı Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de de görüldüğü gibi hem kompozit hem de metal adaptör parça üzerine uygulanmış, her iki yüzey de ıslatılmıştır. Yapıştırıcıya ait komponentler bağlantı yüzeylerine özel bir uç yardımı ile 2:1 oranında karıştırılarak uygulanmıştır. Bu işlemin ardından kompozit boru ve metal adaptör birleştirilerek yapıştırma bağlantısı oluşturulmuştur. Yapıştırma bağlantısı oluşturulurken bindirme alanı boyunca süreksizlik oluşmasını engelleyebilmek için metal adaptör boruya monte edilirken döndürülerek monte edilmiş, kompozit boru ve metal adaptör alın yüzeyleri birbirine temas ettikten sonra adaptör parça 90 derece daha yavaşça çevrilerek işlem tamamlanmıştır. Bağlantı, yapıştırıcının kurlenmesi amacı ile 25 ± 2 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir.

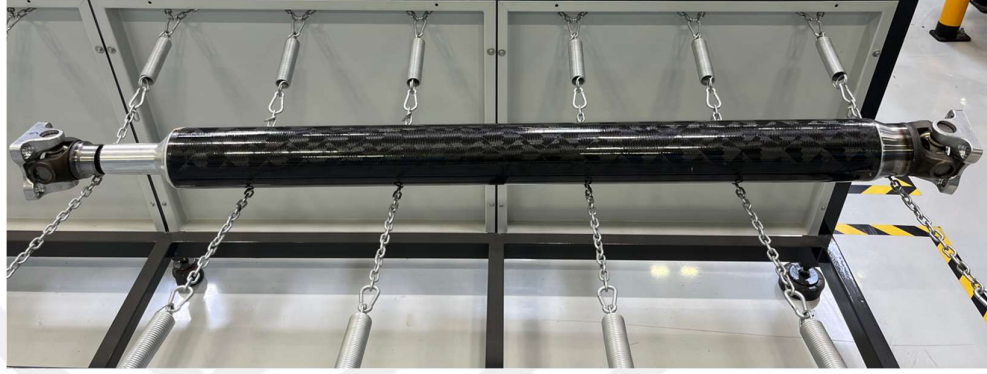


Şekil 3.19 Kompozit boru iç çap yapıştırıcı uygulama



Şekil 3.20 Metal adaptör dış çap yapıştırıcı uygulama

Bu yöntem kullanılarak toplamda 6 adet numune kardan mili üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.21’de üretimi tamamlanan kardan millerinden biri görülmektedir.



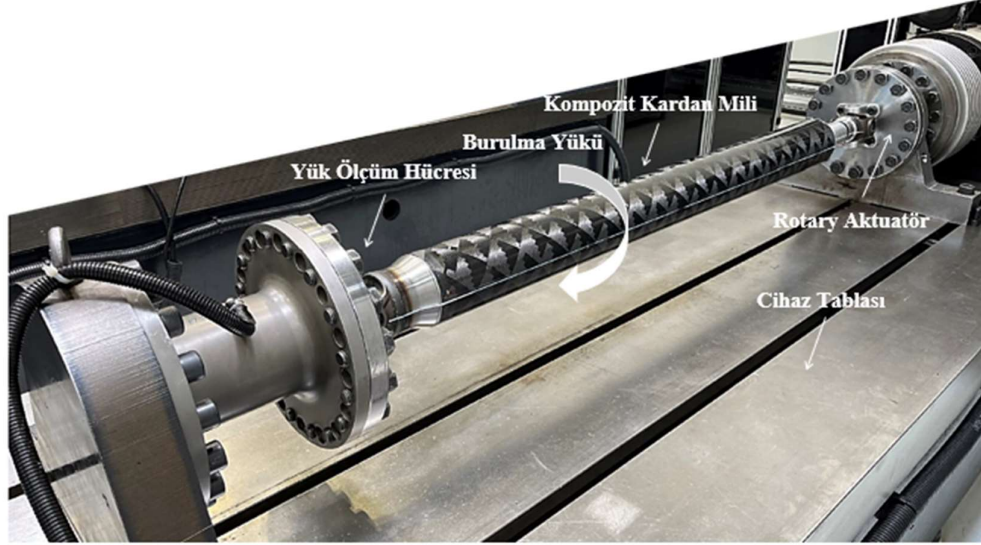
Şekil 3.21 Üretimi tamamlanan kompozit kardan mili

3.2.3 Kompozit kardan mili testleri

Altı adet olarak üretilen kompozit kardan mili numunelerinin üç adedi ile statik torsiyon üç adedi ile torsiyonel yorulma testi gerçekleştirilerek deneysel sürecin tamamlanması planlanmıştır. Deneysel çalışmalarda Instron marka PDF 16 model statik torsiyon ve torsiyonel yorulma test cihazı kullanılmıştır. Test cihazı statik olarak 16 kNm, dinamik olarak da 12 kNm yük uygulama kapasitesine sahiptir. Test numunesinin katılık değerine bağlı olarak yorulma testleri 3 Hz’lik frekans bandında gerçekleştirilmiştir. Cihaza yatayda sıfır derece açı yapacak şekilde bağlanan kardan milleri oda sıcaklığında test edilmiştir. Şekil 2.15’te statik torsiyon ve torsiyonel yorulma test cihazına ait şematik gösterim verilmiştir.

