

**T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BURULMAYA MARUZ YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ EĞRİSEL
VE DÜZ BİNDİRME BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Cüneyt YETKİN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADİYAMAN, 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BURULMAYA MARUZ YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ EĞRİSEL VE DÜZ BİNDİRME BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Cüneyt YETKİN

Adıyaman Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Şerif ÇİTİL
Yıl : 2021, Sayfa sayısı: 38
Jüri : Doç. Dr. İsmail Yasin SÜLÜ
Doç. Dr. Şerif ÇİTİL
Dr.Öğr.Üyesi Ali İhsan KAYA

Bu çalışmada akrilik yapısal yapıştırıcı ile birleştirilmiş çelik boru bağlantılarında, farklı bindirme uzunluklarına sahip düz, açılı (scarf) ve eğrisel boru bindirme bağlantılarının burulma altındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Bunun için $\text{ØD} = 21.3$ mm dış, $\text{Ød} = 15.9$ mm iç çaplı St-37 galvanizli çelik borular erkek ve dişi şeklinde 8, 10, 12 mm bindirme uzunluğunda düz, açılı (scarf) ve eğrisel modeller oluşturulmuş, eğrisel modeller için alın bölgelerine 30 mm, 40 mm ve 50 mm eğrisellik yarıçapları oluşturularak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Oluşturulan modellerin nümerik analizleri ANSYS Workbench programında gerçekleştirilmiş olup, nümerik analizlerinin doğrulanması için ise bindirme uzunluğu 10 mm olan, eğrilik yarıçapları 30, 40 ve 50 mm olan numuneler CNC (Computer Numerik Control) tezgâhında hazırlanmıştır. Hazırlanan erkek ve dişi numuneler, nemli ortamlara dayanıklı, oda sıcaklığında küreşebilen akrilik esaslı DP810 yapısal yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş ve doğrulama deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonrası elde edilen nümerik ve deneysel veriler göstermiştir ki, aynı bindirme uzunluğunda fakat farklı geometrilere sahip boru bindirme bağlantılarında burulma momentine maruz boru bindirme bağlantılarının taşıdığı yük miktarının önemli ölçüde değiştiği gözlenmiş ve eğrisel yarıçapı ve bindirme uzunluğu arttıkça taşıdığı yük miktarının arttığı görülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmanın bindirme uzunluğu ve eğrisellik yarıçaplarına bağlı olarak gerilme analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Boru; Burulma; Sonlu Elemanlar; Yapısal yapıştırıcı; ANSYS Workbench

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CURVE AND FLAT LAPPING CONNECTIONS FITTED WITH TORSIONARY ADHESIVE

Cüneyt YETKİN

Adiyaman University
Graduate Education Institute
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Şerif ÇİTİL
Year : 2021, Number of pages: 38

Jury : Assoc. Prof. İsmail Yasin SÜLÜ
Assoc. Prof. Şerif ÇİTİL
Asst. Prof. Ali İhsan KAYA

In this study, the mechanical properties of straight, angled (scarf) and curved pipe lap joints with different overlap lengths under torsion in steel pipe joints joined with acrylic structural adhesive were investigated. For this, straight, angled (scarf) and curvilinear models with $\text{ØD} = 21.3$ mm outer, $\text{Ød} = 15.9$ mm inner diameter St-37 galvanized steel pipes with 8, 10, 12 mm overlapping length in male and female form were created. For curvilinear models, radii of curvature of 30 mm, 40 mm and 50 mm were created on the forehead regions and modeled in three dimensions. Numerical analyzes of the created models were carried out in the ANSYS Workbench program, and samples with an overlap length of 10 mm and a radius of curvature of 30, 40 and 50 were prepared on the CNC (Computer Numeric Control) workbench to verify the numerical analysis. The prepared male and female specimens were joined using an acrylic-based DP810 structural adhesive resistant to humid environments, curable at room temperature, and validation experiments were carried out. The numerical and experimental data obtained after the study showed that the amount of load carried by the pipe overlap joints subjected to torsional moment in pipe overlap joints with the same overlap length but different geometries was observed to change significantly and it was observed that the amount of load they carried increased as the curvilinear radius and overlap length increased. In addition, stress analyzes were made depending on the overlap length and radii of curvature of the study and compared.

Keywords: Pipes; Torsion; Finite elements; Structural adhesives;
ANSYS Workbench

DESTEKLER

Bu tez çalışması Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından MÜYAB/2019-0009 numaralı proje ile desteklenmiştir.



BEYAN

“Burulmaya maruz alın eğrisel bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin incelenmesi” başlıklı tezimde çalışmaların tamamen akademik kurallara ve etik değerlere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

Cüneyt YETKİN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın gerçekleştirilmesinde bana her konuda yardımcı olan, önerileri ile beni yönlendiren, deneylerin yapılması ve sonuçların değerlendirilmesinde desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şerif ÇİTİL'e teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışması sırasında yanımda olan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KAYA'ya ve İş arkadaşım Dr. Zeynal Abidin OĞUZ'a teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
DESTEKLER	III
BEYAN	IV
TEŞEKKÜR	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
RESİMLER DİZİNİ	IX
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yapıştırıcılar	4
1.1.1. Yapıştırıcı Bağlantılarının Avantajları	4
1.1.2. Yapıştırıcı Bağlantılarının Dezavantajları	5
1.1.3. Yapıştırıcının Kullanım Alanları	6
1.1.4. Yapışma Kuvveti	6
1.1.5. Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilmeler	7
1.1.6. Islanabilirlik Testi.....	8
1.1.7. Yapıştırma Bağlantı Tipleri	10
1.2. Yapıştırılacak Yüzeyin Hazırlanması	11
1.3. Yüzey Hazırlama Metotları	12
1.4. Nümerik Analiz	13
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	14
3. MATERYAL ve YÖNTEM	18
3.1. Boru Numunelerinin Hazırlanması.....	18
3.2. Yüzey Hazırlama	21
3.3. Yapıştırma İşlemi ve Kürleşme	21
3.4. DeneySEL Yöntem	22
3.5. Nümerik Analiz	223
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	25
4.1. DeneySEL Sonuçlar	25
4.2. Nümerik Sonuçlar	27
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR.....	36
KİŞİSEL BİLGİLER	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Çelik (St37) ve Yapıştırıcı (DP810) fiziksel ve mekanik özellikleri.....	19
Çizelge 4.1 Deneysel ve Nümerik sonuçların karşılaştırılması	26
Çizelge 4.2 Maksimum burulma momenti değerleri.....	27
Çizelge 4.3 100 Nm burulma momenti nümerik çözüm sonuçları	33



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Birleştirme sonrası gerilme yığılmalarının karşılaştırılması (Kaynak, Perçin ve Yapıştırıcı).....	5
Şekil 1.2 Otomobilde yapıştırıcının kullanıldığı alanlar	5
Şekil 1.3. Uçaklarda yapıştırıcının kullanıldığı bölgeler	6
Şekil 1.4 Adhezyon ve Kohezyon Kuvvetleri.....	7
Şekil 1.5 Yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları.....	8
Şekil 1.6 Yüzey hazırlığı, “su kopma” testi veya belirli yüzey gerilim sınırları ile test edilebilir	9
Şekil 1.7 Viskozitenin yapışma kalitesine etkisi.....	9
Şekil 1.8 Yapışma kalitesi.....	9
Şekil 1.9. Bazı yaygın yapıştırma bağlantı tipleri	11
Şekil 1.10 Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu düşürmesi.....	12
Şekil 3.1 Boru (St37) ve Yapıştırıcının (DP810) Mekanik ve fiziksel özellikleri.....	19
Şekil 3.2 Burulmaya maruz eğrisel boru bindirme bağlantı kesiti.....	20
Şekil 3.3 Burulmaya maruz düz boru bindirme bağlantı kesiti.....	20
Şekil 3.4 Burulmaya maruz açılı (scarf) boru bindirme bağlantı kesiti	20
Şekil 3.5 Eğrisel yüzeyli boru bağlantısı katı modeli ve koordinat sistemi	23
Şekil 3.6 Eğrisel yüzeyli boru bağlantısı katı modeli ve sınır şartları	24
Şekil 3.7 Solid 186 Elemanı.....	24
Şekil 3.8 Numunelerin sonlu elemanlarla modellenmesi.....	24
Şekil 4.1 Bindirme uzunluğu 10 mm olan numunelerin deneysel sonuçları (a) Eğrilik yarıçapı 30 mm (b) Eğrilik yarıçapı 40 mm (c) Eğrilik yarıçapı 50 mm	26
Şekil 4.2 Eğrilik yarıçaplarına göre deneysel sonuçların karşılaştırılması	27
Şekil 4.3 Bindirme uzunluğuna (8, 10, 12 mm) göre burulma momentlerinin karşılaştırılması	28
Şekil 4.4 Bindirme uzunluğu 8 mm için Eşdeğer gerilmeler (σ_{eqv})	29
Şekil 4.5 Bindirme uzunluğu 10 mm için Eşdeğer gerilmeler (σ_{eqv})	29
Şekil 4.6 Bindirme uzunluğu 12 mm için Eşdeğer gerilmeler (σ_{eqv})	30
Şekil 4.7 Bindirme uzunluğuna göre gerilmeler (τ_{max})	31
Şekil 4.8 100 N.m. burulma yükü sonucu oluşan kayma gerilmeleri (a) τ_{xy} (b) τ_{xz} (c) τ_{yz}	31
Şekil 4.9 100 Nm burulma yük altında oluşan normal gerilmeler (a) σ_x (b) σ_y (c) σ_z	32
Şekil 4.10 Eğrilik yarıçapına göre yüzey alanları	34

RESİMLER DİZİNİ

Resim 3.1 Eğrisel yüzeyli boru bağlantı parçaları	18
Resim 3.2 DP810 Yapıştırıcı.....	18
Resim 3.3 Yapıştırıcı ile birleştirilen borular.....	22
Resim 3.4 Test düzeneği için hazırlanan numuneler	23
Resim 3.5 Shimadzu AG – X marka burulma cihazı	23
Resim 4.1 Yapıştırıcı hasar türleri ve deney sonrası yapıştırıcı hasar yüzeyleri	27



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

St37	: Amerika çelik standardı
DP810	: Akrilik yapısal yapıştırıcı
ØD	: Dış çap
Ød	: İç çap
L	: Bindirme uzunluğu
t ₁	: Yapıştırıcı kalınlığı
r	: Eğrilik yarıçapı
E	: Elastisite modülü
MPa	: Basınç
v	: Poisson oranı
N.m	: Newton metre
mm	: Milimetre
σ _{eqv}	: Eşdeğer gerilme
τ _{max}	: Maksimum kayma gerilmesi
τ _{xy}	: XY ekseninde kayma gerilmesi
τ _{xz}	: XZ ekseninde kayma gerilmesi
τ _{yz}	: YZ ekseninde kayma gerilmesi
σ _x	: X eksen normal gerilme
σ _y	: Y eksen normal gerilme
σ _z	: Z eksen normal gerilme

Kısaltmalar

ANSI	: American National Standards
Institute ASTM	: American Society for Testing and
Materials FBE	: Fen Bilimleri Enstitüsü

1. GİRİŞ

Malzemelerin birleştirme yöntemleri endüstride önemli bir yer tutmaktadır. Özellikleri aynı veya farklı türden malzemelerin birleştirilmesinde, yüksek mukavemet, hafiflik, zaman kaybı ve daha az maliyet önem arz etmekte olup birleştirme teknikleri her geçen gün önemi daha da artmaktadır. Geleneksel sökülebilir ve sökülemez birleştirme türleri olan kaynak, perçin, cıvata ve sıkı geçme gibi birleştirme yöntemleri geçmişten günümüze kullanılmaktadır. Kullanılan bu geleneksel birleştirme yöntemlerine ek olarak son yıllarda sanayide kullanım yaygınlığı artan yapıştırıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Yapıştırıcı teknolojisinin gelişmesi ile birlikte sanayi malzemelerinden özellikle metal ve kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yaygınlığı daha da artmıştır.

Yapıştırıcılar günümüzde otomotiv, uzay, havacılık, tıp, altyapı sistemi, elektronik, gemicilik, inşaat ve spor gibi birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. İnşaat, gemi, uçak ve makina mühendisliği gibi birçok alanda kullanımı, endüstrinin ilk yıllarına dayanır. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak ihtiyaç duyulan enerji artmıştır. Doğada nitelikli enerji türlerinin azalmasıyla birlikte, teknolojiye enerji kullanımının daha az olduğu seçimler giderek artmaktadır [1]. Küresel rekabet havacılık, uzay ve otomobil üreticilerini karbon emisyonunu azaltmaya yakıt ekonomisini iyileştirmeye ve daha az yakıt sarfiyatına zorlamaktadır. Bunun için havacılık, uzay ve otomobil üreticileri daha az yakıt sarfiyatı için aracın ağırlığını azaltacak araç tasarımına ve malzeme seçimine gitmektedirler. Araç ağırlığını azaltmak için daha düşük yoğunluklu yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımı ile ilgili çalışmalar artarken bu malzemelerin birleştirilmesi ile ilgilide çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüz endüstride zaman, malzeme, maliyet, iş kayıpları büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla zaman, malzeme, maliyet, iş kayıplarını azaltmak için birçok çalışmalar yapılmıştır [2]. Geleneksel birleştirme yöntemleri zaman, maliyet ve iş gücü gerektirmekte ve ciddi manada zaman ve maliyet kayıplarına sebep olmaktadır. Geleneksel birleştirme yöntemlerinin zaman, maliyet kayıplarının önüne geçilmesi için endüstrinin birçok alanında, kullanım kolaylığı, daha düşük maliyet, daha az işçilik gibi özelliklerinden dolayı yapıştırma bağlantıları daha sık

kullanılmaya başlanmıştır. Endüstride güç ve hareket aktarma elemanı olan miller (şaft), kaynak ya da flanş aracılığıyla birbirlerine bağlanmak suretiyle çalışmaktadırlar. Güç ve hareket aktaran miller özellikle çalışma esnasında burulma momentine maruz kalmaktadır. Kaynakla birleştirme işleminde kaynaklı parçaların ani soğuması, artık gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır [3]. Artık gerilmeler burulma momentinin etkisiyle beklenmeyen bir anda parçanın hasar görmesine sebep olmaktadır. Flanşla birleştirme işlemi ise ciddi manada işçilik ve zaman maliyeti gerektirmektedir. Bu iki durum istenmeyen durumdur. Burulma momentine maruz millerde bu istenmeyen durumlar için kaynak ve flanşla birleştirmeye alternatif olarak yapıştırma bağlantılarını araştırılması önem arz etmektedir.

