

## BORU YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA FARKLI TASARIM PARAMETRELERİNİN YAPIŞTIRICI TABAKASINDA GERİLME DAĞILIMINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

İsmail SARAÇ \*

Alınma: 03.10.2020; düzeltme: 22.01.2021, 31.01.2021; kabul: 02.02.2021

**Öz:** Bir bağlantı yöntemi olarak yapıştırma bağlantılarının mühendislik alanında kullanımı sağladığı önemli avantajlardan dolayı giderek artmaktadır. Yapılan çalışmada, boru yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğu, boru et kalınlığı ve yapıştırıcı kalınlığı değişiminin yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımına etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, bindirme uzunluğu, boru et kalınlığı ve yapıştırıcı kalınlığının boru yapıştırma bağlantılarında oldukça önemli tasarım parametreleri olduğu gösterilmiştir. Bindirme uzunluğunun 10 mm'den 20 mm'ye çıkmasıyla, yapıştırıcı tabakası bindirme uç kısımlarındaki maksimum eşdeğer gerilme değeri % 25 oranında azalmıştır. Ancak bindirme uzunluğu 20 mm'den 30 mm'ye ve 30 mm'den 40 mm'ye çıktığında azalma miktarları sırasıyla % 4 ve % 0,6 oranlarında gerçekleşmiştir. Boru et kalınlığı değerinin 0,5 mm'den 1 mm'ye çıkmasıyla yapıştırıcı tabakası bindirme uç kısımlarındaki maksimum eşdeğer gerilme değeri % 18,8 oranında azalmıştır. Buna karşın, 1, 1,5 ve 2 mm boru et kalınlıklarında A ve B noktaları civarındaki gerilmeler birbirine yakın çıkmıştır. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcı tabakası bindirme uçlarındaki gerilmeler azalmıştır. Fakat yapıştırıcı tabakasındaki, maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesi ve maksimum eşdeğer gerilme değerleri bindirme uçlarından yaklaşık 1 mm iç taraflarda oluşmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Boru yapıştırma bağlantısı, Sonlu elemanlar analizi, Gerilme analizi

### Numerical Investigation of the Effect of Different Design Parameters on the Stress Distribution in the Adhesive Layer in Pipe Bonding Joints

**Abstract:** The use of adhesive joints as a method of connection is increasing due to the significant advantages it provides in many engineering fields. In this study, the effect of the variation of lap length, pipe wall thickness and adhesive thickness on the stress distribution in the adhesive layer was numerically investigated. As a result, it has been shown that overlap length, pipe wall thickness and adhesive thickness are very important design parameters in pipe bonding joints. With the increase of lap length from 10 mm to 20 mm, the maximum equivalent stress value in the adhesive layer lap ends decreased by 25%. However, when the overlap length increased from 20 mm to 30 mm and from 30 mm to 40 mm, the reduction was 4% and 0.6%, respectively. As the pipe wall thickness increased from 0.5 mm to 1 mm, the maximum equivalent stress value in the adhesive layer lap ends decreased by 18.8%. On the other hand, the stresses around the A and B points were close to each other at 1, 1.5 and 2 mm pipe wall thickness. With the increase in adhesive thickness, the stresses on the adhesive layer lap ends decreased. However, the maximum  $\tau_{yz}$  shear stress and maximum equivalent stress values in the adhesive layer occurred approximately 1 mm inside the lap ends.

**Keywords:** Pipe bonding joint, Finite elements analysis, Stress analysis

\* Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 68100, Merkez, Aksaray.  
İletişim Yazarı: [ismailsarac@aksaray.edu.tr](mailto:ismailsarac@aksaray.edu.tr) (e-mail adresi)

## 1. GİRİŞ

Geleneksel bağlantı metotlarının yanı sıra birleştirme elemanı olarak yapıştırıcıların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Yapıştırıcı ile birleştirmenin diğer bağlantı yöntemlerine göre, değişik özelliklerdeki malzemeleri birleştirme, birleştirme bölgesinde düzgün gerilme dağılımı ve sistemleri daha hafif hale getirmesi gibi önemli özellikleri bulunmaktadır (Şekercioğlu, 2018).