Statik torsiyon testlerinde kardan mili test cihazı üzerinde bulunan iki adet bağlantı flanşının arasına sabitlenir. Burada amaç kardan milini hasara uğrayıncaya kadar dönme eksenini çevresinde burulma momentine maruz bırakarak kardan milinin burulma yükü davranışını belirlemektir. Kompozit kardan mili numunelerinin statik torsiyon testleri 50 Nm/sn yük uygulama hızında gerçekleştirilmiş, testler kompozit kardan mili hasar görünceye kadar devam ettirilmiştir. Test sonucunda kardan milinin

akma noktası, kırılma noktası ve torsiyonel katılık değeri belirlenmiştir. Kompozit kardan milinin test cihazına bağlantı şekli Şekil 3.22’de verilmiştir.

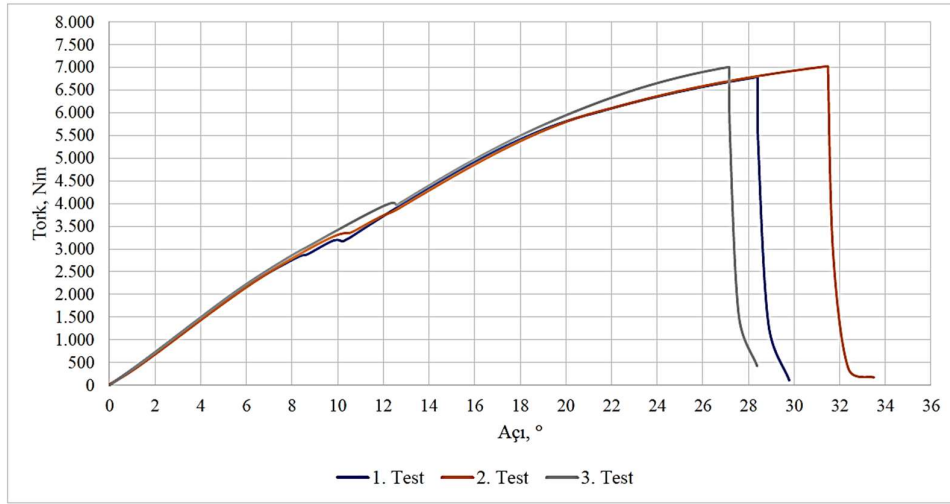


Şekil 3.22 Kompozit kardan milinin statik torsiyon cihazına bağlantı şekli

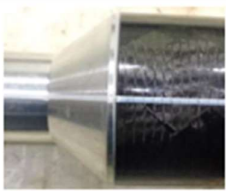
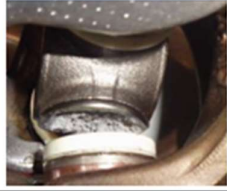
Üç adet kompozit kardan mili numunesi kullanılarak gerçekleştirilen statik torsiyon testlerine ait sonuçlar Tablo 3.9’da verilmiştir. Diğer yandan her üç teste ait tork-açı eğrileri Şekil 3.23’te verilmiştir. Birinci test sonucunda kardan mili kayıcı mafsallı istavrozlu bitiminden kırılmıştır. İkinci ve üçüncü test sonucunda ise sabit mafsallı istavrozlu bitiminden kırılmıştır. Kardan mili komplelerine ait yapıştırma bağlantıları ve kompozit borular statik torsiyon testlerini hasarsız olarak tamamlamışlardır. Şekil 3.23’te statik torsiyon testleri sonrası numune kardan millerinin durumu görülmektedir.

Tablo 3.11 Statik torsiyon testi sonuçları

	Akma Noktası	Kırılma Noktası	Torsiyonel Katılık
	Nm	Nm	Nm/°
1. Test	5300	6782	300
2. Test	5500	7022	306
3. Test	5900	7004	310