Silindirik olarak hazırlanan yapıştırma bağlantılarında genellikle çekme yükü altındaki durumları araştırılmıştır [4]. Burulma momentine maruz millerle ilgili yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Konuyla ilgili olarak, Saraç [4] yapmış olduğu çalışmada yapıştırıcıyla birleştirilmiş mil-göbek bağlantı modeli tasarlamış ve bu yapıştırma bağlantısının göbek kenarlarında yapılan tasarım değişikliklerinin bağlantı performansına etkilerini, yapılan hasar ve gerilme analizleriyle araştırmıştır. Zou ve Taheri [5], burulma momentine maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş düz boru bindirme bağlantılarında, boru cidar kalınlığı, boru malzemesi ve yapıştırıcı tiplerinin etkilerini incelemiştir. Bunun için analitik bir model oluşturmuş ve oluşturulan modelde, yapıştırıcı tipine, bindirme uzunluğuna ve cidar kalınlığına bağlı olarak yapıştırıcı bölgesinde oluşan gerilme analizlerini yapmıştır. Taş [6] üç farklı yapıştırıcı kullanarak mil üzerinde konik geçme bağlantıları oluşturmuşlardır. Bu bağlantıları burulma momenti maruz bırakmış ve yapıştırıcı uygulanmış konik bağlantıları ile yapıştırıcı uygulanmamış konik geçme bağlantılarıyla karşılaştırmasını yaparak mukavemet üzerindeki etkilerini nümerik olarak incelemiştir. Yapmış olduğu inceleme sonucunda yapıştırıcı uygulanmış konik bindirme bağlantılarında gerilme değerlerinin daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Aimmanee ve Hongpimolmas [7], burulma momentine maruz boru bindirme bağlantıları için, farklı sertlikteki kompozit bağlantı elemanlarıyla boruları yapıştırıcı ile birleştirmişler ve matematiksel bir model formüle etmişlerdir. Yapmış oldukları matematiksel modelin ideal bağlantı şartları için kullanılabileceği ifade etmişlerdir.

Dünyada sıvı, gaz ve sıvı içinde konsantre katı maddelerin bir yerden başka bir yere taşınmasında boru hatlarıyla gerçekleştirilmektedir. Boru hatlarının sık kullanılması sebebi ekonomik olması ve uzak mesafelere taşıma yapılabilmesidir [8]. Boru hatlarının yapımı esnasında kullanılan birleştirme yöntemleri metal borular için genellikle üç şekilde gerçekleştirilmektedir. Vidalı sistem, kaynak teknolojisi veya birbirine sıkı geçmeli olarak montajlanmaktadır. Vidalı sistem işçilik, zaman ve maliyet gerektirmekte, kaynakla birleştirmede artık gerilmeler oluşmakta sıkı geçmede ise sıcaklık ve basınç değişimleri sonucunda birbirinden ayrılabilir. Ayrıca yapılan bu boru hatları genellikle toprak altında kalmaktadır. Toprak altında kalan borular üzerine yük binmesi durumunda çeşitli yüklere ve burulma momentine maruz kalabilmektedir. Bu istenmeyen durumlar için yapıştırıcı ile birleştirilmiş boru bindirme bağlantıları bir alternatif teşkil edecektir. Bunun için yapıştırıcıyla birleştirilmiş boru bindirme bağlantılarının araştırılması büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada akrilik yapıştırıcı (DP810) ile birleştirilmiş paslanmaz çelik boru bağlantısı için düz, açılı (scarf) ve eğrisel olmak üzere üç farklı model oluşturulmuş olup, eğrisel model kendi içerisinde farklı eğrilik yarı çaplarına göre modellenmiştir. Oluşturulan modeller farklı bindirme uzunluklarında ve farklı eğrisel yarıçaplarına bağlı olarak burulma momentine maruz bırakılarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada nümerik verilerin elde edilmesi için Ansys Workbench (2015) paket programı kullanılmıştır. Elde edilen nümerik verileri karşılaştırmak için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonrasında elde edilen veriler göstermiştir ki; Aynı ve farklı bindirme uzunlukları için düz, açılı ve eğrisel bindirme bağlantılarının taşıdığı hasar yüklerinin sırasıyla önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Eğrisel model kendi içerisinde ayrıca değerlendirilmiş olup eğrisellik yarı çapı arttıkça yapıştırıcının uygulandığı taşıdığı hasar yükünün arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca oluşturulan modellerde yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanlarının azaldığı fakat taşıdığı hasar yükünde artış olduğu gözlenmiştir.

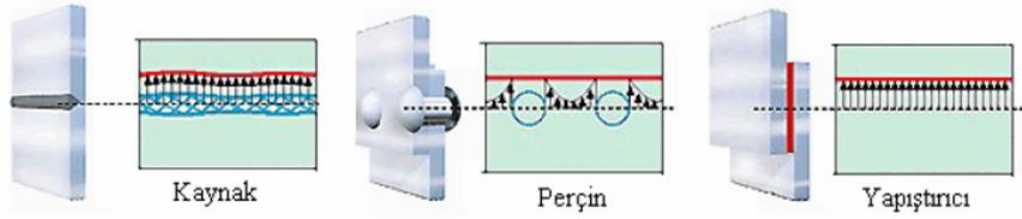
Bu çalışma ile sanayide klasik olarak yapılan birleştirme tekniklerine alternatif bir yöntem oluşturarak sanayi ve literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

1.1. Yapıştırıcılar

Malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmesinin, mekanik olarak yapılan bağlantılara kıyasla önemli avantajları vardır. Yapıştırıcı gerilimi ve yükü birleşim yüzeyinin tamamına yayarak dinamik ve statik yüklerin düzgün dağılmasını sağlar. Yapıştırıcılar oluşan gerilimin belli noktalarda yoğunlaşmasını engeller. Bundan dolayı yapıştırıcı ile yapılan bağlantılar, mekanik yöntemle yapılan bağlantılara göre bükülme ve titreşime, daha dayanıklıdır. Mekanik yöntemle birleştirilen parçalarda korozyon görülebilmektedir. Yapıştırıcı birleşim yerinin sızdırmazlığını sağladığı için korozyon oluşumunu engeller. Yapıştırıcı, yüzeyleri düzgün olmayan parçaların birleştirilmesini kolaylaştırır. Parça boyutlarında değişiklik yapmadan veya çok az değişiklikle daha hafif bağlantılar elde edilir.

1.1.1. Yapıştırıcı Bağlantılarının Avantajları

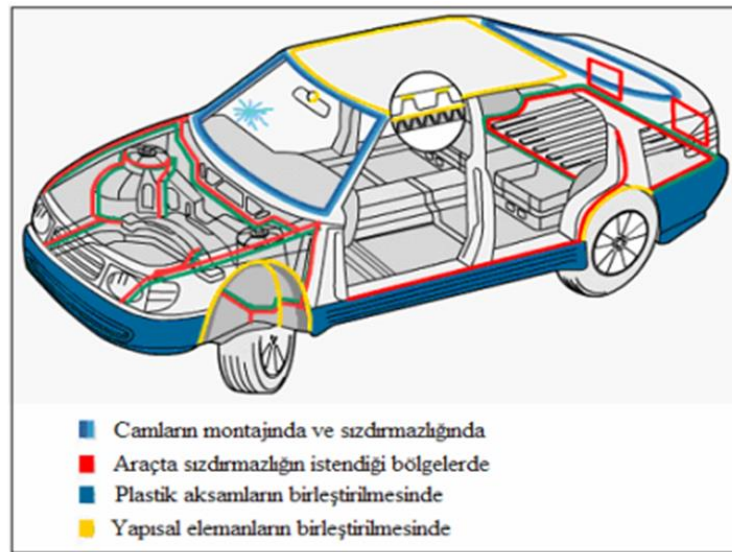
- Düzgün gerilim dağılımı: Gerilim açılan deliklerde olduğu gibi belli noktalarda yoğunlaşmaz, düzgün bir dağılım gösterir. (Şekil 1.1)
- Malzeme özelliğinde kaynak ile birleştirmede olduğu gibi yapısal değişim olmaz.
- Kaynak yönteminde parçalar ısıtıldığı için oluşan şekil bozukluğu olmaz. Ayrıca farklı ağırlık ve boyuttaki parçalar birleştirilebilir.
- Farklı malzemelerin birleştirilmesine imkân verir. Bu sebeple malzemelerin daha üstün olan özelliklerinden en iyi şekilde faydalanılır.
- Yapıştırıcılar yapısı gereği conta vazifesi gördüğünden sızdırmazlık sağlarlar. Cıvata ve perçinli ile yapılan bağlantılarda sızdırmazlık için ekstra maliyet ve işçilik gerektirir.
- Farklı kimyasal özellikteki metaller birleştirilebilir. Sürtünme ve korozyon sebebiyle oluşabilecek aşınmalar meydana gelmez.
- Perçin, cıvata, pim gibi birleştirme yöntemlerine kıyasla daha az malzeme ve parça gerektirir.
- Yapıştırılma ile yapılan bağlantılarda ürün görünümü daha düzgündür. Bu nedenle tasarımcılara ürünün görünümünü iyileştirebilmesi açısından avantaj sağlar.



Şekil 1.1 Birleştirme sonrası gerilme yığılmalarının karşılaştırılması (Kaynak, Perçin ve Yapıştırıcı) [9]

1.1.2. Yapıştırıcı Bağlantılarının Dezavantajları

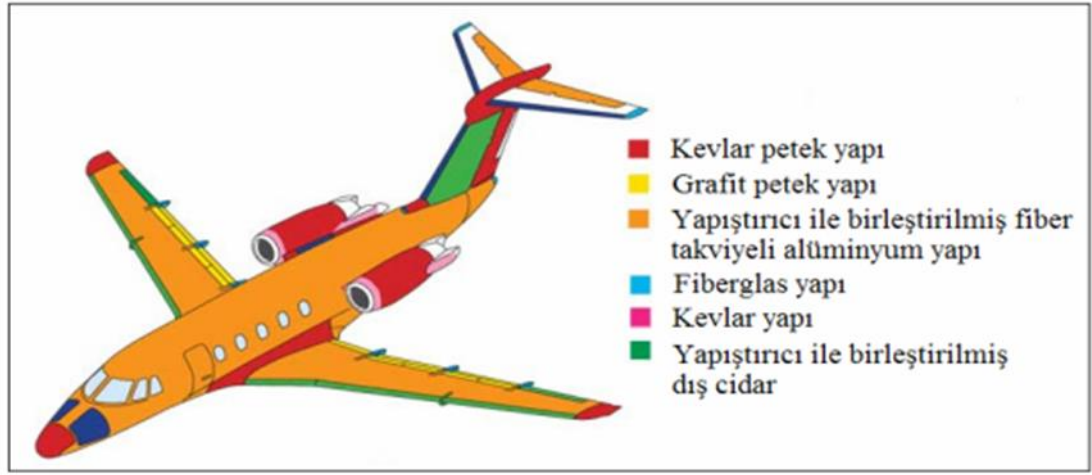
- Parçaların birleştirilmesi daha zordur. Yapıştırma işleminden önce özenli ve dikkatli yüzey temizliği gerektirir
- Yapıştırıcının mekanik özellikleri sıcaklık ve zamana göre değişebilir.
- Yapıştırıcıların darbe ve soyulma dayanımları düşüktür.
- Yapıştırma ile yapılan bağlantıların muayene ve kontrolü kolay değildir.
- Kırılma süresi uzun ve pratik olmayabilir.



Şekil 1.2 Otomobilde yapıştırıcının kullanıldığı alanlar [10]

1.1.3. Yapıştırıcının Kullanım Alanları

Yapıştırıcılar Plastik, metal, çelik, alüminyum, döküm, ahşap, beton, cam, seramik vb. birçok alanda birleştirme, tamir, yama gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Endüstride en yaygın kullanıldığı alanlara otomotiv (Şekil 1.2) ve havacılık (Şekil 1.3) örnek gösterilebilir.



Şekil 1.3 Uçaklarda yapıştırıcının kullanıldığı bölgeler [10]

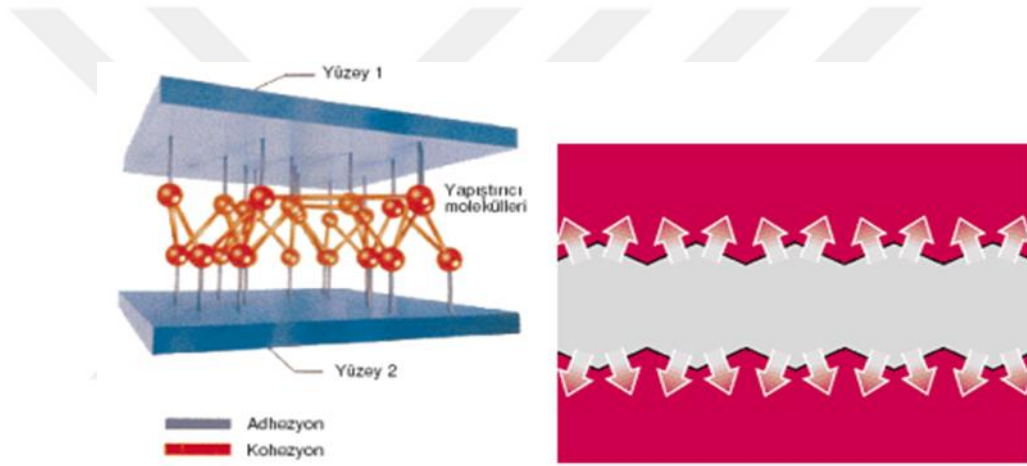
1.1.4. Yapışma Kuvveti

Yapıştırma bağlantılarının mukavemeti, adhezyon ve kohezyon kuvvetlerine bağlıdır. Adhezyon yapıştırıcının yüzeye yapışması, kohezyon ise yapıştırıcının iç kuvvetidir (Şekil 1.4).