Bütün bu üstünlüklerinin yanında yapıştırma bağlantılarının dayanımını etkileyen çok sayıda faktör bulunduğu için yapıştırma bağlantılarında klasik bağlantı yöntemlerine göre bağlantı mukavemeti hakkında kesin bir şey söylemek zordur. Bu yüzden yapıştırma bağlantıları birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Yapıştırma bağlantılarının performansını etkileyen faktörlerden birisi bağlantı tasarımıdır. Yapıştırma bağlantı tasarımlarında, dayanım açısından kritik bölge olan yapıştırıcı tabakasına etki eden soyulma gerilmelerinin etkisini azaltmak dayanım artışlarına neden olmaktadır. Literatür incelendiğinde özellikle yapıştırıcı bölgesi uç kısımlarında yoğunlaşan soyulma gerilmelerinin, tasarım parametreleriyle ilişkisi çok sayıda çalışmada ele alınmıştır. Üzerinde en çok araştırma yapılan bağlantı şekli tek tesirli bindirme bağlantılarıdır. Bunun yanı sıra çift tesirli yapıştırma bağlantıları ve silindirik yapıştırma bağlantıları da uygulama ve araştırma alanlarında kullanılmaktadır. Tek tesirli bindirme bağlantılarıyla ilgili yapılan çalışmalarda, birçok tasarım parametresinin dayanıma etkisi yapılan çok sayıda çalışmada gösterilmiştir (Solmaz, 2008; Temiz ve diğ., 2005; Solmaz ve Turgut, 2011; Çalık, 2016; Pinto ve diğ., 2014; Çalık ve Yıldırım, 2017; Saraç ve diğ., 2018). Üzerinde araştırma yapılan temel tasarım parametrelerinden bazıları bindirme uzunluğu, yapıştırılan malzeme kalınlığı, yapıştırıcı kalınlığı olarak ön plana çıkmaktadır.

Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının üretimi ve yapıştırıcı uygulaması nispeten kolaydır. Kesme yükleri altında gerekli yük kapasitelerini elde etmek amacıyla bindirme uzunluğu arttırılabilir. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının sınırlamalarından birisi, yapıştırılan plakaların hizalama farkından dolayı, uygulanan kuvvetin etkisiyle bindirme uçlarında soyulma gerilmelerinin çok etkin olmasıdır. Bu etkiyi azaltmak için çift tesirli yapıştırma bağlantıları tercih edilebilir. Bindirmeli boru yapıştırma bağlantılarında da bindirme uçlarında soyulma gerilmeleri oluşmaktadır (Eusebio ve Campilho, 2019). Bindirme uçlarında oluşan soyulma gerilmeleri bağlantının hasar görmesine neden olmaktadır. Özellikle çeki veya bası yükü altında çalışan bindirmeli boru yapıştırma bağlantılarında, boru et kalınlığı, bindirme uzunluğu ve yapıştırıcı kalınlığı gibi basit tasarım parametrelerinin yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımına etkisini anlamak tasarım açısından önemlidir. Yapıştırılan malzemelerin dayanımı yapıştırıcıya göre çok daha yüksek olduğu için hasarın oluştuğu kısım genellikle yapıştırıcı tabakasıdır. Bu durumda boru et kalınlığı ve bindirme uzunluğunu gerekenden yüksek almanın dayanımı arttırdığı söylenemez. Tam tersi sistemi ağırlaştırarak üretim maliyetlerini arttırmaktadır.

Literatürde silindirik yapıştırma bağlantıları ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir:

Vu Nguyen ve Kedward ( 2001) silindirik eğik alınlı yapıştırma bağlantılarında bağlantı performansını analitik ve sonlu elemanlar analizleriyle araştırmışlardır. Sonuç olarak eğik alınlı bağlantılarda yapıştırma bölgesinde düz alınlı bağlantılara göre daha düzgün bir gerilme dağılımı oluştuğunu göstermişlerdir.

Şekercioğlu ve diğ. (2003) yapıştırıcıyla birleştirilmiş silindirik yapıştırma bağlantılarında, birleştirilen malzemelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin bağlantı mukavemetine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma sonucunda, S235JR genel yapı çeliği için ideal pürüzlülük değerini  $Ra = 1,5-2 \mu m$  olarak tespit etmişlerdir.

Pugno ve Carpinteri (2003) aksenal yük altındaki boru yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımını araştırmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları gerilme analizi sonucunda, maksimum kayma gerilmelerinin yapıştırma bölgeleri kenarlarında oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Nemeş ve diğ. (2006) çekme yüküne maruz bırakılmış silindirik yapıştırma bağlantılarında gerilme dağılımını tahmin edebilmek için analitik bir model oluşturmuşlardır. Araştırmacılar oluşturdukları model ile bağlantıdaki geometrik ve malzemelere ait bazı parametrelerin değişiminin etkilerini incelemişlerdir.

Zou ve Taheri (2006) burulma yükü uygulanmış silindirik yapıştırma bağlantılarında, malzeme, boru et kalınlığı, yapıştırıcı tipi gibi faktörlerin etkilerini incelemek için analitik bir model geliştirmiştir. Oluşturulan modelde, yapışma bölgesi uç kısımlarındaki gerilme yığılması; bindirme uzunluğu, malzeme kalınlığı, yapıştırıcı özelliği gibi faktörlerin fonksiyonu olarak hesaplanmıştır.

Esmaeel ve Taheri (2009) kompozit ve alüminyum malzeme kullanarak oluşturdukları silindirik yapıştırma bağlantılarında, delaminasyon etkisini sonlu elemanlar metoduyla araştırmışlardır. Sonuç olarak, tabaka içi ayrılmaların yapıştırıcı tabakasında gerilme dağılımını etkilediğini belirtmişlerdir.