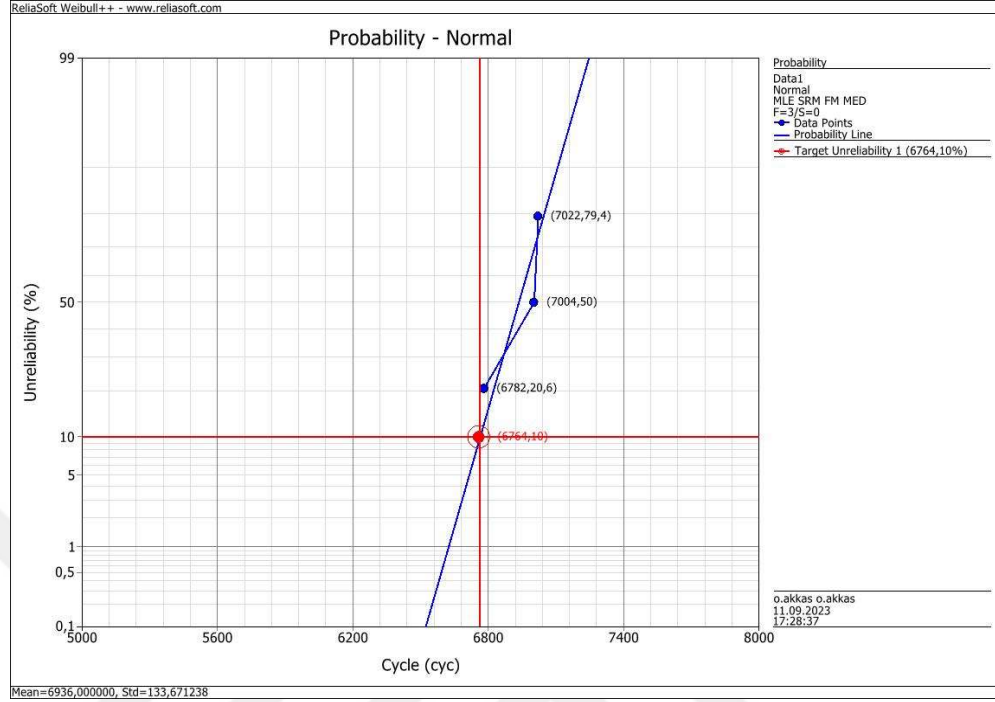


Şekil 3.23 Statik torsiyon testi burulma momenti – açısıl deformasyon eğrileri

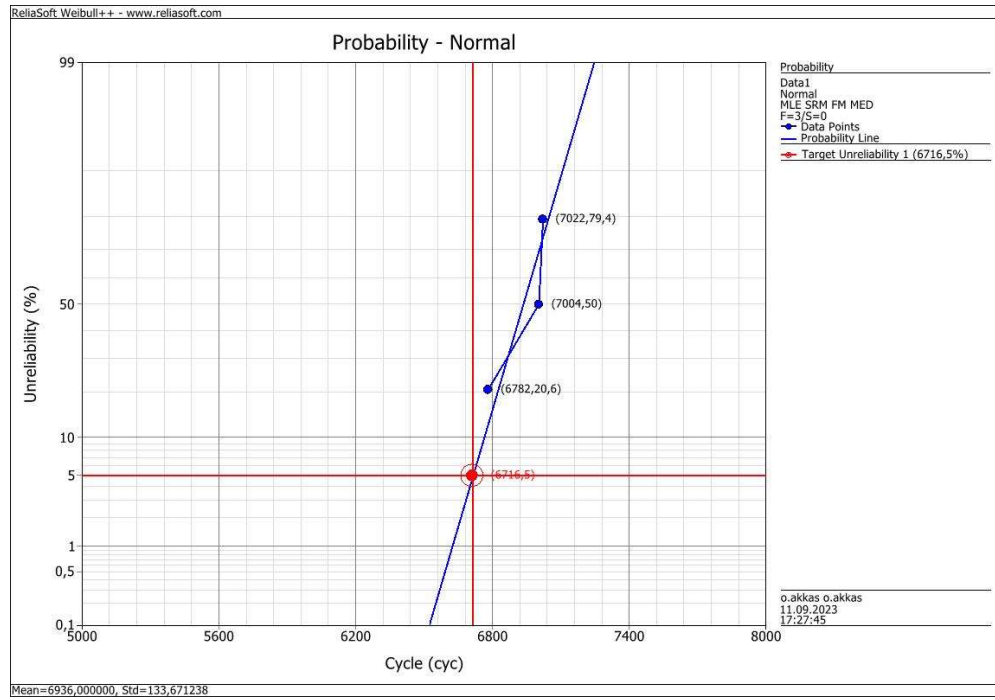
Statik Torsiyon Test Sonuçları				
	Kırılma Noktası	Sabit Mafsıl Yapıştırma Bağlantısı	Kayıcı Mafsıl Yapıştırma Bağlantısı	Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Boru
1. Test				
2. Test				
3. Test				

Şekil 3.24 Statik torsiyon testi sonrası kardan mili birim parçalarının durumu

Statik torsiyon testleri sonrasında elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edilmiş, kompozit kardan milinin %90 güvenilirlik aralığında 6764,10 Nm (Şekil 3.25), %95 güvenilirlik aralığında ise 6716,5 Nm (Şekil 3.26) burulma momentine hasar görmeden dayanabildiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.25 Statik torsiyon testi sonuçlarının istatistiksel analizi (%90)



Şekil 3.26 Statik torsiyon testi sonuçlarının istatistiksel analizi (%95)

Torsiyonel yorulma testlerinde de kardan mili test cihazı üzerinde bulunan iki adet bağlantı flanşının arasına sabitlenmektedir. Kardan millerini oluşturan yapıştırma bağlantılarının burulma yükleri altındaki yapısal dayanıklılığı, kardan millerinin servis ömrünü direkt olarak etkilemektedir. Bu bağlamda çalışma kapsamında araç üstü testler sırasında kardan milinin maruz kaldığı burulma yükleri belirlenerek kardan miline ve dolayısıyla yapıştırma bağlantısına etki eden burulma yükü tespit edilmiştir.

Bu testler ile amacımız kardan milinin tekrarlı burulma yükleri altındaki davranışını belirlemektir. Burulma yükü çoğu zaman tam değişken bir karakterde ortalama gerilme sıfır olacak şekilde uygulanmaktadır. Kompozit kardan mili numunelerinin torsiyonel yorulma testleri 2 Hz tekrar frekansında kompozit kardan mili hasar görünceye kadar devam ettirilmiştir. Kompozit kardan milinin test cihazına bağlantı şekli Şekil 3.22'deki ile benzerdir.