Adhezyon, iki malzemenin temas yüzeyindeki yapışma kuvvetidir yani yüzey ile yapıştırıcı arasındaki tutunma da denilebilir. Van der Waals olarak adlandırılan, yüzeye tutunma ve çekim fiziksel kuvvetleri yapışmada önemli bir faktördür. Yapıştırıcı, işlenmiş olan yüzeylerdeki pürüzlülüklere tam olarak temas edemezse, moleküller arası kuvvetler zayıflar. Bu nedenle, yapıştırıcının bütün yüzeyi ıslatması ve yüzey pürüzlerine tam nüfuz etmesi gerekmektedir. Yapıştırmanın kuvveti hem

yüzeyin yapışma özelliğine hem de yüzeyin ıslatılmasına (moleküller arası temasın maksimum olması için), bağlıdır. Belirli bir yapıştırıcı yüzey gerilimi için ıslatma, yapıştırıcının viskozitesine ve yapıştırıcı sürülen yüzeyin yüzey gerilimine bağlıdır. Islatmayı olumsuz etkileyen faktörlerden biri de yüzeyde kirlerin bulunmasıdır. Yapıştırıcıyı bir arada tutan ve yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan kuvvet kohezyon kuvvetidir [9].

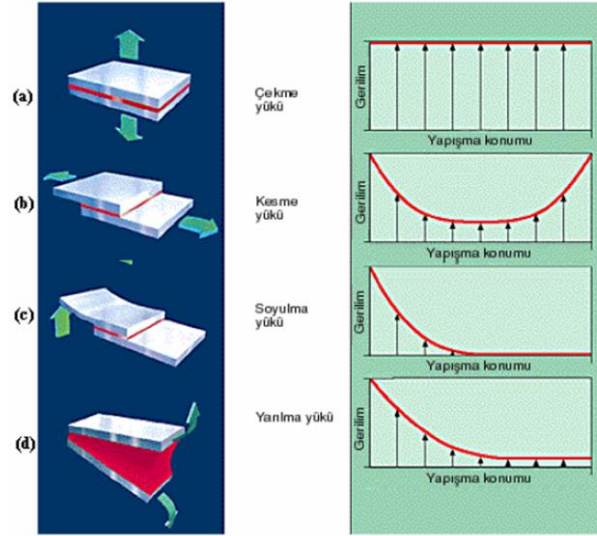
Kohezyon kuvvetleri arttıkça yapıştırıcının dayanımı da artar. Eğer yapılan bağlantılarda yapıştırıcı kalınlığı optimum olarak seçilirse, kohezyon kuvveti de optimum olarak elde edilecektir.



Şekil 1.4 Adhezyon ve Kohezyon Kuvvetleri [9]

1.1.5. Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilmeler

Bir yapıştırma bağlantısındaki gerilmeler, etki eden yüklere göre farklı şekilde ortaya çıkar. Bu gerilmeler: Kesme, Çekme, Yarıлма ve Soyulma şeklindedir. Sadece çekme yüklerinde, yapışma çizgisinde oluşan gerilme dağılımları daha düzgündür. Yapıştırma bağlantılarında meydana gelen temel gerilme çeşitleri ve dağılımları Şekil 1.5’de görülmektedir.



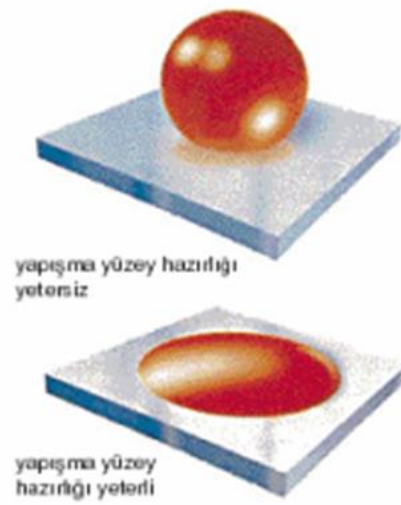
Şekil 1.5 Yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları [9]

1.1.6. Islanabilirlik Testi

Yüzey hazırlığının değerlendirilmesi “su kopma testi” ile yapılabilir (Şekil 1.6). Temizlenen yüzeylere saf su damlatılır. Yüzeyin temizliği yeterli değil ise saf su damlasının küresel şekli büyük ölçüde korunur. Damlatılan saf su yüzeyden akıyor ise yüzey temizliği yeterlidir. Bu yöntem magnezyum ve alüminyum üzerindeki anodik kaplamalar için uygun değildir. Bu testin avantajı, test için kullanılan suyun kolay bulunabilmesidir. Yüzey gerilimini etkileyen en önemli unsur kullanılacak olan suyun sertliğidir. Damıtılmış su bile bazen su kopma testinde güvenilir sonuç vermeyebilir. Bundan dolayı kritik uygulamalarda, yüzey gerilimleri belirli olan, yüzey gerilim sıvıları kullanılması daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Önemli olan nokta, bu testin sadece ıslatılabilirliği gösterdiği, yapıştırılma becerisini ölçmediğidir [9].

Yapıştırıcının parça yüzeyine yüksek temasında yapıştırıcı viskozitesinin de uygun olması gerekmektedir (Şekil 1.7).

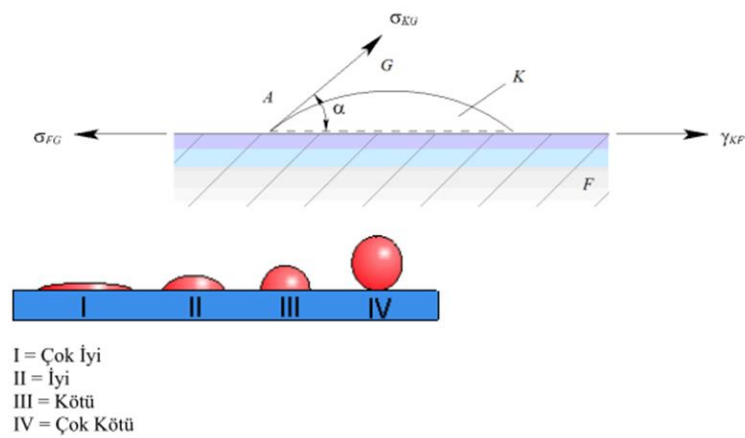
Yüzey üzerindeki damla, katı ve sıvı arasında temas açısı (α) yapar. $\alpha = 180$ için küresel damla yada ıslanma olmadığı anlamına gelir. Ters olarak $\alpha = 0$ için mükemmel ıslanma oluşur. $0 < \alpha < 180$ için ise kısmi ıslanma oluşur (Şekil 1.8).



Şekil 1.6 Yüzey hazırlığı, “su kopma” testi veya belirli yüzey gerilim sıvıları ile test edilebilir [9]



Şekil 1.7 Viskozitenin yapışma kalitesine etkisi [11]



Şekil 1.8 Yapışma kalitesi [11]

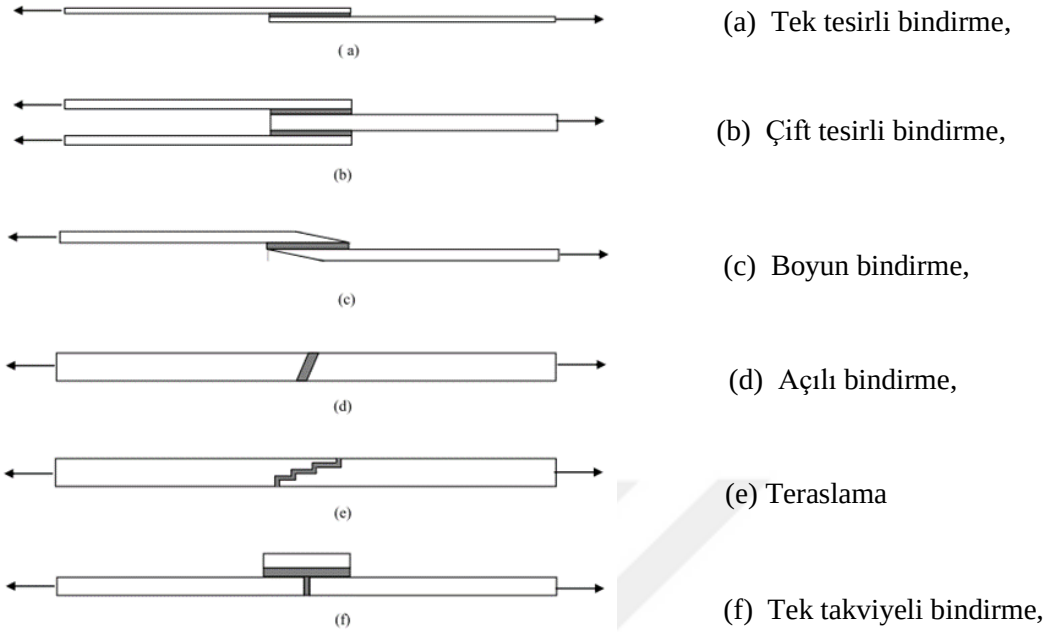
1.1.7. Yapıştırma Bağlantı Tipleri

Yapıştırma bağlantının mukavemeti aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Yapıştırılacak malzeme
- Ek yeri tasarımı
- Yük
- Çalışma ortamı

Yapıştırıcının kimyasal ve fiziksel özellikleri, adhezyon (yüzeylere tutunma) ve kohezyon (iç-yapışma) kuvvetini belirler. Yapıştırma bağlantısının dayanıklılığı kullanılan yapıştırıcının özelliklerine bağlıdır. Yapıştırıcı teknolojileri, yüzeye tutunma özellikleri, kuvvet ve elastikiyet (Young modülü) yönünden farklı alternatifler sağlar. Uygun yapıştırıcı seçimi ve ek yeri tasarımında ilk seçim kriteri yapıştırılacak olan malzemeler ve yüzey son kat işlemleridir. Malzemelerin mekanik özellikleri ve parçaların sertliği de uygun yapıştırıcının seçiminde önemli bir kriterdir. Yapıştırıcı seçimini bağlantının çalışma ortamı da (kimyasallar, sıcaklık, nem, vb.) doğrudan etkiler. Tatbik edilen kuvvetler ve çalışma ortamı, dayanıklılığı belirleyen önemli ara parametrelerdir. Seçilen yapıştırıcıdan yüksek verim almak için, ek yeri tasarımı da önemli bir parametredir.

Ek yeri tasarımı yapıştırıcının özelliklerine göre belirlenmeli (örneğin boşluk doldurma, hacimsel küreleşme, vs.), ve en zor yük şartlarının (yarılma, soyulma) oluşumunu önleyecek şekilde optimize edilmelidir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9 Bazı yaygın yapıştırma bağlantı tipleri [12]

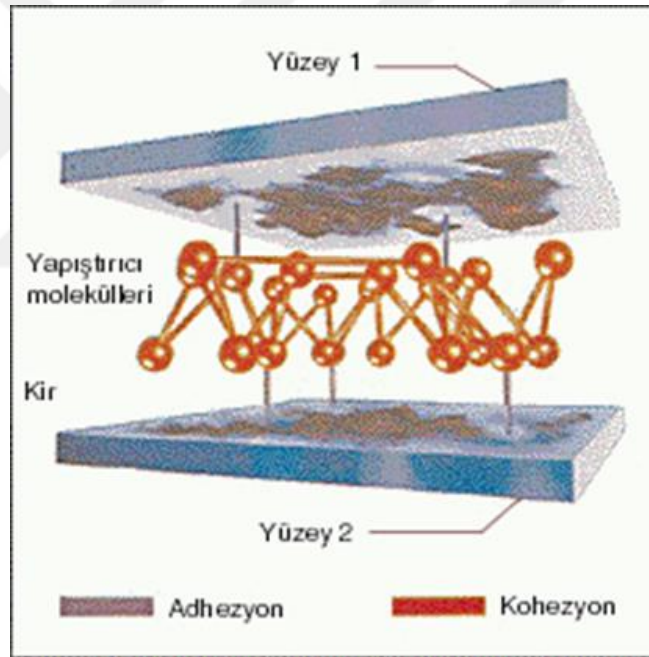
1.2. Yapıştırılacak Yüzeyin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantıları, yüzey ile yapıştırıcı arasındaki temasın tam olarak sağlanamamasından olumsuz etkilenirler. Yapıştırmanın başarılı olması için tasarımı, uygun yapıştırıcı ve bir yüzey hazırlama yöntemi belirlenmelidir.

Yapıştırıcı ile yapılan birleştirme yönteminin en kritik aşaması yüzey hazırlığıdır. Malzeme yüzeyinin hazırlanmasının amacı ise, yüksek dayanımlı ve sürekli bir yapıştırma bağlantısını sağlayacak bir malzeme yüzeyinin oluşturulabilmesidir. Yapıştırılacak malzemelerin, (boya, oksit, fosfor ve krom gibi tabakalar) yapıştırıcıyla direkt olarak temas etmesi istenir. Bu tabakalar “Zayıf Sınır Tabakalar” olarak adlandırılır. Bu tür tabakaları bulunduran malzemeleri yapıştırma işlemiyle bir araya getirmek, tozlu yüzeye, bant uygulanmasına benzer. Bu gibi durumlarda yapıştırıcı, yapıştırılacak olan malzeme yüzeyleri ile hiçbir şekilde temas etmeyecektir. Yüzey hazırlama yönteminin seçimi yapıştırma bağlantılarında sistemli bir yaklaşım gerektirir. Bu seçimi görünürde olan ya da olmayan birçok faktör etkiler. Görünürde olan faktörlere parça boyutu ve kullanılan ekipmanlar sayılabilir. Bağlantı dayanımının zayıflamasına sebep olabilecek, aktif kimyasalların çabuk tüketimi veya

yabancı malzemelerin toplanması, daha az görünürde olan faktörler olarak belirtilebilir.

Yüzey hazırlığı tatmin edici düzeyde yapılmadığı durumlarda, yapıştırıcı-yüzey arasındaki bağlantı temas bölgesinden kopacaktır. Yüzey hazırlama doğru yapıldığında, yapıştırıcıdan beklenen kuvvet elde edilebilecektir. Yapıştırma bağlantısındaki kopmalar kohezyon kuvvetinin aşılması ile yapıştırıcı tabakasının ikiye ayrılması şeklinde olacaktır. Bu yüzden yüzey hazırlama işlemi, yapıştırma bağlantısının başlangıçtaki mukavemeti için değil, uzun süreli mukavemeti için de önemlidir. Yapıştırma bağlantılarında yüzey temizliğinin iyi yapıldığı ve ön işlem yapıldığı durumlarda yapışma kuvvetinin artacağı da anlaşılmalıdır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu düşürmesi [9]

1.3. Yüzey Hazırlama Metotları

Yüzey hazırlama metotlarından en sık kullanılanları şunlardır:

- Aşındırma
- Buharla yağ giderme
- Çözücüyle silme

- Buharla honlama
- Ultrasonik temizleme
- Kimyasal çözelti ile temizleme

1.4. Nümerik Analiz

Nümerik analizler için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. ANSYS yazılımında sistem modelinin oluşturulması için sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), farklı mühendislik sorunlarına kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method) ilk olarak 1950’li yıllarda İnşaat Mühendisliği alanında kullanılmıştır. Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ile daha etkin kullanılmaya başlandı.