Lyon (2010) silindirik yapıştırma bağlantılarında ve diğer yapıştırma bağlantılarında kullanılabilir iki boyutlu, simetrik, lineer elastik bölgede kullanılabilir sonlu elemanlar modeli geliştirdi. Araştırmacı yaptığı analizler sonucunda bağlantı mukavemetini yapıştırma bölgesi uzunluğu, yapıştırılan malzeme kalınlıkları, yapıştırma bölgesi kenar geometrileri vb. birçok parametrenin etkilediğini belirtmiştir.

Kumar ve Khan (2016) çekme yükü altındaki silindirik yapıştırma bağlantılarında yapıştırma bölgesinde meydana gelen gerilme dağılımını bir analitik model oluşturarak incelemişlerdir. Daha sonra oluşturdukları analitik modeli doğrulamak amacıyla sonlu elemanlar analizleri yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, analitik ve sonlu elemanlar çözümlerinin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Aimmanee ve diğ. (2017) burulma momenti uygulanmış silindirik yapıştırma bağlantılarında lineer-elastik bölgede geçerli analitik bir model oluşturmuşlardır. Hazırlanan modelin ideal bağlantı şartları için kullanılabilirliğini belirtilmiştir.

Noda ve diğ. (2018) silindirik ve plaka şeklinde tasarlanan alın yapıştırma bağlantılarında çekme yükü altındaki hasar davranışlarını analitik ve sayısal olarak araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, tekil gerilme yoğunluğu bölgesinin yapıştırma bağlantı dayanımlarında etkili olduğu belirtilmiştir.

Albiez ve diğ. (2019) silindirik yapıştırma bağlantılarında, boru çapı, bindirme bölgesi uzunluğu, boru et kalınlığı, yapıştırıcı tipi, yapıştırıcı kalınlığı, imalattan kaynaklı merkezleme ve açısal doğrularsızlık gibi bağlantı parametrelerinin dayanıma etkilerini çekme yükü altında deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, bindirme bölgesi uzunluğunun artması sonucu bağlantı dayanımı artmıştır, ancak artış doğrusal olmamıştır, yapıştırıcı kalınlığının artışı bağlantı dayanımı düşürmüştür, birleştirilen parçalardaki hizalama hatası ve açısal doğrularsızlıkların dayanıma etkileri az olmuştur, yapıştırıcı tipi ve boru et kalınlığının bağlantı dayanımına etkisi gözlemlenmiştir, yapıştırıcıların çekme ve kayma testleri sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin tek başına bağlantı performanslarını belirlemede güvenilir bir yöntem olmayacağı ve bağlantı geometrisinin dayanımı etkilediği vurgulanmıştır.

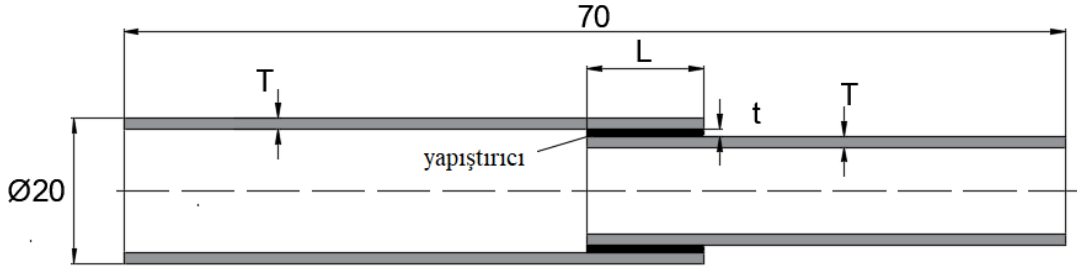
Lavalette ve diğ. (2020) çekme yükü uygulanmış alüminyum-kompozit silindirik yapıştırma bağlantılarında, bindirme bölgesi uzunluğu, iç boru çapı değişimi, boru et kalınlığı, yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme bölgesi boru uç geometrisi değişiminin bağlantı dayanımına etkilerini analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan parametrik çalışma sonucunda, bindirme uzunluğu ve iç boru çapı artışının bağlantı dayanımını önemli oranda etkilediği belirtilmiştir. Bindirme uzunluğu artışının dayanıma etkisi belirli bir uzunluktan sonra gözlemlenmemiştir. Boru et kalınlığı ve boru uç geometrisi değişikliği yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımını etkilemiştir.

Literatürde bulunan silindirik yapıştırma bağlantılarıyla ilgili sayısal analizler incelendiğinde, sonlu elemanlar modellerinin genellikle iki boyutlu ekstenel simetrik biçiminde oluşturulduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışmada ise statik çekme yüküne maruz bırakılmış