Üç adet kompozit kardan mili numunesi kullanılarak gerçekleştirilen torsiyonel yorulma testlerine ait sonuçlar Tablo 3.10'da verilmiştir. Birinci test sonucunda kardan mili kayıcı kovan adı verilen parçası kırılmıştır. İkinci testi kompozit kardan mili hasarsız bir şekilde tamamlamıştır. Üçüncü testte ise sabit mafsallardaki yapıştırma bağlantısı hasar gördüğü için test tamamlanmıştır. Şekil 3.25'te torsiyonel yorulma testi sonrası kompozit kardan mili ve birim parçalarının durumu görülmektedir.

Tablo 3.12 Tam değişken torsiyonel yorulma testi sonuçları

	Burulma Yüğü	Frekansı	Çevrim Sayısı	Hasar Durumu
	± Nm	Hz	--	--
1. Test	1250	2	1.000.000	Hasarsız
2. Test	1250	2	634.440	Yapıştırma bağlantısı
3. Test	1250	2	1.036.515	Kayıc kovan

Torsiyonel yorulma testlerinin sonunda yapıştırma bağlantısına sahip karbon fiber takviyeli tüm kompozit kardan mili numunelerinin sürtünme kaynaklı kardan mili numunelerine göre çok daha yüksek çevrim sayılarında testleri tamamladığı görülmüştür. 1. test sürtünme kaynaklı kardan mili numunenin minimum çevrim

sayısının 4 katı daha yüksek çevrim sayısında yorulma testini hasarsız şekilde tamamlanmıştır. 3. test yine aynı oranda yüksek bir çevrim sayısında ancak farklı bir yapısal parçada ortaya çıkan bir hasar nedeni ile sonlanmıştır. Son olarak 2. test ise minimum çevrim sayısının yaklaşık iki buçuk katında yapıştırma bağlantısındaki hasar nedeni ile sonlanmıştır. Belirtilen çevrim sayısında hasarın arayüz ayrılması olarak ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

Torsiyonel Yorulma Testi Sonuçları			
	Sabit Mafsallı Yapıştırma Bağlantısı	Kayıcı Mafsallı Yapıştırma Bağlantısı	Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Boru
1. Test			
2. Test			
3. Test			

Şekil 3.27 Yorulma testi sonrası kardan mili birim parçalarının durumu

3.2.4 Deneysel Çalışmaların Sonuçları

Gerçekleştirilen deneysel çalışma karbon fiber takviyeli kompozit borulu ve yapıştırma bağlantılı kardan milinin burulma yükü altındaki davranışı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Kompozit borulu kardan milinin üretiminde kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit boru statik torsiyon ve torsiyonel yorulma testlerini hasar almadan tamamlamıştır. Nümerik analizler ile belirlenen boru boyutları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

- Kompozit borulu kardan milinin üretiminde metal parça ile kompozit boru arasında yapısal yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantıları statik torsiyon testlerini hasar almadan tamamlamıştır. Bu bağlamda nümerik analizler yardımı ile belirlenen yapıştırıcı kalınlığı (0,15 mm) ve bindirme boyu (70 mm) değerleri doğrulanmıştır.
- Kompozit borulu kardan millerinde tek taraflı bindirme formuna sahip yapıştırma bağlantıları güvenle kullanılabilir. Bu tip bir bağlantı kardan milinin servis ömrü ve fonksiyonellik üzerine negatif bir etkisi yoktur aksine yapıştırma bağlantısı kardan milinin torsiyonel yorulma ömrünü iyileştirmektedir.
- Statik torsiyon testleri sonrasında elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edildiğinde kompozit borulu kardan milinin %90 güvenilirlik aralığında 6764,10 Nm, %95 güvenilirlik aralığında ise 6716,50 Nm burulma momentine hasar görmeden dayanabildiği tespit edilmiştir.
- Torsiyonel yorulma testleri sonuçları incelendiğinde kompozit borulu ve yapıştırma bağlantılı kardan mili, 72 MPa kayma gerilmesine karşılık gelen ± 1250 Nm burulma yükünde, en kötü durumda, sürtünme kaynaklı kardan milinin aynı yükleme koşulundaki dayanabildiği maksimum çevrim sayısına göre %48 daha iyi yönde performans gösterdiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen diğer torsiyonel yorulma testlerinde karbon fiber takviyeli kompozit boru ve yapıştırma bağlantısı hasar almadan testi 1.000.000 çevrimde başarı ile tamamlamıştır.

BÖLÜM DÖRT

SONUÇ

Başta havacılık ve otomotiv sanayi olmak üzere denizcilik, uzay ve inşaat gibi birçok endüstriyel alanda metal yapıların yerini kompozit yapılar almaktadır. Kompozit malzemelerin sahip olduğu yüksek mukavemet-yoğunluk oranları, yüksek özgül katılık ve özgül dayanım özellikleri alışlagelmiş metal yapılar yerine kompozit yapıların kullanımını oldukça yaygın bir hale getirmiştir. İlaveten metal yapıların zorlu çalışma koşullarındaki korozyon ve aşınma gibi olumsuz etkilere daha yatkın olması bu geçişi hızlandırmış, kompozit malzemelerin kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Otomotiv endüstrisinde de ince cidarlı dairesel kesitli kompozit boruların kullanımı hem dayanıklılık açısından hem de hafiflik açısından büyük avantajları beraberinde getirmektedir. Günümüzde araçlarda aranan yüksek performans, yakıt verimliliği ve düşük karbon salınımı gibi çevreci özellikler, güç ve hareket aktarımı uygulamalarında alternatif düşük yoğunluğa karşı yüksek dayanım ve rijitlik sağlayan kompozit malzeme kullanımını da öne çıkarmaktadır.