SEM karmaşık geometrisi olan şekillerin incelenmesine imkân sağlar. Çözüm yapılan bölge, alt bölgelere ayrılabilir ve farklı sonlu elemanlar kullanılabilir. Alt bölgelerde daha hassas hesaplamalar yapılabilir. SEM malzeme özellikleri değişik olan ve karmaşık sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir. Örnek olarak anizotropi, nonlineer, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi özellikler dikkate alınabilir. Sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra, sınır koşulları, basit sütun ve satır işlemleriyle denklem sistemine dahil edilebilir. SEM matematiksel olarak genelleştirilebilir ve aynı model çok sayıda problemi çözmek için kullanılabilir. Yöntemin hem matematiksel anlamı hem de fiziksel temeli mevcuttur [8].

Çelik gibi yapılar genellikle plastik şekil değişimi gösterir ve sonrasında hasara uğrarlar. Tasarımın emniyetli olması için yapıları her zaman elastik sınırın içinde tasarlamak gerekir. Genellikle deneyler basit yükleme koşulları (tek eksenli gerilme gibi) altında yapılmaktadır. Bu nedenle gerçekte oluşan genel yükleme koşullarıyla nasıl ilişkili olabileceği konusu çoğunlukla bir sorun oluşturur.

Yapının yükleme durumunda plastik şekil değişimine uğrayıp uğramadığını belirlemek için Von Mises gerilmesi hesaplanır. Deneysel olarak ölçülen akma noktası herhangi bir noktada hesaplanan gerilmeler ile karşılaştırılabilen, Von Mises gerilmesi olarak bilinen skaler bir değer olarak yazılabilir [13].

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yapıştırıcılar ile oluşturulan bağlantılar; işçiliğin ve maliyetin azaltılması, yorulma direnci, korozyon dayanımı, farklı malzemelerin birleştirebilmesi, sızdırmazlık, düzgün gerilme dayanımı, hafifliği ve uygulamasının kolay olması gibi özelliklerinden ötürü sanayide kullanımı yaygındır. Bu özelliklerinden dolayı literatürde yapıştırıcı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapıştırıcı uygulanan bölgenin geometrisi ve yapıştırma bağlantısı da yapıştırma bağlantılarında büyük öneme sahiptir. Volkersen [14] yapıştırıcı ile birleştirilmiş boru bağlantılarının ek yerlerinde burulma analizini ilk olarak araştırmıştır. Adams ve Peppiatt [15] yapışkan tabakanın kalınlığını dikkate alarak Volkersen'in analizini geliştirmişlerdir. Chen ve Cheng [16] tamamlayıcı enerji yönteminin değişken prensibine dayanarak, burulma altındaki yapışkanla bağlanmış boru şeklindeki bindirme bölgesi için bir gerilme dağılımı formülasyonu sunmuştur. Çitil ve ark. [17] eğrisel yüzeyli boru bağlantılarının mekanik özelliklerini araştırmıştır. Söz konusu çalışmada, çelik (St37) boruların eğrisel bindirme bağlantılarında eğrilik yarıçapı, bindirme uzunluğu ve boru cidar kalınlığı gibi parametreleri göz önünde bulundurarak iç basınca maruz bırakılan numunelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Eğrilik yarıçapının azalması ile boru bağlantılarının daha mukavim hale geldiği görülmüştür. Ayrıca, bindirme uzunluğunun artmasının eğrisel yüzeyli çelik boru bağlantılarının taşıdıkları basıncın önemli derecede artmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, boru cidar kalınlığının iç basınca etkisi incelendiğinde, eğrisel yüzeyli bağlantılarda cidar kalınlığının artmasının daha yüksek iç basınca çıkılmasına sebep olduğu da bildirilmiştir. Şahan [18] hasar gören galvanizli boruların epoksi esaslı yapıştırıcı ile tamiratında boru yama geometrisi ile boru patlama basıncı arasındaki ilişkiyi deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Hasarlı boruların tamiratında kullanmak için en uygun yama geometrisi, yama açısı ve bindirme uzunluğu gibi kriterler dikkate alınarak yapılan çalışmada numunelere iç basınç testi uygulamışlardır. Yama sarım açısı arttıkça yamalı boruların patlama mukavemetinde dikkate değer bir artış olduğunu bulunmuşlardır. Ayrıca, bindirme uzunluğunun artışına bağlı olarak patlama mukavemetinde önemli derecede artış gözlenmediğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, iç

basınç testine tabi tutulan hasarlı borularda radyal ve teğetsel deformasyonlar daha kritik olduğu için bindirme uzunluğundan ziyade sarım açısının daha önemli bir parametre olduğu rapor edilmiştir. Solmaz ve ark. [19] yapıştırıcı ile birleştirilen konik geçme bağlantıların burulma momenti altındaki davranışlarını incelemiştir. Farklı tepe açıları kullanılarak yapıştırıcı ile birleştirilmiş borular, yapıştırıcısız bağlantılar ile mukayese edilmiştir. Araştırmacılar, koni tepe açısının artmasıyla kesme gerilmesinin azaldığını bulmuştur. Ayrıca, yapıştırıcısız bağlantılarda oluşan kesme gerilmelerinin yapıştırıcılı bağlantılara kıyasla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Walame ve ark. [20] yapışma uzunluğu, yapışma açıklığı ve yapıştırıcıların burulma sertliğinin yapıştırıcıyla yapıştırılmış silindirik mafsallın tork iletimine etkisi araştırmıştır. Maksimum kesme gerilmesi, bağlantının uçlarında ve burulma sertliği daha yüksek olan şaftın ucunda meydana gelmiştir. Bindirme uzunluğu artması, yapışkan tabakada maksimum kesme gerilimi azalmasına ve tork iletim kapasitesinin artmasına neden olmuştur. Ayrıca, yapıştırma boşluğu artışı yapışkan tabakadaki maksimum kesme geriliminin azalmasına ve tork iletim kapasitesinin artmasına neden olduğu bildirilmiştir. Lavalette vd ark. [21] hibrit alüminyum-kompozit borularda bindirme uzunluğu, boru çapı, et kalınlığı, yapıştırıcı kalınlığı gibi parametrelerin boruların çekme dayanımına etkilerini teorik ve deneysel olarak araştırmıştır. Sonuçlar, bindirme uzunluğunun ve iç çap artışının, boruların çekme dayanımı üzerinde önemli derecede etkisi olduğunu göstermiştir. Fakat bindirme uzunluğunun daha fazla artışı yapıştırıcı bölgesindeki gerilmeyi etkilemediği fark edilmiştir. Liu ve ark. [22] yaptıkları çalışmada kaynakla yapılan çelik boru bağlantılarında artık gerilmelerin, iç ve dış yüzeylerde kaynak bölgesi ile kaynağa yakın bölgelerde oluştuğunu görmüşlerdir. Kaynakla yapılan birleştirmelerin meydana getirdiği bu olumsuzlukları gidermek için çelik borularda alternatif birleştirme teknikleri araştırılmaya başlanmıştır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların analizini ilk olarak Wooley ve Carver [23] yapmıştır. Murat Özgenç [24] yaptığı çalışmada tek taraflı bindirme bağlantılı malzemelerde (Astm D950–3 standardına göre imal edilmiş) yüzey pürüzlülüğünün, yapıştırma kalınlığının ve yapıştırılan malzemenin, darbe dayanımını nasıl etkilediğini deneysel olarak incelemiştir. Baran Erkek [25] hazırlamış

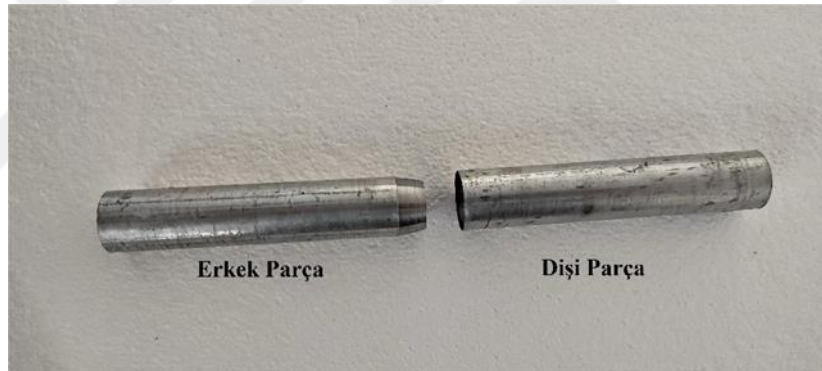
oldukları kompozit levhaları yama ve yapıştırıcı kullanılarak tamir etmiş ve burkulma davranışları üzerine termal yaşlanma etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Epoksi reçine matrisli cam elyaf takviyeli kompozit levhaların ortasına dairesel delik açılmış ve yine aynı levhalardan yapılan yamalar ile tamir edilmiştir. Yapıştırıcı olarak çift bileşenli yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapışkan kalınlığı ve sıcaklık değişimi parametrelerini değiştirerek, tek ve çift yüzünden yama ile yapıştırılan levhaların burkulma yükü altındaki etkilerini incelemiştir. Ayrıca farklı sıcaklık ve sürelerde termal yaşlanma etkilerini de incelemiştir. Yapıştırıcı kalınlığı olarak 0.2 mm, 0.4 mm ve 0.6 mm ve çift yüz 0.8 mm olacak şekilde tamir edilmiş numuneler kullanılmıştır. Sonuç olarak sıcaklık, zaman ve yapıştırıcı kalınlığının değişiminin kritik burkulma yüklerini değişen oranlarda etkilediğini belirlemiştir. Davies ve ark. [26] yapıştırıcı kalınlığının etkisini incelemiştir. Epoksi yapıştırıcı ile alüminyum parçaların bağlantılarının özelliklerini incelemiştir. Mekanik testler sonucunda, kopma mukavemetinin yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığının ideal olarak 0.8 mm veya daha az olması gerektiğini belirlemiştir. Choon T. Chon [27] yaptığı çalışmada kompozit borunun burulmaya maruz kalması ile boru ve yapıştırıcı bölgesindeki gerilmeleri St. Venant semi-inverse methodu ile nümerik olarak incelemiştir. Mazumdar ve Mallick [28] yaptığı çalışmada epoksi yapıştırıcı ile birleştirdiği iki kompozit plakanın, yorulma ve statik mukavemetini deneysel olarak araştırmıştır. Yaptığı deneyler sonucunda, statik kopma yükünün hem yapıştırıcı kalınlığı hemde bindirme uzunluğuna bağlı olduğunu belirlemiştir. 0,33 mm yapıştırıcı kalınlığında maksimum kesme kuvvetine ulaşıldığını bulmuştur. Ciba [29] çalışmasında kesme mukavemetinin yapıştırıcı kalınlığı arttıkça azaldığını belirlemiştir. Malzeme ile yapıştırıcı arasındaki bağ kuvvetinin (adhezyon), yapıştırıcının içerisindeki bağ kuvvetlerinden (kohezyon) daha fazladır. Sıcak yapıştırıcının kullanıldığı ve epoksi ile yapılan deneysel çalışmada yapıştırma boşluğu 0,1-0,5 mm aralığında kesme mukavemetinde azalma olduğu gözlenmiştir. Yapıştırma kalınlığının optimum 0,05-0,15 mm aralığı olarak bulunmuştur. Yapıştırma kalınlığının çok ince olduğu durumda, yapıştırıcı bütün yüzeylere temas etmeyebilmektedir. Dolayısıyla yapıştırma bağlantılarında yapıştırma alanının tümüyle kullanılıp kullanılmadığı kontrol edilmelidir. Matsui [30] yaptığı çalışmada

kayma gerilmesine maruz bırakılan dikdörtgen veya boru bindirme yapıştırıcı bağlantıların, mekanik özelliklerine etkisini ve yapıştırıcının geometrik boyutunun etkisini de incelemiştir. Ayrıca yapıştırıcı bağlantılarındaki hataların 4 şekilde gerçekleştiğini bunların da yapıştırılan parça ile yapıştırıcı arasındaki yapışma sorunu, yapıştırıcı bölgesinde sorun, yapıştırıcı katmanlarında meydana gelen yapışma sorunu, yapıştırılan parçanın ara yüzünde meydana gelen hata olarak belirtmiştir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM**3.1. Boru Numunelerinin Hazırlanması**

Bu çalışmada su tesisat malzemesi olarak sıklıkla kullanılan $\text{ØD} = 21.3$ mm dış, $\text{Ød} = 15.9$ mm iç çaplı St-37 galvanizli çelik borular kullanılmıştır. Çelik borular erkek ve dişi olarak (Resim 3.1) yapıştırıcı bölgesi 30 mm, 40 mm ve 50 mm eğrisel yarıçaplarında, düz ve açılı (scarf) toplam boyu 160 mm olacak şekilde üretilmiştir. Malzeme yapısı nemden olumsuz etkilenebilmektedir [31-32]. Yapıştırıcı olarak ise nemli ortamlara dayanıklı, oda sıcaklığında kürleşebilen 3M (Scotch-Weld) firmasının ürettiği akrilik esaslı DP810 (Resim 3.2) yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan boru ve yapıştırıcının mekanik özellikleri Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 Eğrisel yüzeyli boru bağlantı parçaları