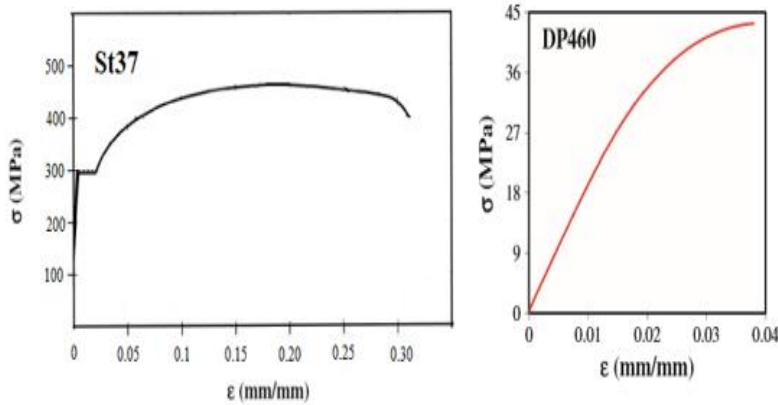
bindirmeli boru yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğu değışimi, yapıştırıcı kalınlığı değışimi ve yapıştırılan malzeme kalınlığı değışiminin bindirme bölgesinde oluşan gerilme dağılımına etkileri üç boyutlu sonlu elemanlar analizleriyle incelenmiştir. Oluşturulan üç boyutlu modeller silindirik yapıştırma bağlantısının simetrik yapısından dolayı çeyrek model olarak oluşturulmuştur. Yapılan çalışmanın amacı bindirmeli boru yapıştırma bağlantılarında; genel tasarım parametrelerinden olan bindirme uzunluğu, boru et kalınlığı ve yapıştırıcı kalınlığı değerlerinin optimum seviyede belirlenmesine yönelik parametrik bir çalışma sunmaktır.

## 2. SONLU ELEMANLAR MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Silindirik yapıştırma bağlantı modelleri ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Modellerin genel boyutları ve bağlantı geometrisi Şekil 1’de gösterilmiştir. Oluşturulan bütün modellerde bağlantı toplam uzunluğu 70 mm, dış boru çapı ise 20 mm olarak sabit alınmıştır. Oluşturulan modelde, bindirme boyu (L), boru et kalınlığı (T) ve yapıştırıcı kalınlığı (t) tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Boru malzemesi çelik, yapıştırıcı ise DP460 epoksi yapıştırıcı alınmıştır. Çelik ve yapıştırıcıya ait mekanik özellikler ve çekme eğrileri Şekil 2 ve Tablo 1’de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri lineer-elastik olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün analizlerde, Tablo 1’de verilen çelik malzeme ve yapıştırıcıya ait elastisite modülü ve poisson oranları ANSYS programına tanımlanmıştır.



Şekil 1:  
Boru bağlantı modeli genel boyutlar

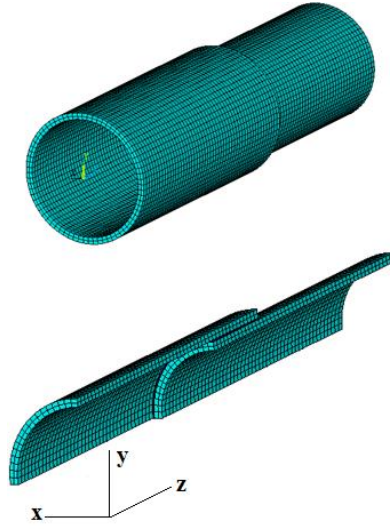


Şekil 2:  
St 37 ve DP460 Gerilme-birim şekil değışirme eğrileri (Kossakowski ve Wcislik, 2018; Özel ve diğ., 2014)

**Tablo 1. DP460 ve St37 mekanik özellikleri (Akpınar,2014; Malag ve Kukielka, 2007)**

	St37	DP460
Elastisite modülü (GPa)	200	1,984
Poisson oranı	0,3	0,38
Akma dayanımı(MPa)	235	38,4
Çekme dayanımı (MPa)	375	44,6

Bağlantı geometrisinin silindirik yapısından dolayı model yz ve xz düzlemlerinde simetriktir. Bu durum dikkate alınarak oluşturulan modeller çeyrek model (1/4) olarak tasarlanmıştır (Şekil-3). Modellerin çeyrek olarak oluşturulması sonucunda eleman sayısının azaltılması ve çözümün daha kısa sürede yapılması hedeflenmiştir.