Dairesel kesitli içi boş kompozit yapılar, enerji ve kimya sektörlerinde büyük miktarda basınç yüklerine maruz kalırken, havacılık ve otomotiv sanayinde birçok noktada balistik koruma, darbe emilimi, hareket ve güç aktarımı uygulamalarında kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisi özelinde ise binek, hafif ve ağır ticari araç uygulamalarında aktarma organlarının önemli bir elemanı olan kardan millerinde de geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Düşük yoğunluk, yüksek özgül katılık, düşük döngüsel atalet ve yüksek titreşim sönümleme kabiliyeti fiber takviyeli polimer matrisli kompozit boruların kullanımını daha da popüler bir hale getirmiştir.

Çalışmamız sonucunda yapıştırma bağlantıları kullanılarak birleştirilmiş karbon fiber takviyeli kompozit boruya sahip kardan millerinin binek otomobil, hafif ticari ve ağır ticari araç uygulamalarında yaygın olarak kullanılan geleneksel tip tümüyle çelik, kaynaklı bağlantılara sahip kardan millerine alternatif olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Çalışmamız kapsamında özellikle 3,5 ton ve üzeri yük taşıma kapasitesine sahip hafif ticari araç uygulamalarında kullanılan kardan millerine ve kardan millerinde kullanılan kaynaklı bağlantılar ile kompozit borulu uygulamalarda kullanılan yapıştırma bağlantılarına odaklanılmıştır. Her iki bağlantı tipi için de dikkate alınması gereken en temel ve önemli tasarım kriterlerinin başında burulma yükü taşıma kapasitesi ve tekrarlı burulma yüklerinin etkisi altındaki yorulma davranışdır. Bu bağlamda öncelikle Bölüm 2 kapsamında bir katı hal kaynak tekniği olan sürtünme kaynağı metodu kullanılarak oluşturulmuş kaynaklı bağlantının mekanik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı bağlantı bölgesinde tespit edilen en yüksek sertlik değeri, mikro alaşımlı malzemeden sıcak dövme tekniği kullanılarak üretilen tüp çatal tarafında, kaynak hattına 1 mm mesafede, 553 HV1 olarak tespit edilmiştir. Sertlik testini takiben gerçekleştirilen çekme testleri sonrasında kaynaklı bağlantının minimum çekme dayanımı ise 750,75 MPa olarak tespit edilmiştir. Diğer yandan çalışma kapsamında gerçekleştirilen statik torsiyon testleri ile kaynaklı bağlantının %95 güvenilirlik aralığında 4252,50 Nm, %90 güvenilirlik aralığında ise 4390,2 Nm burulma momentini hasar görmeden taşıyabildiği deneysel olarak ispat edilmiştir. Kaynaklı bağlantının tekrarlı burulma yükleri etkisi altındaki yorulma dayanımının tespit edilmesi için ise çoklu burulma yorulma testleri gerçekleştirilmiş ve kaynaklı bağlantının sonsuz ömre ulaşabileceği genlik değeri 50 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda kaynaklı bağlantının 892 Nm tekrarlı burulma yükü altında sonsuz ömre sahip olacağını işaret etmektedir.

Bölüm 3'te ise kaynaklı bağlantıya alternatif olarak sunulan kompozit boru-metal parça arasında gerçekleştirilen tek taraflı bindirme formuna sahip yapıştırma bağlantısının burulma momenti taşıma kapasitesi ve tekrarlı burulma yükler altındaki yorulma dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Öncelikli olarak karbon fiber takviyeli kompozit borunun ve yapıştırma bağlantısının burulma yükü taşıma kapasitesinin belirlenmesi için sonlu elemanlar ile analiz yazılımları kullanılarak nümerik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında kompozit borunun 16250 Nm burulma yükü altında burkulmaya uğradığı tespit edilirken yapıştırma bağlantısının ise 60 mm bindirme boyu ve 0,15 mm yapıştırıcı kalınlığının

ile yapısal bütünlüğünü koruyarak 24600 Nm burulma yükü taşıyabildiği görülmüştür. Bu sonuçlardan hareket ile Compotech Plus ve 3M firmalarından temin edilen karbon fiber takviyeli kompozit boru ve yapısal yapıştırıcılar kullanılarak 6 adet kardan mili prototipi üretilerek nümerik analiz çalışmaları ile elde edilen değerler deneysel çalışmalar ile doğrulanmaya çalışılmıştır.

Üretimi gerçekleştirilen 3 adet kompozit borulu kardan mili prototipi ile kardan mili kompleksinin burulma yükü taşıma kapasitesinin tespiti amacı ile statik torsiyon testi gerçekleştirilmiş ve %95 güvenilirlik aralığında 6716,50 Nm, %90 güvenilirlik aralığında ise 6764,10 Nm burulma momentini hasar görmeden taşıyabildiği deneysel olarak görülmüştür. Yapıştırma bağlantısının ve kompozit borunun tekrarlı burulma yükleri etkisi altındaki yorulma dayanımının tespit edilmesi için ise 3 adet burulma yorulma testi gerçekleştirilmiş ve ± 1250 Nm (72 MPa) burulma yükünde 2 adet yorulma testi hasar almadan bir milyon çevrimde tamamlamış, 1 adet testi ise yapıştırma bağlantısında meydana gelen arayüz ayrılma hasarı nedeni ile 634440 çevrimde tamamlamıştır.