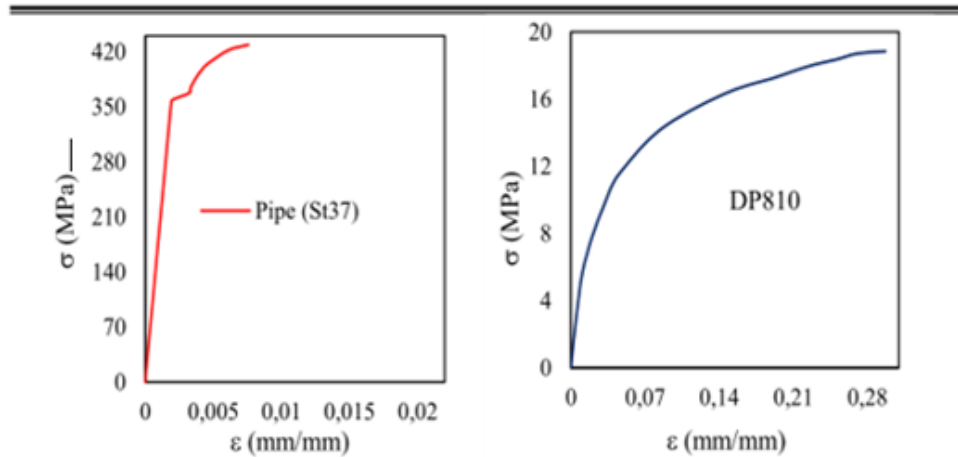


Resim 3.2 DP810 Yapıştırıcı

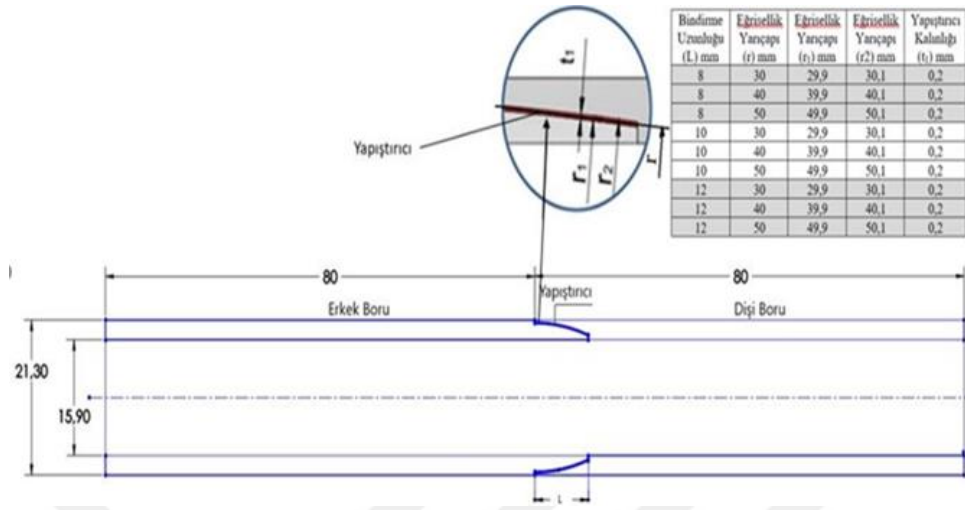
Çizelge 3.1 Çelik (St37) ve Yapıştırıcı (DP810) fiziksel ve mekanik özellikleri [8]

Malzeme Özellikleri	Malzeme	
	St37	DP810
E (Mpa)	186450	594.8
ν	0.29	0.35
σ_y (Mpa)	350	2.98
σ_t (Mpa)	428	24.24
ε_t (mm/mm)	0.0075	0.297

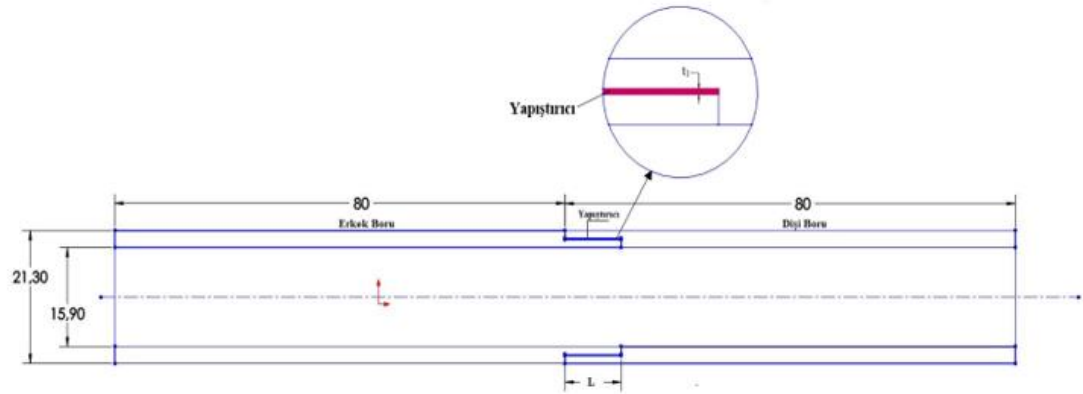
Şekil 3.1 Boru (St37) ve Yapıştırıcının (DP810) Mekanik ve fiziksel özellikleri [16]



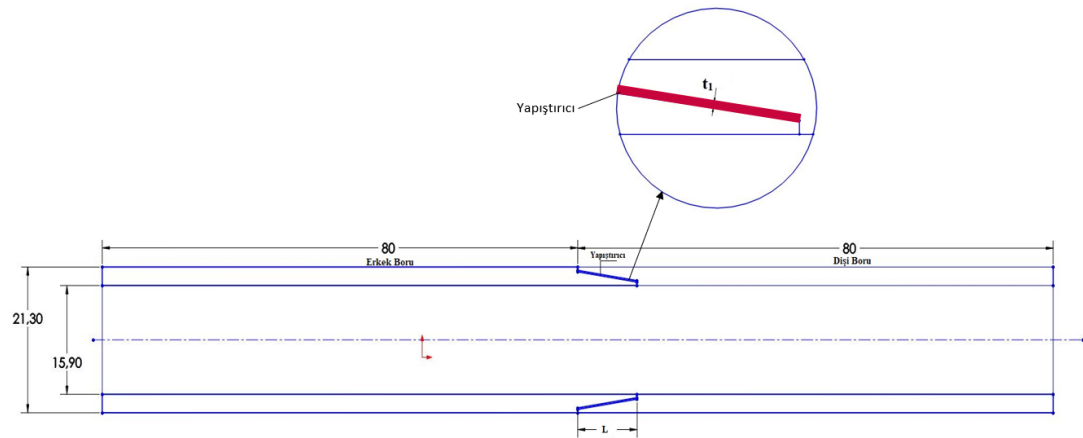
Boruların yapıştırıcı ile birleştirilen bölgeleri sırasıyla 30 mm, 40 mm, 50 mm yarı çaplarında eğrisel, düz ve açılı (scarf) olarak ve bindirme uzunlukları (L) 8,10,12 mm olacak şekilde modellenmiş ve yapıştırıcı kalınlığı t_1 0,2 mm olacak şekilde birleştirilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığını sağlamak için eğrisel modellerde erkek boru r_1 (29,9- 39,9- 49,9 mm) çapında dişi boru ise r_2 (30,1- 40,1- 50,1 mm) çapında modellenmiştir (Şekil 3.2). Düz ve açılı (scarf) modelleri ise Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te gösterildiği gibi modellenmiştir. Doğrulama deneylerinin yapılması için bindirme uzunluğu 10 mm, eğrilik yarı çapı sırasıyla 30 mm, 40 mm, ve 50 mm olacak şekilde her biri için üçer adet numune CNC (Computer Numerik Control) tezgâhında hazırlanmıştır.



Şekil 3.2 Burulmaya maruz eğrisel boru bindirme bağlantı kesiti



Şekil 3.3 Burulmaya maruz düz boru bindirme bağlantı kesiti



Şekil 3.4 Burulmaya maruz açılı (scarf) boru bindirme bağlantı kesiti

3.2. Yüzey Hazırlama

Yüzey hazırlığının temel amacı, bindirme bölgesindeki her türlü kirin (yağ, gres, toz ve diğer kalıntıların) yok edilmesi ve yapıştırma yüzey alanının tam olarak kullanılmasıdır. Yapıştırıcı ile birleştirmede yüzey hazırlama işlemi en kritik aşamadır. En iyi yapışmayı elde etmek için yapıştırılacak olan yüzeylerden gres, yağ toz ve diğer bütün kalıntıların temizlenmesi gerekmektedir.

Yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemi aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

1. Yapıştırılacak olan yüzeyler ince zımpara ile zımparalanmıştır.
2. Zımparalanan yüzeyler önce soğuk musluk suyu ve toz deterjan ($C_{12}H_{25}OSO_3Na$) kullanılarak temizleme işlemine tabi tutulmuştur daha sonra tekrar su ile yıkanmıştır.
3. Yapıştırılacak yüzeyler asetonlu bez ile temizlenerek yapıştırmaya hazır hale getirildi.

3.3. Yapıştırma İşlemi ve Kürleşme

Yüzeyi hazırlama işleminden sonra yapıştırmaya hazır hale gelen numuneler yapıştırıcı kalınlığı 0.2 mm olacak şekilde bir kat yapıştırıcıyla kaplanarak erkek ve dişi borular birleştirilmiştir (Resim 3.3). Yapıştırılan numuneler, kalıp içerisine konularak preste 12 MPa basınç altında tutulmuştur. Kullandığımız yapıştırıcı, DP810 katalog bilgilerine göre kürleşmesi sağlanmıştır. DP810 yapıştırıcının oda sıcaklığında 7-10 dakika kuruduğu ve 10-15 dakikada kürleştiği belirtilmiştir.



Resim 3.3 Yapıştırıcı ile birleştirilen borular

3.4. DeneySEL Yöntem

Hazırladığımız numunelerin her iki ucuna test cihazına bağlantı yapılabilmesi için altıgen çelik çubuklar monte edilmiş ve kaymasını engellemek için cıvata bağlantısı yapılmıştır. Doğrulama deneyleri için bindirme uzunluğu 10 mm olan numunelerden her bir eğrisel çap için üçer adet numune hazırlanmıştır (Resim 3.4). Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Laboratuvarında bulunan Shimadzu AG – X (Resim 3.5) marka ve model burulma test cihazı ile doğrulama deneyleri yapılmıştır.



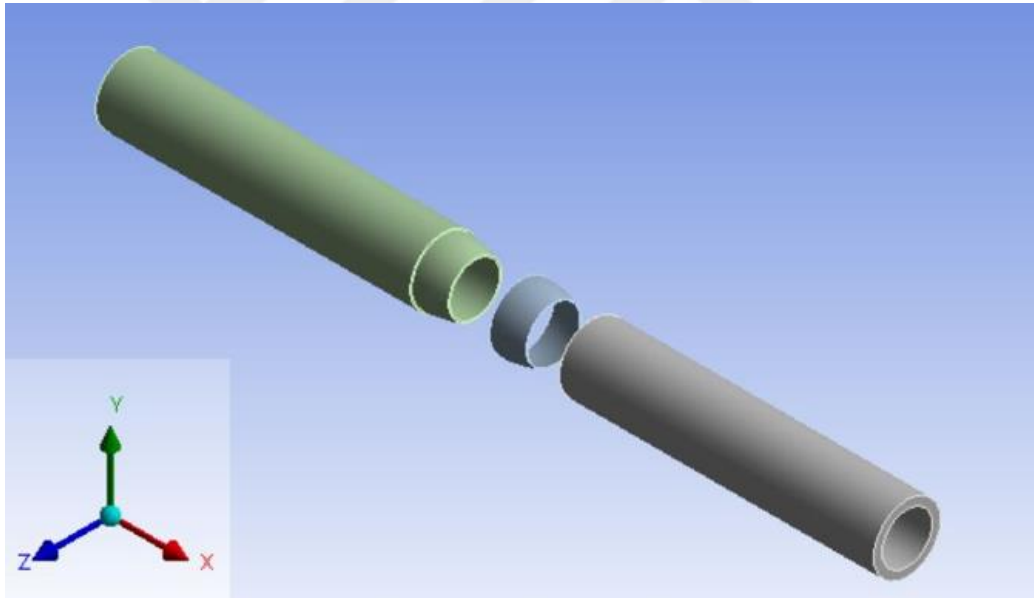
Resim 3.4 Test düzeneği için hazırlanan numuneler



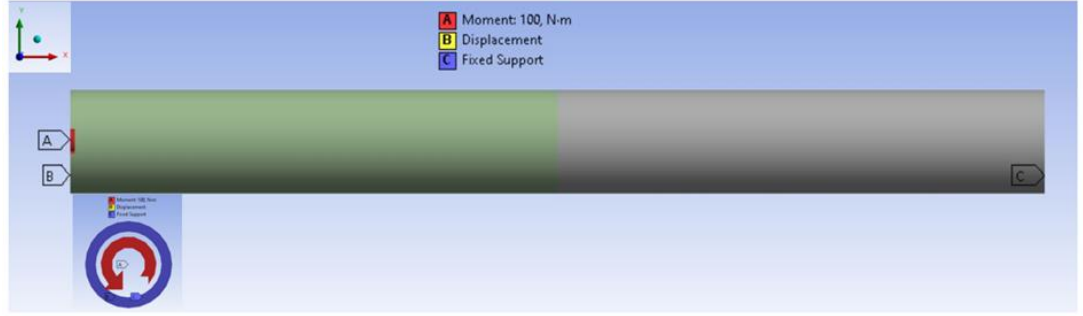
Resim 3.5 Shimadzu AG – X marka burulma cihazı

3.5. Nümerik Analiz

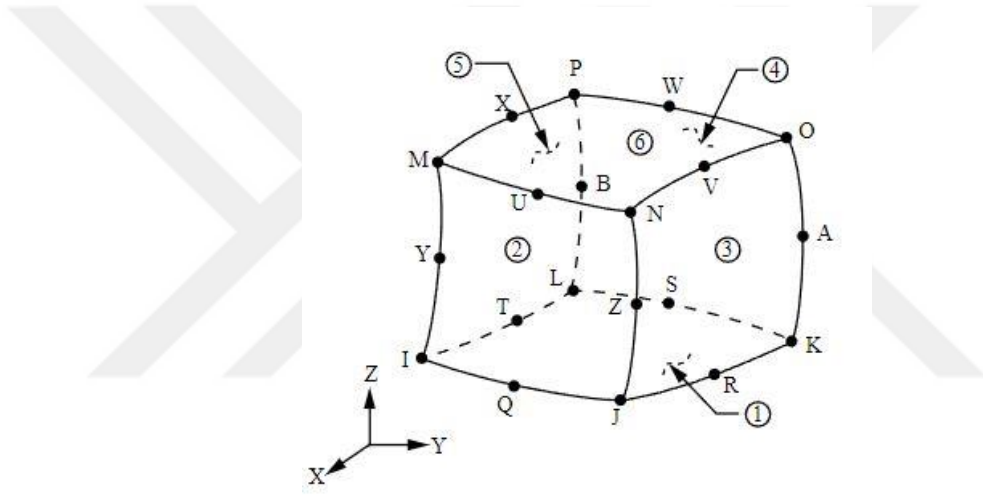
Nümerik analizler için Ansys Workbench 2015 paket programı kullanılmıştır [33]. Lineer olmayan sonlu eleman modeli için, Şekil 3.3’de belirtilen sınır şartları ve Çizelge 3.1’de mekanik özellikleri verilmiş olan galvanizli çelik boru (St37) ve yapıştırıcı (DP810) analizleri elasto-plastik olmak üzere üç boyutlu, 20 düğüm noktasına sahip, dikdörtgen prizmalı solid186 [34] (Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7) eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapıştırma işleminin olduğu bölge gerilme dağılımları açısından kritik olduğu için daha küçük elemanlara bölünmüştür (Şekil 3.8). Tasarımı gerçekleştirilen numuneler burulma yüküne maruz bırakılarak nümerik sonuçlar elde edilmiştir. Eşdeğer gerilmelerin sonuçları Von Mises akma kriterine göre hesaplanmıştır.