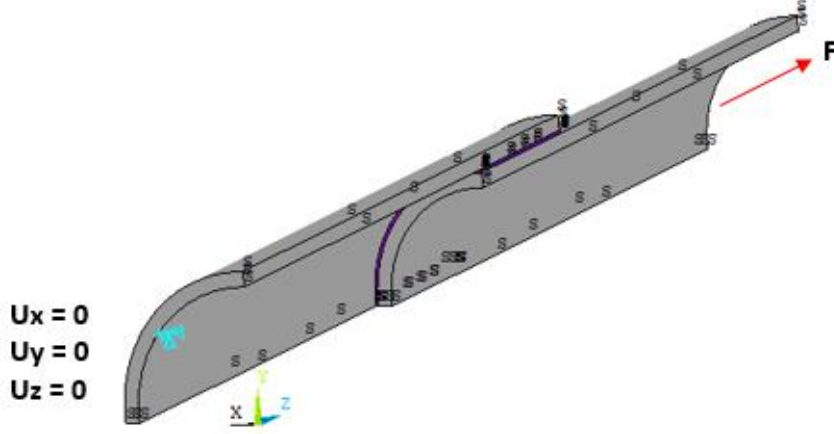
**Şekil 3:**  
*Tam ve çeyrek model*

Oluşturulan modelleri elemanlara ayırma işlemi yapılan analizin doğruluğunu etkileyen önemli bir faktördür. Yakınsama işlemi için yapıştırıcı tabakasındaki Von Mises gerilmeleri incelenmiştir. Tablo 2’de gösterilen veriler incelendiğinde eleman boyutunun azaltılmasıyla Von Mises gerilmelerindeki değişim ondalık mertebede gerçekleşmiştir. Buna göre eleman boyutu bütün modellerde işlem hızı da düşünülerek 1 mm olarak tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar modellerinde, üç boyutlu modellemeye uygun olan, 3 serbestlik dereceli ve 20 düğüm noktalı solid 186 elemanı kullanılmıştır.

**Tablo 2. Yakınsama çalışması**

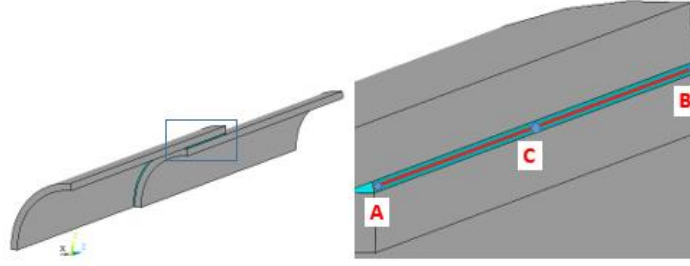
Analiz	Eleman Boyutu (mm)	Düğüm Sayısı	Von Mises Gerilmesi (MPa)
1	4	863	4,08
2	2	2781	4,31
3	1	9185	4,58
4	0,8	23000	4,67

Probleme ait sınır şartları Şekil 4’ te gösterildiği gibi programa tanımlanmıştır. Çapı büyük olan boru ucu tüm yönlerde sabitlenmiştir. Bütün bağlantı modellerinde çapı küçük olan borunun uç kısmına  $F=3000$  N çekme kuvveti uygulanmıştır. Modellerin yz ve xz düzlemlerine simetri sınırı şartları tanımlanmıştır.

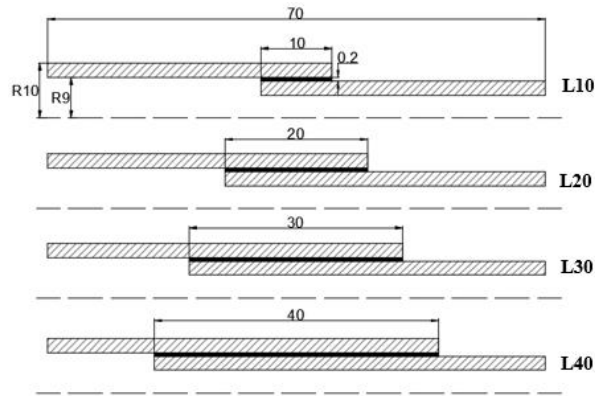


**Şekil 4:**  
Sınır şartları

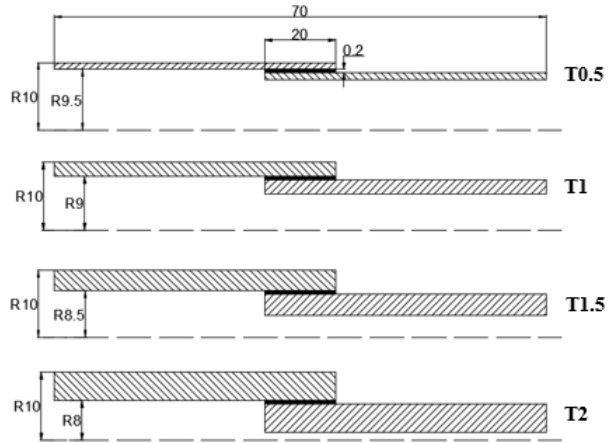
Yapılan çalışmada bindirme uzunluğu (L) değişimi, yapıştırılan malzeme kalınlığı (T) değişimi ve yapıştırıcı kalınlığı (t) değişiminin kritik bölge olan yapıştırıcı tabakasında meydana gelen gerilme dağılımına etkileri incelenmiştir. Yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımları Şekil 5’te gösterilen A-B hattı boyunca elde edilmiştir. Şekil 6-8’de oluşturulan modellerin boyutları gösterilmiştir. Bindirme uzunluğu değişimini incelemek için oluşturulan modellerde, bindirme uzunlukları 10, 20, 30 ve 40 mm olan dört model oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerde yapıştırıcı kalınlığı 0,2 mm, boru et kalınlığı ise 1 mm olarak sabit alınmıştır. Boru et kalınlığı değişimini incelemek için oluşturulan modellerde, boru et kalınlıkları 0,5, 1, 1,5 ve 2 mm olan dört model oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerde yapıştırıcı kalınlığı 0,2 mm, bindirme uzunluğu ise 20 mm olarak sabit alınmıştır. Yapıştırıcı kalınlığı değişimini incelemek için oluşturulan modellerde, yapıştırıcı kalınlıkları 0,2, 0,4, 0,6 ve 0,8 mm olan dört model oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerde boru et kalınlığı 1 mm, bindirme uzunluğu ise 20 mm olarak sabit alınmıştır.