Yukarıdaki sonuçlardan hareket ile kompozit borulu kardan mili, ince cidarlı çelik borulu kaynaklı bağlantıya sahip kardan miline kıyas ile %57 daha fazla burulma yükü taşıyabilmektedir. Diğer yandan ± 1250 Nm tekrarlı burulma yükünde gerçekleştirilen yorulma test sonuçları karşılaştırıldığında kompozit borulu yapıştırma bağlantısına sahip kardan milinin yorulma dayanımı, ince cidarlı çelik borulu kaynaklı bağlantıya sahip kardan milinin yorulma dayanımından %48 daha fazladır. Bu bağlamda kompozit borulu ve yapıştırma bağlantılı kardan milleri geleneksel tip ince cidarlı çelik borulu kardan millerinin yerine güven ile kullanılabileceği ispatlanmıştır.

Burulma yükü taşıma kapasitesinin ve tekrarlı burulma yükü etkisi altındaki yorulma dayanımının fonksiyonel performans üzerindeki pozitif etkilerinin yanı sıra sadece kompozit boru ve ince cidarlı çelik boru ağırlıkları karşılaştırıldığında kardan mili kompleksinin ağırlığını %50 oranında azalttığı açıktır. Ancak pratikte kompozit boru uygulamalarının maliyeti, ince cidarlı boru kullanımı maliyeti ile karşılaştırıldığında farkın 30 – 35 kat daha fazla olduğu bilinmektedir. İlavenen

yapıştırma, kürlenme, elleçleme vb. operasyonel zorlukların maliyet farkının daha da artmasına neden olacaktır. Bu baēlamda endüstriyel uygulamalar öncesinde teknik ve ekonomik uygulama fizibilitelerinin doēru ve etkin şekilde yapılması uygulama önündeki engelleri kaldıracak alternatif malzemelerin end stride kullanımının yaygınla masına yardımcı olacaktır.



KAYNAKLAR

- 3M Industrial Adhesives and Tapes Divison. (2020). *Introduction to modeling structural adhesives*. <https://multimedia.3m.com/mws/media/1909094O/introduction-to-modeling-structural-adhesives-white-paper.pdf>
- American National Standard Institute. (1989). *Recommended practices for friction welding* (ANSI/AWS C6.1-89).
- Ananthapadmanaban, D., Rao, V. S., Abraham, N., ve Rao, K. P. (2009). A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints. *Materials and Design*, 30, 2642-2646.
<https://doi:10.1016/j.matdes.2008.10.030>
- Asyraf, M. R. M., Ishak, M. R., Syamsir, A., ve Amir, A. L., Nurazzi, N. M., Norrrahim, M. N. F., Asrofi, M., Rafidah, M., Ilyas, R. A., Rashid, M. Z. A., ve Razman, M. R. (2021). Filament-wound glass-fibre reinforced polymer composites: Potential applications for cross arm structure in transmission towers. *Polymer Bulletin*, 80, 1059-1084.
<https://doi.org/10.1007/s00289-022-04114-4>
- Badie, M. A., Mahdi, E., ve Hamouda, A. M. S. (2011). An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft. *Materials and Design*, 32, 1485-1500.
<https://doi:10.1016/j.matdes.2010.08.042>
- Balya, B. (2004). *Design and analysis of filament wound tubes* [Yüksek Lisans Tezi]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Banea, M. D., Da Silva, L. F. M. (2008). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Journal of Material Design and Application*, 223, 1.
<https://doi:10.1243/14644207jmda219>

- Banerjee, A., Ntovas, M., Da Silva, L., Rahimi, S. (2021). Effect of rotational speed and inertia on the mechanical properties and microstructural evolution during inertia friction welding of 8630M steel. *Materials Letters*, 296, 129906.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129906>
- Bang, K. G., Lee, D. G. (2002). Design of carbon composite shafts for high speed air spindles. *Composite Structures*, 55, 247-259.
[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00146-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00146-5)
- Chander, G. S., Reddy, G. M., Rao, A. V. (2012). Influence of rotational speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar metal AISI 304-AISI 4140 continuous drive friction welds. *International Journal of Iron and Steel Research*, 19, 64-73.
[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60154-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60154-X)
- Chatha, J. S., Handa, A., Bedi, T. S. (2021). Strength analysis of rotary friction welded joints of dissimilar steel. *Materials Today: Proceedings*, 38, 242-247.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.090>
- Compo Tech PLUS, spol. s r.o., (2023). *Advanced winding brochure*.
<https://compotech.com/what-we-do/products/advanced-winding-technology/>
- Çelik, S., Ersözlü, İ. (2009). Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels. *Materials and Design*, 30, 970-976.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.070>
- Da Silva, L. F. M., Öchsner, A., ve Adams, R. D. (2011). *Handbook of Adhesion Technology* (1. Baskı). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-01169-6>

Derisi, B. (2008). *Development of thermoplastic composite tubes for large deformation* [Doktora Tezi]. Concordia University.

Deutsches Institut für Normung. (2016). *Steel tubes for precision applications - Technical delivery conditions - Part 2: Welded cold drawn tubes* (DIN Standard No. 10305-2:2016-08).