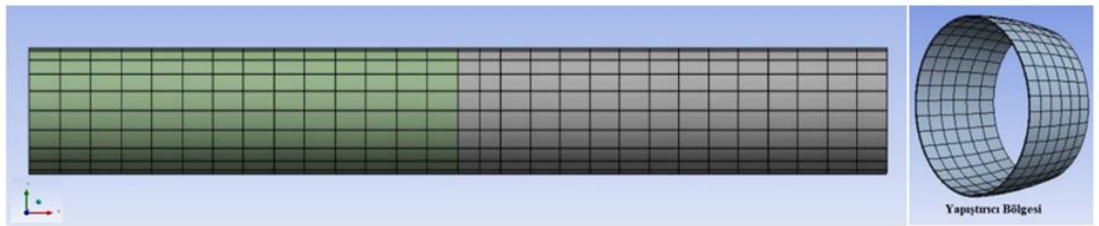
Şekil 3.5 Eğrisel yüzeyli boru bağlantısı katı modeli ve koordinat sistemi



Şekil 3.6 Eğrisel yüzeyli boru bağlantısı sınır şartları



Şekil 3.7 Solid 186 Elemanı [34]



Şekil 3.8 Numunelerin sonlu elemanlarla modellenmesi

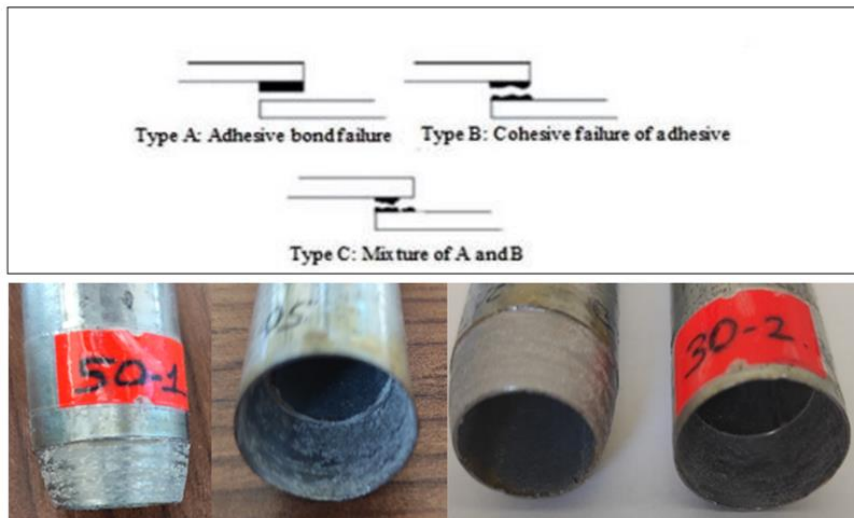
Elde edilen sonuçlara göre yapıştırıcı bölgesinde gerilmeleri karşılaştırmak için 100 Nm sabit yükte burulmaya maruz bırakılarak gerilme değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Deneysel Sonuçlar

Bindirme uzunluğu (L) 10 mm olan deney numuneleri 30 mm, 40 mm ve 50 mm eğrisel yarıçaplar için burulma testine tabi tutulmuştur. Burulma deneyinde sonuçlarında hasarın yapıştırıcı bölgesinde kohezif yapıştırıcı ara yüzeyinde hasara maruz kalarak koptuğu gözlenmiştir (Resim 4.1). Çelik boru yüzeyinde herhangi bir deformasyon gözlenmemiştir. Deneysel sonuçlar ile nümerik çözüm sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla ortalama olarak %84 uyumlu olduğu görülmüştür (Çizelge 4.1).

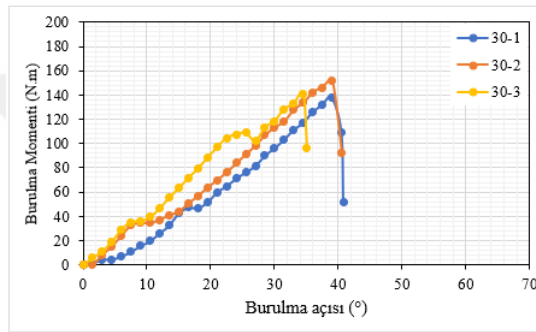
Deney sonucunda burulma açısına bağlı olarak maksimum burulma momenti değerleri elde edilmiş ve grafikler Şekil 4.1’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, eğrilik yarıçapı 30 mm olan numunede ortalama 142,3 N.m burulma momentine ve 37° burulma açısına, 40 mm olan numunede ortalama 164,6 N.m burulma momentine ve 44° burulma açısına ve 50 mm olan numunede ise ortalama ile 182,6 N.m burulma momentine ve 48° burulma açısına maruz kalarak hasara uğradığı gözlenmiştir (Şekil 4.1). Şekil 4.1 ve 4.2’den de görüleceği üzere aynı bindirme uzunluğunda fakat farklı eğrilik yarıçaplarına sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş boru bindirme bağlantılarında eğrilik yarı çapı arttıkça taşımış oldukları burulma momentinin arttığı gözlenmiştir.



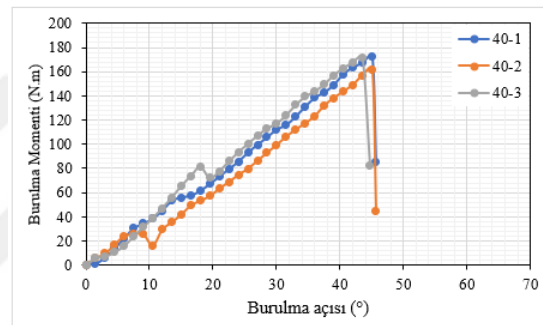
Resim 4.1 Yapıştırıcı hasar türleri ve deney sonrası yapıştırıcı hasar yüzeyleri

Çizelge 4.1 Deneysel ve Nümerik sonuçların karşılaştırılması

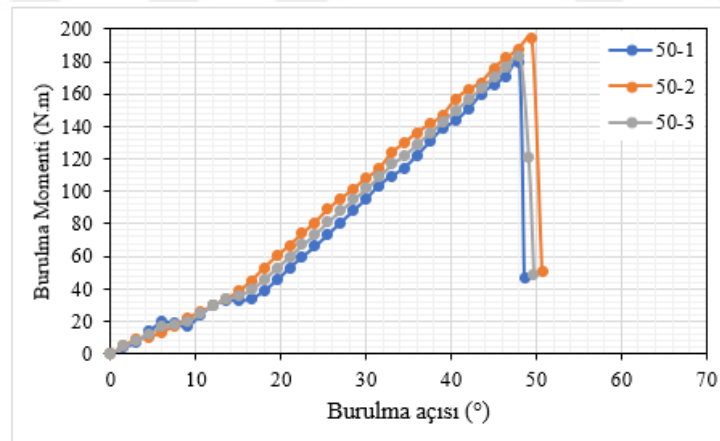
Eğrilik Yarıçapı (r) mm	Bindirme Uzunluğu (L) mm	Deneysel Ortalama (Nm)	Nümerik Çözüm (Nm)	(%) (Nüm/Den)
30	10	142,3	131,50	0,92
40	10	164,6	136,00	0,83
50	10	182,6	139,00	0,77
			Ort. (%)	0,84



(a)

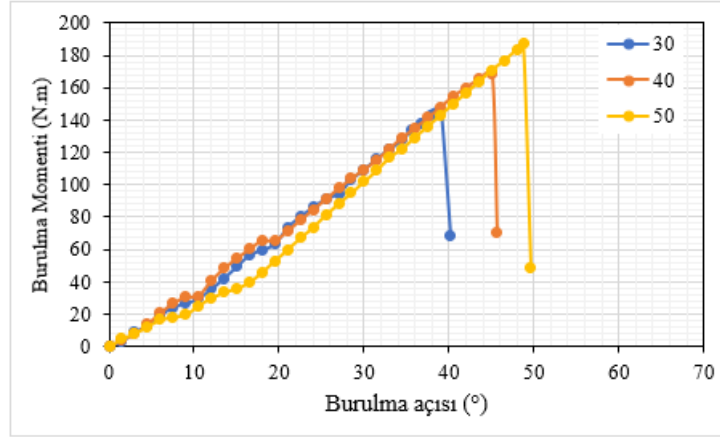


(b)



(c)

Şekil 4.1 Bindirme uzunluğu 10 mm olan numunelerin deneysel sonuçları (a) Eğrilik yarıçapı 30 mm (b) Eğrilik yarıçapı 40 mm (c) Eğrilik yarıçapı 50 mm



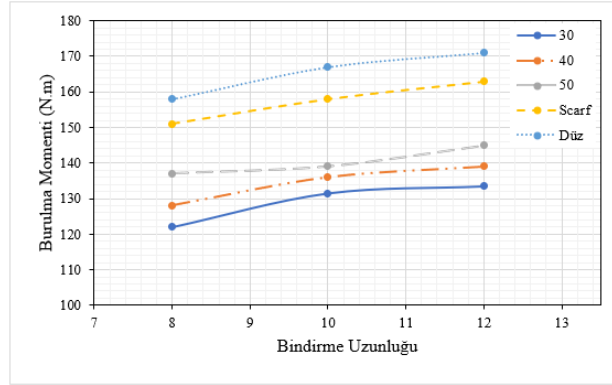
Şekil 4.2. Eğrilik yarıçaplarına göre deneysel sonuçların karşılaştırılması

4.2. Nümerik Sonuçlar

Bindirme uzunluğu 8 mm, 10 mm, 12 mm olan ve eğrilik yarıçapları 30 mm, 40 mm, 50 mm, açılı (scarf) ve düz olan numunelerin katı modelleri oluşturularak Ansys Workbench programında analizleri yapılmıştır. Tüm numunelerin maksimum burulma moment değerleri Çizelge 4.2’de verilmiş olup Şekil 4.3 de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.2 Maksimum burulma momenti değerleri

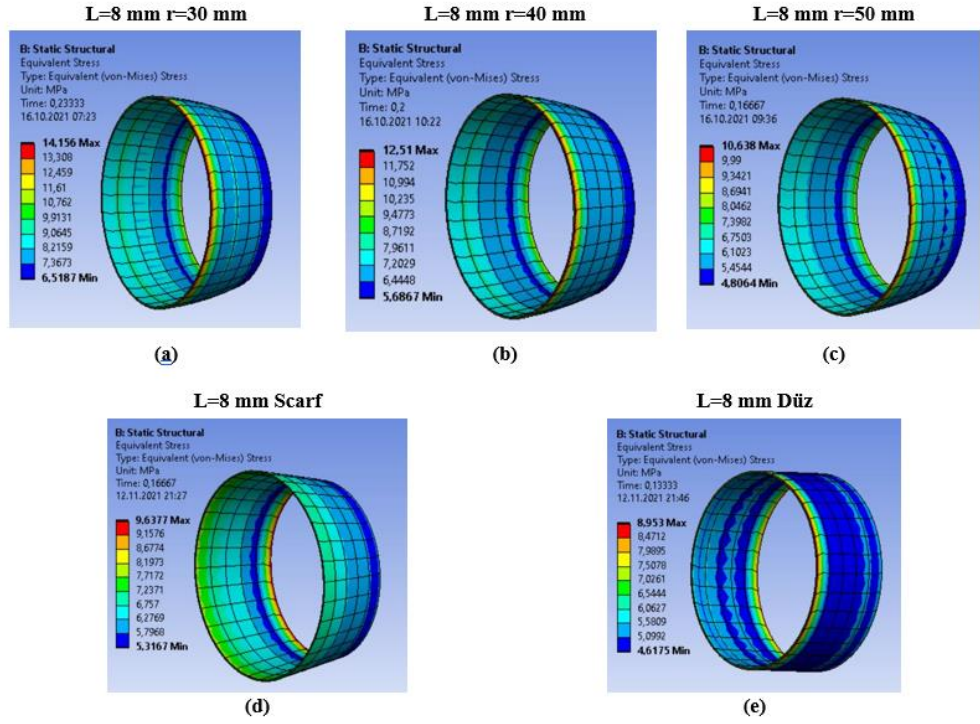
Eğrilik Yarıçapı (r) mm	Bindirme Uzunluğu (L) mm	Burulma Momenti (N.m)
30	8	122,00
40	8	128,00
50	8	137,00
Açılı (Scarf)	8	151,00
Düz	8	158,00
30	10	131,50
40	10	136,00
50	10	139,00
Açılı (Scarf)	10	158,00
Düz	10	167,00
30	12	133,50
40	12	139,00
50	12	145,00
Açılı (Scarf)	12	163,00
Düz	12	171,00