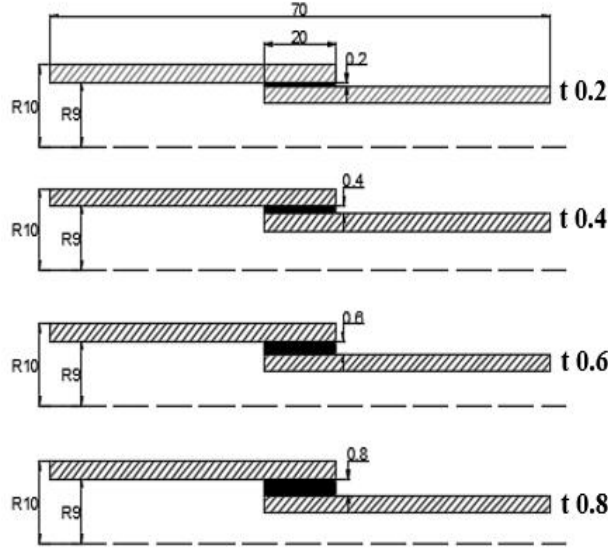
**Şekil 5:**  
*Yapıştırıcı tabakasındaki A-B hattı*



**Şekil 6:**  
*Bindirme uzunluğu değişimine göre modeller*



**Şekil 7:**  
*Boru et kalınlığı değişimine göre modeller*



**Şekil 8:**  
*Yapıştırıcı kalınlığı değışimine göre modeller*

### 3. ANALİZ SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak oluşturulan silindirik yapıştırma bağlantılarında çekme yükü altında farklı tasarım parametrelerinin bindirme bölgesinde oluşan gerilme dağılımına etkileri lineer-elastik gerilme analizleriyle incelenmiştir. Bütün gerilme dağılımları Şekil 5'te gösterilen A-B hattı için elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 9-17'de gösterilmiştir. Grafiklerde bindirme bölgesindeki noktalar bindirme uzunluğuna bölünerek (X/L) normalleştirilmiştir. Her bir tasarım parametresi için yapıştırıcı tabakasındaki hasar oluşumunda etkin olan normal gerilme ( $\sigma_y$ ) ve kayma gerilmesi ( $\tau_{yz}$ ) dağılımları gösterilmiştir. Bunun yanı sıra yapıştırıcı tabakasında oluşan bütün gerilmelerin etkisini görmek amacıyla eş değer gerilme ( $\sigma_{eqv}$ ) dağılımları da ayrıca gösterilmiştir. Yapıştırıcı tabakasındaki hasar açısından kritik noktaların belirlenmesinde ve yorumlanmasında eş değer gerilme dağılımı referans alınmıştır.

#### 3.1. Bindirme uzunluğunun etkisi

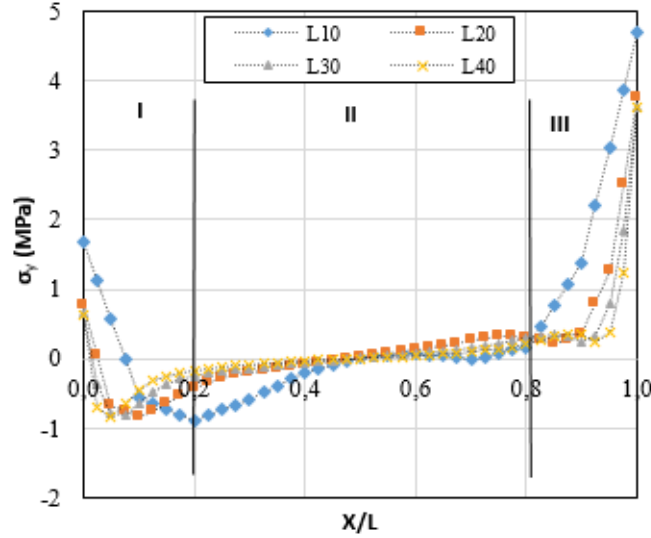
Şekil 9'da bindirme uzunluğu değışiminin A-B hattı boyunca,  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Buna göre, bütün bindirme uzunluğu değışimlerinde,  $\sigma_y$  normal gerilme değışimleri bindirme uçlarında artmaktadır. A-B hattı boyunca  $\sigma_y$  normal gerilme değışimleri incelendiğinde, A noktasında pozitif karakterli olan gerilme değışimleri, hızlı bir şekilde negatif bölgeye geçmekte ve tam C noktasında (orta nokta) sıfır olmaktadır. C noktasından B noktasına doğru pozitif yönde artarak B noktasında maksimum değışimleri almaktadır. Bütün bindirme uzunluğu değışimlerinde Şekil 10'da görüldüğü gibi, II. bölgede oluşan  $\sigma_y$  normal gerilme değışimleri, I. ve III. bölgeye kıyasla daha düzgün dağılmaktadır. Bindirme uzunluğunun artmasıyla I. ve III. bölgelerdeki  $\sigma_y$  normal gerilme değışimleri azalmıştır. III. bölgede ise daha düzgün bir  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımı elde edilmiştir. Bindirme uzunluğunun artmasıyla özellikle I. ve III. bölgede gözlemlenen gerilme azalmaları lineer olarak gerçekleşmemiştir. Özellikle 30 mm ve 40 mm bindirme uzunluğunda elde edilen  $\sigma_y$  normal gerilme değışimleri birbirlerine çok yakın bulunmuştur.