Djordjević, Z., Blagojević, M., Vulović, S., Nikolić, D., ve Jovanović, S. (2017). An Investigation Into Hybrid Aluminium/Composite Cardan Shaft. *Transactions of FAMENA*, 41(2), 45-54.
<https://doi.org/10.21278/TOF.41204>

Ersözlü, İ. (2011). *AISI 316 ve Ck45 çeliğinin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi, kaynak işleminin simülasyonu ve ısı analizi* [Doktora Tezi]. Balıkesir Üniversitesi.

Filho, P. S., Almeida Jr, J. H. S., ve Amico, S. C. (2017). Carbon/epoxy filament wound composite drive shafts under torsion and compression. *Journal of Composite Materials*, 0(0), 1-9.
<https://doi:10.1177/0021998317722043>

He, X. (2011). A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31, 248-264.
<https://doi:10.1016/j.ijadhadh.2011.01.006>

Hosseinzadeh, R., Taheri, F. (2009). Non-linear investigation of overlap length effect on torsional capacity of tubular adhesively bonded joints. *Composite Structures*, 91, 186-195.
<https://doi:10.1016/j.compstruct.2009.04.047>

Işık, E. (2009). *Topoloji optimizasyonu çatallı flanş uygulaması* [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.

Işık, E. (20.11.2015-21.11.2015). *Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ince cidarlı çelik yapıların statik ve değişken burulma yükleri altındaki davranışı* [Bildiri Özeti]. Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi, Ankara, Türkiye. <https://www.mmo.org.tr/etkinlik/kaynak-teknolojisi-ix-ulusal-kongre-ve-sergisi>

Işık, E., Öz, Ç. (2016). Determination of the mechanical properties of friction welded tube yoke and tube joint. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, Article ID 8918253, 8 sayfa. <https://doi.org/10.1155/2016/8918253>

International Organization for Standardization. (2016). *Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels — Part 1: Non-alloy steels for quenching and tempering* (ISO Standard No. 683-1:2016).

International Organization for Standardization. (2016). *Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method* (ISO Standard No. 6507-1:2018).

Kırık, İ. (2012). *Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 1040/AISI304L çelik çiftinin elektrokimyasal korozyon davranışının araştırılması* [Doktora Tezi]. Fırat Üniversitesi.

Kim, W. T., Lee, D. G. (1995). Torque transmission capabilities of adhesively bonded tubular lap joints for composite drive shafts. *Composite Structures*, 30, 229-240. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(95\)80017-4](https://doi.org/10.1016/0263-8223(95)80017-4)

Kim, K. S., Kim, W. T., Lee, D. G. (1992). Optimal tubular adhesive-bonded lap joint of the carbon fiber epoxy composite shaft. *Composite Structures*, 21, 163-176. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(92\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0263-8223(92)90016-6)

Kimura, M., Ichihara, A., Kusaka, M., Kaizu, K. (2012). Joint properties and their improvement of AISI 310S austenitic stainless thin walled circular pipe friction welded joints. *Materials and Design*, 38, 38-46.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.006>

Kumar, M. V., Balasubramanian, V. (2014). Microstructure and tensile properties of friction welded SUS 304HCu austenitic stainless steel tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 113, 25-31.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.11.005>

Kumar, A. S., Khadeer, S. A., Rajinikanth, V., Pahari, S., ve Kumar, B.R. (2021). Evalutaion of bond interface characteristics of rotary friction welded carbon steel to low alloy steel pipe joints. *Materials Science & Engineering A*, 824, 141844.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141844>

Leslie, J. C., Truong, L., Leslie II, J. C., Blank, B., ve Frick, G. (1996). Composite driveshafts: Technology and experience. *Society of American Engineers*, 962209.
<https://doi.org/10.4271/962209>

Mercan, S., Aydın, S., Özdemir, N. (2015). Effect of welding parameters on the fatigue properties of dissimilar AISI 2205-AISI 1020 joined by friction welding. *International Journal of Fatigue*, 81, 78-90.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.023>

Mitelea, I., Budau, V., Cracuiunescu, C. (2012). Dissimilar friction welding of induction surface hardened steels and thermochemically treated steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 1892-1899.
<https://doi.org/10.1016/j.matprotec.2012.04.010>

Ogawa, K. I., Nakayama, H., Ohue, Y., ve Hasui, A. (1988). Fatigue strength characteristics of S35C/S35C friction welded tubular butt joints. *Journal of the Society of Materials Science*, 37 (421), 1209-1215.

Oh, J. H. (2007). Strength prediction of tubular composite adhesive joints under torsion. *Composite Science and Technology*, 67, 1340-1347.

<https://doi:10.1016/j.compscitech.2006.09.021>

Oh, J. H. (2007). Nonlinear analysis of adhesively bonded tubular single-lap joints for composite in torsion. *Composite Science and Technology*, 67, 1320-1329.

<https://doi:10.1016/j.compscitech.2006.09.020>

Oh, J. H. (2008). Torque capacity of tubular adhesive joints with different composite adherends. *Materials Letters*, 62, 1234-1237.

<https://doi:10.1016/j.matlet.2007.08.018>

Özdemir, N. (2005). Investigation of mechanical properties of friction-welding joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. *Materials Letters*, 59, 2504-2509.