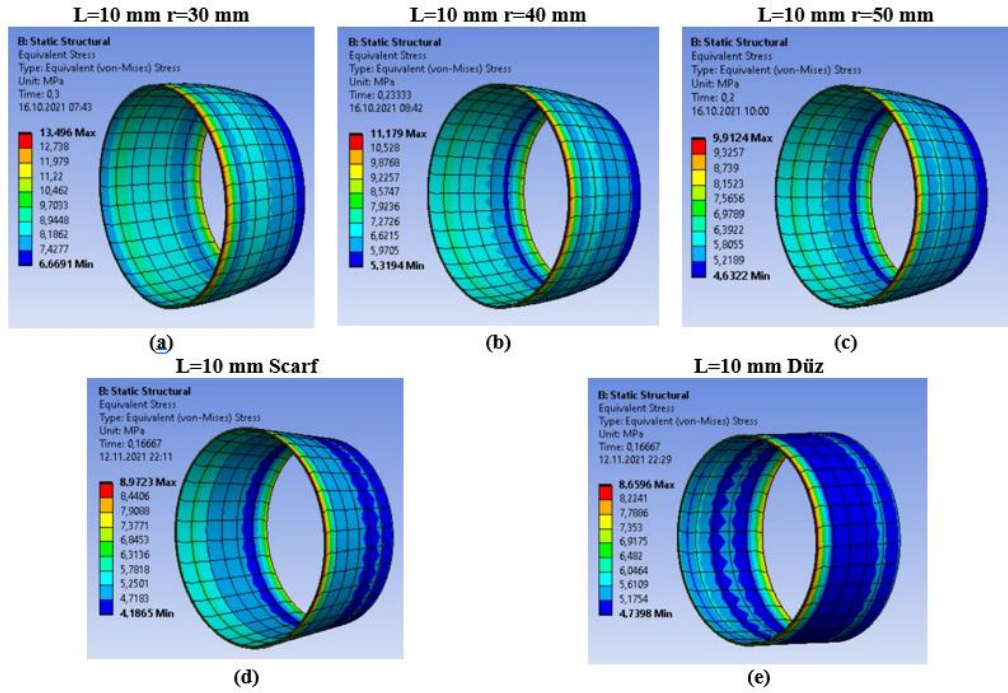
Şekil 4.3 Bindirme uzunluğuna (8 mm, 10 mm, 12 mm) göre burulma momentlerinin karşılaştırılması

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.3 incelendiği zaman en yüksek burulma hasar yükünü, 12 mm bindirme uzunluğuna sahip düz bindirme bağlantısının çektiği görülmektedir. Bağlantı geometrisi lineerlikten uzaklaştıkça ve bindirme uzunluğu azaldıkça taşınan burulma hasar yükünün azaldığı görülmektedir. Ayrıca eğrilik yarı çapı arttıkça geometri lineer bir hal almakta ve taşımış oldukları burulma moment değerlerinin arttığı görülmektedir. Üç boyutlu modeli oluşturulan numunelerin yapıştırıcı bölgesindeki gerilme analizi için tüm numunelere 100 Nm sabit bir burulma momenti uygulanarak eşdeğer gerilmeler (σ_{eqv}), maksimum kayma gerilmeleri (τ_{max}), kayma gerilmeleri (τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz}) ve normal gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z) elde edilerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir.

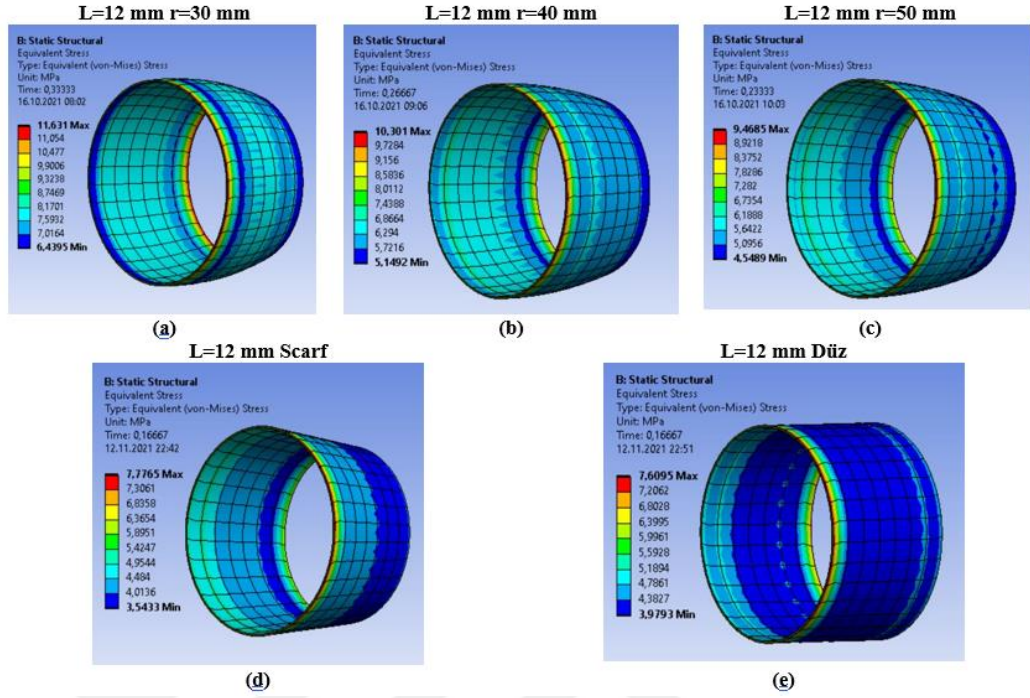
Düz, açılı (scarf) ve eğrisel bindirme bağlantılarının yapıştırıcı bölgesindeki eşdeğer gerilme sonuçları incelendiğinde, maksimum eşdeğer gerilme değerinin 30 mm eğrisellik yarı çapına sahip olan eğrisel bindirme bağlantısında meydana geldiği ve minimum eşdeğer gerilme değerinin düz bindirme bağlantısında olduğu görülmektedir. Bindirme bağlantısının geometrik şekli doğrusal bir hal aldıkça eşdeğer gerilme değerlerinin önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Tüm bağlantı tipleri eşdeğer gerilme dağılımı incelendiğinde maksimum gerilme değerlerinin bağlantının uç bölgelerinde meydana geldiği ve orta bölgelere doğru ilerledikçe eşdeğer gerilmelerin düştüğü görülmektedir. Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6’da anlaşılaacağı üzere hasarın uç bölgelerden başlayarak orta bölgeye doğru ilerlediği görülmektedir.



Şekil 4.4. Bindirme uzunluğu 8 mm için eşdeğer gerilmeler (σ_{eqv}) a) $r=30$ mm, b) $r=40$ mm c) $r=50$ mm d) Scarf e) Düz

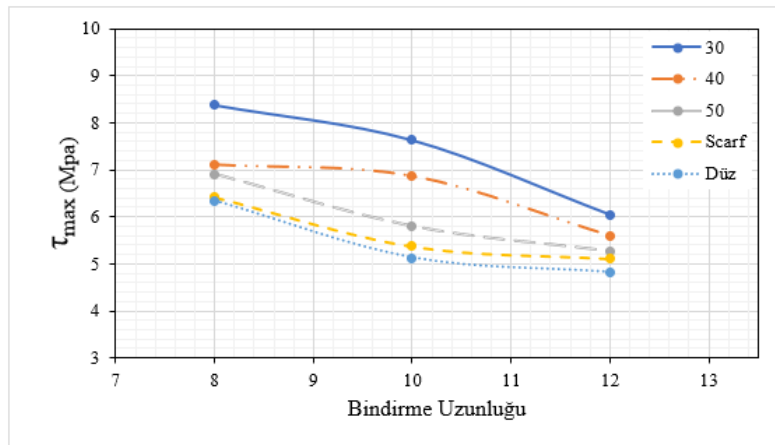


Şekil 4.5. Bindirme uzunluğu 10 mm için eşdeğer gerilmeler (σ_{eqv}) a) $r=30$ mm, b) $r=40$ mm c) $r=50$ mm d) Scarf e) Düz

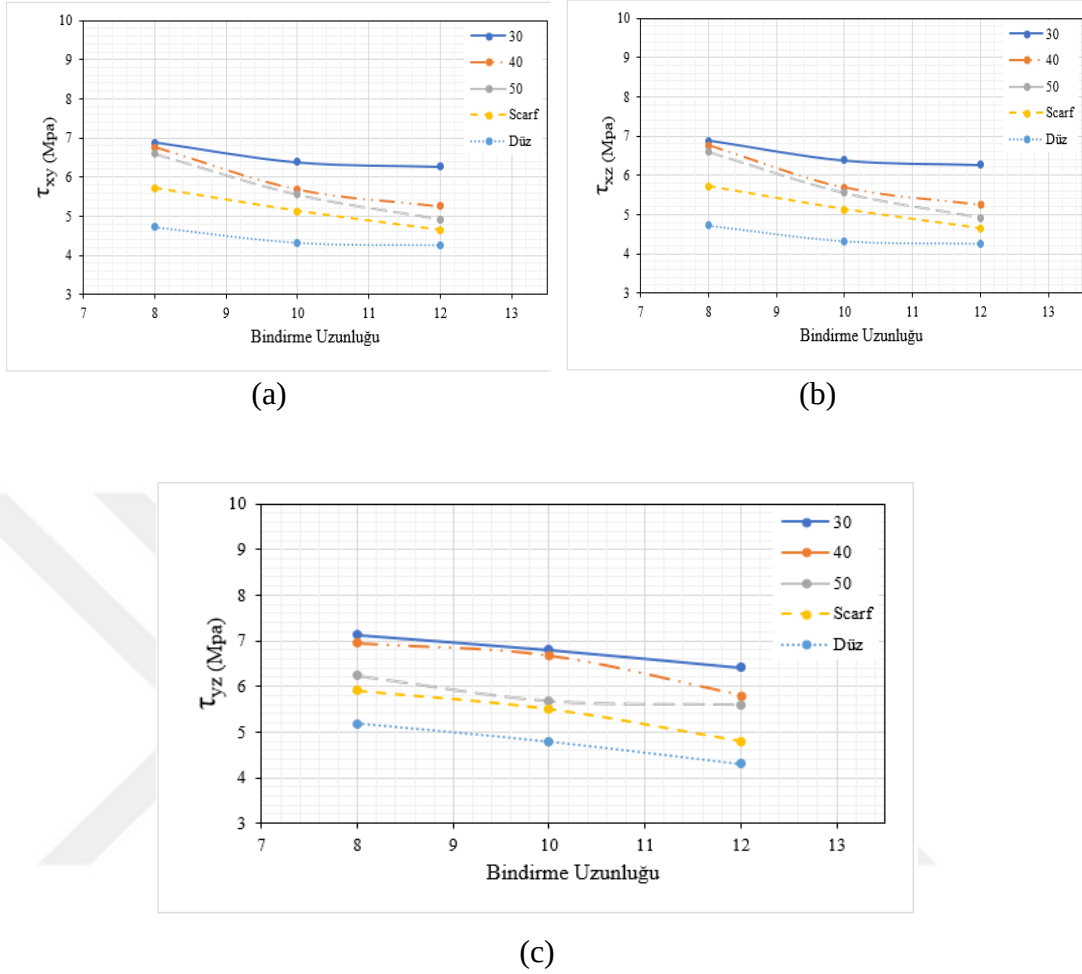


Şekil 4.6. Bindirme uzunluğu 12 mm için eşdeğer gerilmeler (σ_{eqv}) a) $r=30$ mm, b) $r=40$ mm c) $r=50$ mm d) Scarf e) Düz

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 de bağlantı tipine ve bindirme uzunluğuna bağlı olarak maksimum kayma gerilmeleri ile düzlemsel kayma gerilme değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

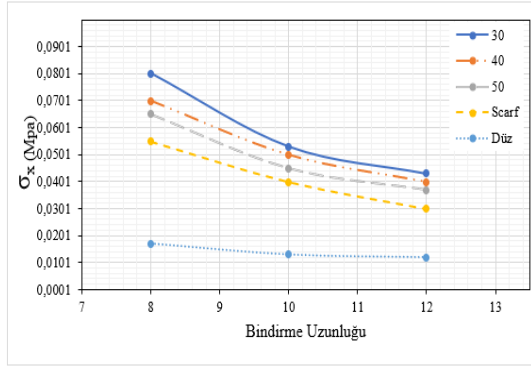


Şekil 4.7. Bindirme uzunluğuna göre gerilmeler (τ_{max})

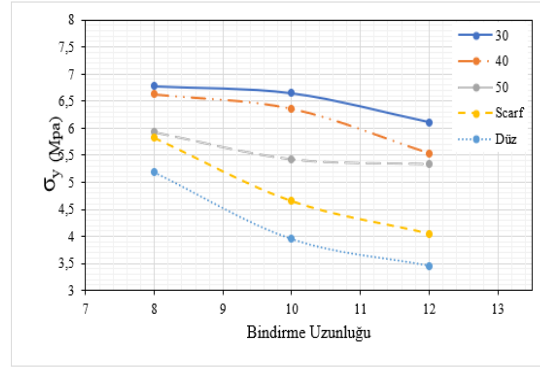


Şekil 4.8. 100 Nm burulma yükü sonucu oluşan kayma gerilmeleri (a) τ_{xy} (b) τ_{xz} (c) τ_{yz}

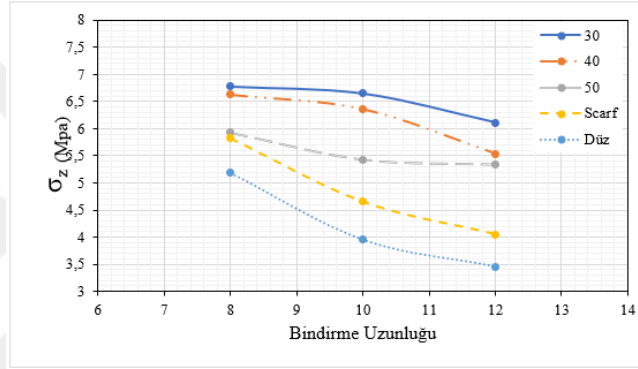
Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’den de anlaşılabacağı üzere geometri lineerleştikçe ve bindirme uzunluğu arttıkça daha düşük kayma gerilmelerine maruz kaldıkları görülmektedir. Boru bindirme bağlantılarında alından kesit bölgesi dikkate alındığında kesitin merkezinden dış çapa doğru gidildikçe maksimum kayma gerilmelerine maruz kalacaktır. Bağlantı tipleri incelendiği zaman düz olan bağlantı tipinin bindirme uzunluğu boyunca yarı çapın değişmeği görülmektedir. Diğer bağlantı tiplerinin ise bindirme uzunluğu boyunca ve sağa doğru gidildikçe yarıçapın düştüğü görülmektedir. Bu durumda özellikle açılı ve eğrisel bağlantı tiplerinde yapıştırıcının uygulandığı bindirme bölgesinde maksimum çapın olmuş olduğu bölgede maksimum kayma gerilmelerin oluşmasına sebep olmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9. 100 Nm burulma yük altında oluşan normal gerilmeler (a) σ_x (b) σ_y (c) σ_z

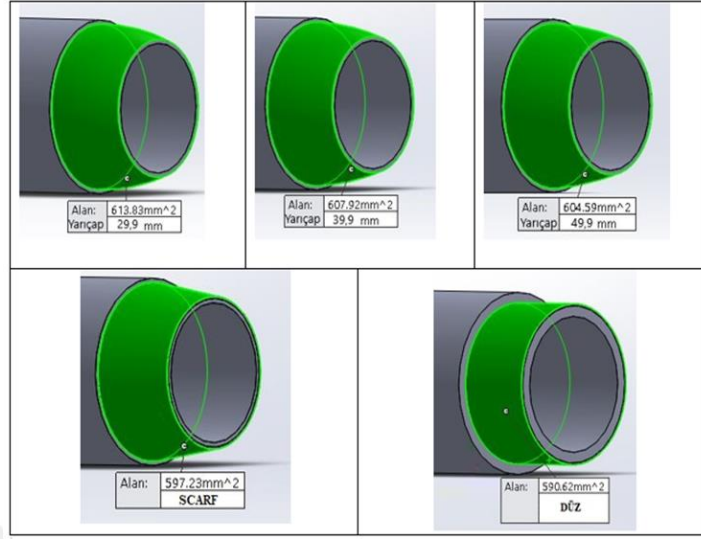
Şekil 4.9 da x, y ve z yönündeki normal gerilmelerin bağlantı tipine ve bindirme uzunluğuna bağlı olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Her üç yönde de geometri eğrisel bir hal aldıkça daha yüksek gerilmelere maruz kaldıkları, bindirme uzunluğu arttıkça da normal gerilmelerin önemli ölçüde düştüğü gözlenmektedir. Özellikle düz bindirme bağlantılarında normal gerilmelerin bariz bir şekilde daha düşük normal gerilmelere maruz kaldığı görülmektedir.