Şekil 10'da bindirme uzunluğu değışiminin A-B hattı boyunca  $\tau_{yz}$  kayma gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Buna göre, bindirme uzunluğunun artmasıyla  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değışimleri

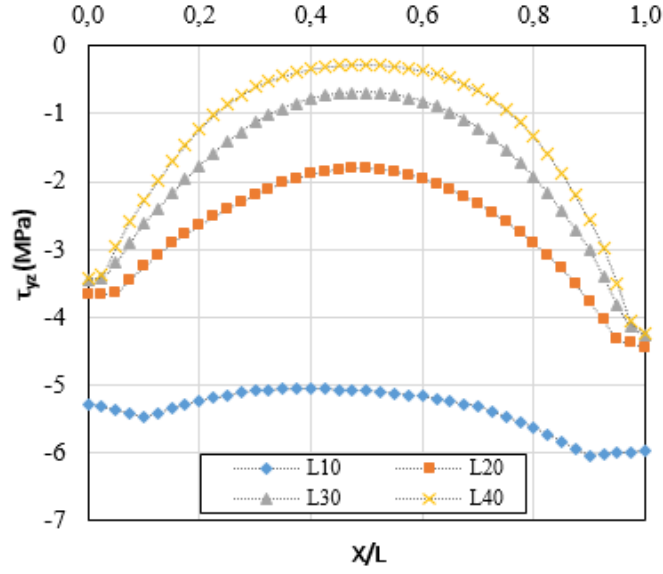


azalmıştır. 20 mm, 30 mm ve 40 mm bindirme boylarında maksimum kayma gerilmeleri bindirme uç bölgelerinde (A ve B noktaları) gözlemlenirken, 10 mm bindirme uzunluğunda maksimum kayma gerilme değerleri bindirme uçları iç kısımlarında görülmektedir. Bindirme uzunluğunun artmasıyla  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri azalırken, A-B hattındaki gerilme dağılımı 10 mm bindirme boyu ile karşılaştırıldığında düzgün olmamaktadır.  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri A noktasından C noktasına doğru azalarak bindirme bölgesi orta kısmında (C noktası) minimum değerleri alarak sıfıra yaklaşmaktadır. Daha sonra tekrar B noktasına doğru artarak maksimum değerleri almaktadır.

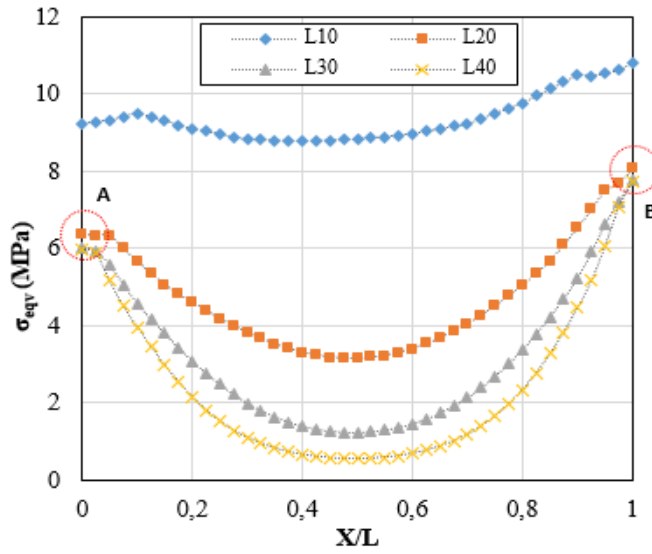
Şekil 11’de bindirme uzunluğu değişiminin A-B hattı boyunca  $\sigma_{eqv}$  eşdeğer gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde bindirme uzunluğunun artmasıyla yapıştırıcı tabakasındaki (A-B hattı) eş değer gerilme değerleri azalmıştır. A ve B noktalarında maksimum olan eş değer gerilmeler bindirme bölgesi orta kısmında (C noktası) minimum değerleri almıştır. 10 mm bindirme boyunda daha düzgün olan eş değer gerilme dağılımı, bindirme boyunun artmasıyla düzgün yapısını kaybetmiştir. Dayanım kriteri olarak yapıştırma tabakasındaki eş değer gerilme miktarları esas alınacak olursa, bütün bindirme boyları için riskli bölgelerin A ve B noktaları civarları olduğu söylenebilir. Bindirme bölgesi orta kısımlarında eşdeğer gerilme değerleri minimum değerleri almıştır. Bindirme uzunluğunun 10 mm’den 20 mm’ye çıkmasıyla eş değer gerilme değerlerinde grafikte de görüldüğü gibi dikkate değer bir azalma gözlemlenmektedir. Ancak 20 mm, 30 mm ve 40 mm bindirme boyları bir bütün olarak değerlendirildiğinde özellikle dayanım açısından riskli bölgeler olan A ve B noktaları civarındaki gerilme değerleri (Şekil 11) birbirine yakın değerler almıştır.