<https://doi:10.1016/j.jmatlet.2005.03.034>

Özbakış, M. (2023). *Ağır seri ticari araçlarda kullanılan kardan millerinin yorulma davranışlarının nümerik ve deneysel yöntemler ile belirlenerek yorulma dayanımlarını arttırmaya yönelik parametrelerin saptanması* [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.

Özbek, Ö., Kılınç, A., ve Bozkurt, Ö. Y. (2020). Development of filament winding machine for producing round shapes with different fiber reinforcements. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), 552-558.

<https://doi:10.17714/gumusfenbil.687600>

Paventhana, R., Lakshminarayanan, P. R., Balusubramanian, V. (2011). Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints. *Materials and Design*, 32, 1888-1894.

<https://doi:10.1016/j.matdes.2010.12.011>

- Quanjing, M., Rejab, M. R. M., Kaige, J., Idris, M.S. ve Harith, M.N. (2018). Filament winding technique, experiment and simulation analysis on tubular structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 342, 012029.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/342/1/012029>
- Rafi, H. K., Ram, G. D. J., Phanikumar, G., Rao K. P. (2010). Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075-T6. *Materials and Design*, 31, 2375-2380.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.065>
- Rao, B. J. P., Srikanth, D. V., Kumar, T. S., ve Rao, L. S. (2016). Design and analysis of automotive composite propeller shaft using FEA. *Materials Today: Proceedings*, 3, 3673-3679.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.11.012>
- Salahifar, R. (2010). Analysis of circular cylindrical shells under harmonic forces. *Thin – Walled Structures*, 48, 528-539.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.02.006>
- Sarsilmaz, F., Kırık, I., Batı., S. (2017). Microstructure and mechanical properties of armor 500/AISI2205 steel joint by friction welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 131-136.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.025>
- Sathiya, P., Aravindan, S., ve Haq, N., A. (2006). Optimization for friction welding parameters with multiple performance characteristics. *International journal of mechanics and materials in design*, 3, 309-318.
<https://doi.org/10.1007/s10999-007-9037-z>
- Sathiya, P., Aravindan, S., ve Haq, A. N. (2008). Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints. *Materials and Design*, 29, 1099-1109.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.06.006>

- Satyanarayana, V. V., Reedy, G. M., ve Mohandas, T. (2005). Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 160, 128-137.
<https://doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.05.017>
- Seherr-Thoss, H. C., Schmelz, F. ve Aucktor, E. (2005). *Universal Joints and Driveshafts. Analysis, Design, Applications*. Springer
- Selvamani, S. T., Palanikumar, K. (2014). Optimizing the friction welding parameters to attain maximum tensile strength in AISI 1035 grade carbon steel rods. *Measurement*, 53, 10-21.
<https://doi:10.1016/j.mesurement.2014.03.008>
- Selvamani, S. T., Vigneshwar, M., Nikhil, M., Hariharan, S. J., Palanikumar, K. (2019). Enhancing the fatigue properties of friction welded AISI 1020 grade steel joints using post weld heat treatment process in optimized condition. *Materials Today: Proceedings*, 16, 1251-1258.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.222>
- Shokrieh, M. M., Hasani, A., ve Lessard, L. (2004). Shear buckling of a composite drive shaft under torsion. *Composite Structures*, 64, 63-69.
[https://doi:10.1016/S0263-8223\(03\)00214-9](https://doi:10.1016/S0263-8223(03)00214-9)
- Shu-de, J., Jian-guang, L., Yu-mei, Y., Zan, L., Li, F. (2012). 3D numerical analysis of material flow behavior and flash formation of 45[#] steel in continuous drive friction welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22, 528-533.
[https://doi:10.1016/S1003-6326\(12\)61756-7](https://doi:10.1016/S1003-6326(12)61756-7)
- Stütz, M., Buzolin, R., Pixner, F., Poletti, C., Enzinger, N. (2019). Microstructure development of molybdenum during rotary friction welding. *Materials Characterization*, 151, 506-518.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.03.024>

Şahin, M., Akata, H. E. (2003). Joining with friction welding of plastically deformed steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 239-246.

[https://doi:10.1016/S0924-0136\(03\)00589-2](https://doi:10.1016/S0924-0136(03)00589-2)

Şahin, M. (2005). Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 202-210.

[https://doi:10.1016/S0924-0136\(03\)00589-2](https://doi:10.1016/S0924-0136(03)00589-2)

Şahin, M. (2007). Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding. *Materials and Design*, 28, 224-2250.

<https://doi:10.1016/j.matdes.2006.05.031>

Şahin, M., Akata, H. M., ve Gülmez, T. (2007). Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding. *Materials Characterization*, 58, 1033-1038.

<https://doi:10.1016/j.matchar.2006.09.008>

Taban, E., Gould, J. E., Lippold, J. C. (2010). Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization. *Materials and Design*, 31, 2305-2311.

<https://doi:10.1016/j.matdes.2009.12.010>

Xu, W., Li, G. (2010). Non-linear investigation of overlap length effect on torsional capacity of tubular adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30, 191-199.

<https://doi:10.1016/j.ijadhadh.2009.12.007>

Xu, X., Youa, G., Ding, Y., Tong, X., Zai, L. ve Liu, Q. (2020). Microstructure and mechanical properties of inertia friction welded joints between high-strength low-alloy steel and medium carbon steel. *Journal of Material Processing Technology*, 286, 116811.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116811>