100 Nm sabit burulma momenti altında nümerik çözüm sonucu bulunan eşdeğer gerilme, kayma gerilmeleri ve normal gerilme değerleri çizelge 4.3’de verilmiştir. Eşdeğer gerilmeler, kayma gerilmeleri ve normal gerilmeler bir bütün halde incelendiği zaman; düz, açılı ve eğrisel bindirme bağlantıları arasında en düşük gerilmelerin düz bindirme bağlantılarında ortaya çıktığı ve geometri eğrisel bir hal aldıkça daha yüksek gerilmelere maruz kalarak daha düşük burulma yükü taşıdıkları

görülmektedir. Bindirme uzunluğu arttıkça gerilmelerin azaldığı taşınmış olduğu burulma yükünün arttığı görülmektedir. Bindirme uzunluğu arttıkça yapıştırıcının uygulanmış olduğu yüzey alanının artması ve dolayısıyla da taşınmış oldukları burulma hasar yükünün arttığı anlaşılmıştır. Şekil 4.10'da üç boyutlu modelin bindirme uzunluğu 10 mm için yapıştırıcı bölgesi yüzey yarıçapa göre yüzey alan değerleri verilmiştir. Modeller incelendiği zaman eğrilik yarı çapı azaldıkça ve lineer bir geometrik yapıdan uzaklaştıkça yapıştırıcının uygulanmış olduğu yüzey alanın arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.3 100 Nm burulma momenti nümerik çözüm sonuçları

Eğrilik Yarıçapı (r) mm	Bindirme Uzunluğu (L) mm	σ_{eqv}	τ_{max}	τ_{xy}	τ_{xz}	τ_{yz}	σ_x	σ_y	σ_z
30	8	14,16	8,38	6,88	6,88	7,13	0,08	6,78	6,78
40	8	12,51	7,1	6,76	6,76	6,95	0,07	6,63	6,63
50	8	10,64	6,91	6,6	6,6	6,24	0,065	5,93	5,93
Açılı (Scarf)	8	9,64	6,41	5,72	5,72	5,91	0,06	5,82	5,82
Düz	8	8,95	6,34	4,72	4,72	5,18	0,017	5,18	5,18
30	10	13,50	7,63	6,38	6,38	6,8	0,053	6,65	6,65
40	10	11,18	6,86	5,68	5,68	6,69	0,05	6,36	6,36
50	10	9,91	5,8	5,55	5,55	5,68	0,045	5,42	5,42
Açılı (Scarf)	10	8,97	5,37	5,13	5,13	5,51	0,04	4,65	4,65
Düz	10	8,66	5,13	4,32	4,32	4,79	0,013	3,95	3,95
30	12	11,63	6,04	6,27	6,27	6,41	0,043	6,11	6,11
40	12	10,30	5,6	5,25	5,25	5,81	0,04	5,53	5,53
50	12	9,47	5,27	4,92	4,92	5,6	0,037	5,33	5,33
Açılı (Scarf)	12	7,78	5,11	4,64	4,64	4,80	0,03	4,05	4,05
Düz	12	7,61	4,82	4,26	4,26	4,31	0,012	3,46	3,46



Şekil 4.10 Yapıştırıcı bölgesi yüzey alanları

Şekil 4.10 dan da anlaşılacağı üzere, yapıştırıcının uygulandığı en düşük yüzey alanına sahip olan bağlantı tipinin düz bağlantı tipi olduğu görülmektedir. Bağlantı tipi lineer yapıdan ayrılıp eğrisel yapıya doğru gidildikçe yapıştırıcının uygulanmış olduğu yüzey alanının arttığı görülmektedir. Yapıştırıcının uygulanmış olduğu yüzey alanı arttıkça genel olarak taşımış oldukları hasar yükünün artması beklenmektedir. Fakat burada tam tersi bir durum olmuştur. Yapılan çalışma sonrası görülmüştür ki geometrinin şeklinden kaynaklı olarak geometride lineer bir yapıdan eğrisel bir yapıya doğru gidildikçe hasarın başlangıç bölgesi olan yapıştırıcı uç bölgesinde daha fazla soyulma gerilmelerine maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca burulmaya maruz boru bindirme bağlantılarında alın kesit bölgesi dikkate alındığı zaman geometrinin merkezinden boru dış çapına doğru gidildikçe maksimum kayma gerilmelerine maruz kalmakta ve maksimum kayma gerilmeleri oluşacağından dolayı özellikle eğrisel bindirme bağlantılarının taşımış oldukları burulma hasar yükünde düşüş gözlenmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada St37 çelik boru malzemesinden eğrisel yüzeyli, açılı (scarf) ve düz bindirme bağlantı modelleri deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Alın eğrisel boru bindirme bağlantılarına burulma yükü uygulanarak bindirme uzunluğuna ve eğrilik yarıçapına bağlı olarak bağlantının mukavemeti üzerinde etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonuçları göstermiştir ki;

Deneysel sonuçlarla nümerik sonuçlar %84 uyumlu çıkmıştır. Bağlantı tipine bağlı olarak taşımış oldukları en yüksek burulma hasar yükleri sırasıyla; düz, açılı (scarf) ve eğrisel bindirme bağlantıları olarak sıralanmıştır. Eğrisel bindirme bağlantılarında ise eğrisellik yarıçapına bağlı olarak, eğrisellik yarıçapı arttıkça taşımış oldukları burulma hasar yüklerinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca eğrilik yarı çapı arttıkça ve bağlantı tipi lineer bir hal aldıkça hasarın başlangıç bölgesi olan yapıştırıcı uç bölgelerinde meydana gelen gerilmelerin azaldığı gözlenmiştir. Bindirme uzunluğuna bağlı olarak, bindirme uzunluğu arttıkça taşımış oldukları burulma hasar yükünün arttığı gözlenmiştir. Yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanına bağlı olarak elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, lineer bir geometrik şekilden uzaklaştıkça ve eğrisel bir şekle doğru gidildikçe yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanının arttığı gözlenmiş olup taşımış oldukları burulma hasar yükünün ise azaldığı gözlenmiştir. Yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanının azalmasına rağmen taşımış olduğu burulma hasar yükünün artması geometrinin şeklinden kaynaklanmakta olup, hasarın başlangıç bölgesi olan yapıştırıcı uç bölgesinde soyulma gerilmelerine daha fazla maruz kaldığı ve daha yüksek kayma gerilmelerinin ortaya çıktığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Çalık, “Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi”, Yüksek lisans tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [2] Ş. Çitil, “Ortası boş ve ara elemanlı çift takviyeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, 2012.
- [3] Ş. Çitil, “Hasarlı boruların tamirinde yama malzemesinin yapıştırıcı üzerine etkilerinin incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), pp. 422-426, 2017.
- [4] İ. Saraç, “Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Mil-Göbek Bağlantılarında Lineer-Elastik Gerilme Analizi ve Göbek Kenar Geometrisinin Dayanım Etkisinin Araştırılması”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(3), pp. 994-1007, 2020.
- [5] G.P. Zou, ve F. Taheri, “Stress analysis of adhesively bonded sandwich pipe joints subjected to torsional loading”, *International Journal of Solids and Structures*, 43(20), pp. 5953-5968, 2006.
- [6] B. Taş, “Yapıştırıcı ile birleştirilmiş konik geçmeli bağlantıların burulma momenti altındaki performansları”, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [7] S. Aimmanee, ve P. Hongpimolmas, “Stress analysis of adhesive-bonded tubular-coupler joints with optimum variable-stiffness composite adherend under torsion”, *Composite Structures*, 164, pp. 76-89, 2017.
- [8] Z. Tuzcu, “Farklı yapıştırıcılar ile tamir edilmiş hasarlı izotropik borularda yapıştırıcıların performanslarının incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman, 2018.
- [9] M.Y. Solmaz, “Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları”, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [10] M. Ozenc, “Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [11] Loctite Corporation, *Loctite Worldwide Design Handbook*, 1988.
- [12] R.D. Adams ve W.C. Wake, “Structural adhesive joints”, *Elsevier Applied Science Publishers*, pp. 309, London, 1984.
- [13] “Von Mises Gerilmesi”, [serdarkorkut.com](https://www.serdarkorkut.com/2017/05/22/von-mises-gerilmesi/), <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/22/von-mises-gerilmesi/>. [Erişim Tarihi: 30- Aralık- 2021]
- [14] O. Volkersen, “Recherches sur la theorie des assemblages Colles”, *Construct. Metall*, 4, pp. 3–13, 1965.
- [15] R.D. Adams, ve N.A. Peppiatt, “Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints”, *The Journal of Adhesion*, 9:1, pp. 1-18, 1977.
- [16] D. Chen ve S. Cheng, “Torsional stress in tubular lap joints”, *Int. J. Solids Struct.*, 29 (7), pp. 845–853, 1992.
- [17] Ş. Çitil, ve İ. Bozkurt, “Eğrisel yüzeyli boru bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7, pp. 63-72, 2017.
- [18] M.F. Şahan, “Hasar gören galvanizli boruların epoksi esaslı yapıştırıcı ile tamiratında boru yama geometrisi ile boru patlama basıncı arasındaki ilişkinin

- incelenmesi”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 7, Sayı 2, pp. 899-908, 2018.
- [19] M.Y. Solmaz, ve B. Taş, “Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Konik Geçme Bağlantıların Burulma Momenti Etkisindeki Davranışları”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30.2, pp. 73-86, 2018.
- [20] M.V. Walame, ve B.B. Ahuja, "Effect of bond length, bond clearance and torsional stiffness of adherends on torque transmission capability of adhesively bonded cylindrical joint", *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2.6, pp.1930-1935, 2013.
- [21] P.N. Lavalette, O.K. Bergsma, D. Zarouchas ve R. Benedictus, "Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints," *Composite Structures*, 240:112077, 2020.
- [22] C. Liu, J.X. Zhang ve C.B. Xue, “Numerical investigation on residual stress distribution and evolution during multipass narrow gap welding of thick-walled stainless steel pipes”, *Fusion Engineering and Design*, vol. 86, pp. 288–295, 2011.
- [23] G.R. Wooley and D.R Carver, “Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joints”, *J.Aircraft*, vol. 8, no. 10, pp. 817-820, 1971.
- [24] M. Özgenç, “Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışlarının incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, 2007.
- [25] B. Erkek, “Yama Ve Yapıştırıcı Kullanılarak Tamir Edilmiş Kompozit Levhaların Burkulma Davranışları Üzerine Termal Yaşlanma Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi, 2018.
- [26] P. Davies, L. Sohier, Y. Cognard, A. Bourmaud, D. Choqueuse, E. Rinnert ve R. Créac’hacdec, “Influence of adhesive bondline thickness on joint strength”, *International Journal of Adhesion &Adhesives*, vol.29, pp. 724–736, 2009.
- [27] T.C. Chon, “Analysis of Tubular Lap Joint in Torsion”, *Journal of Composite Materials*, vol. 8, no. 4, pp. 268-284,1982.
- [28] S.K. Mazumdar ve P.K. Mallick, “Static and Fatigue Behaviour Of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites”, *Polymer Composites*, 1998, vol. 19, pp. 139-146, 1998.
- [29] Ciba, Ciba User’s Guide to Adhesive Surface Preparation and Pretreatment, Ciba Specialty Chemicals, Switzerland, 1999.
- [30] K. Matsui, “Size-effects on average ultimate shear stresses of adhesive-bonded rectangular or tubular lap joints under tension-shear”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 10, no. 2, pp. 81–89, 1990.
- [31] Z.A. Oğuz, A. Erkliğ ve Ö.Y. Bozkurt, “Effects of Hydrothermal Seawater Aging on the Mechanical Properties and Water Absorption of Glass/Aramid/Epoxy Hybrid Composites”, *International Polymer Processing*, vol. 36, pp. 79-93, 2021.
- [32] Z.A. Oğuz, A. Erkliğ ve Ö.Y. Bozkurt, “Degradation of hybrid aramid/glass/epoxy composites hydrothermally aged in distilled water”, *Journal of Composite Materials*, vol. 55, pp. 2043-2060, 2021.
- [33] ANSYS Workbench V.15. Swanson Analysis Systems, Inc., 2015.
- [34] “SOLID186”, mm.bme.hu, https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html. [Erişim tarihi: 31- Ekim- 2021]