**Şekil 9:**  
Bindirme uzunluğunun  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımına etkisi



**Şekil 10:**  
Bindirme uzunluğunun  $\tau_{yz}$  kayma gerilme dağılımına etkisi



**Şekil 11:**  
Bindirme uzunluğunun eşdeğer gerilme dağılımına etkisi

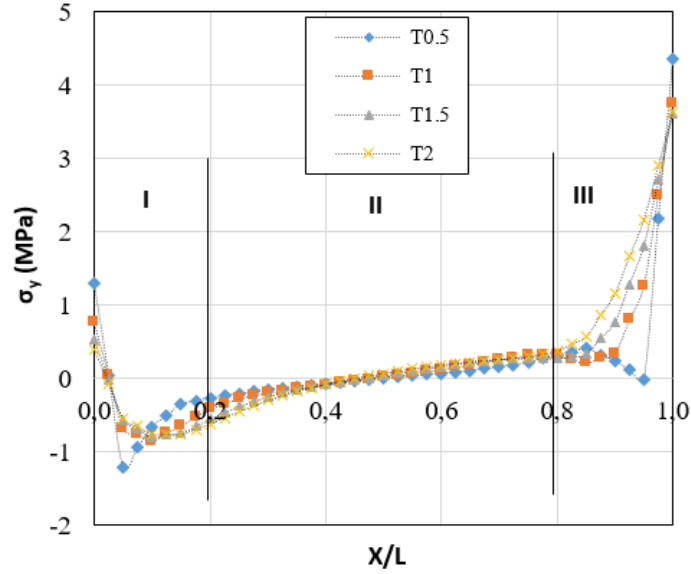
### 3.2. Boru et kalınlığının etkisi

Şekil 12’de boru et kalınlığı değişiminin A-B hattı boyunca,  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Bütün boru et kalınlığı değerlerinde,  $\sigma_y$  normal gerilme değerleri bindirme uç bölgelerinde artmaktadır. A-B hattı boyunca  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımları incelendiğinde, A noktasında pozitif karakterli olan gerilme değerleri, hızlı bir şekilde negatif bölgeye geçmekte ve tam C noktasında (orta nokta) sıfır olmaktadır. C noktasından B noktasına doğru pozitif yönde artarak B noktasında maksimum değerleri almaktadır. Bütün boru et kalınlığı değerlerinde Şekil 13’te görüldüğü gibi, II. bölgede oluşan  $\sigma_y$  normal gerilme değerleri, I. ve III. bölgeye kıyasla daha düzgün dağılmaktadır. Boru et kalınlığının artmasıyla A ve B noktalarındaki  $\sigma_y$  normal

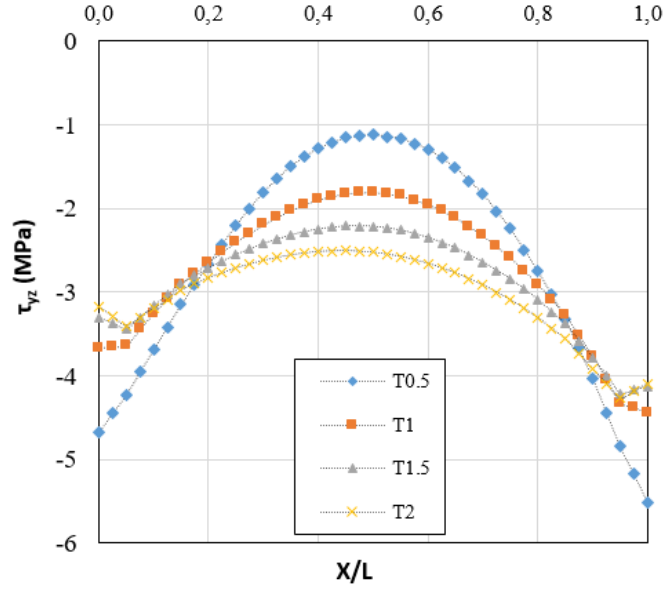
gerilme değerleri azalmıştır. Ancak azalma miktarları lineer olarak gerçekleşmemiştir. Özellikle gerilme değerlerinin maksimum olduğu A ve B noktalarında, 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm et kalınlıklarında  $\sigma_y$  normal gerilme değerleri 0,5 mm et kalınlığına kıyasla birbirlerine yakın değerler almıştır.

Şekil 13'te boru et kalınlığı değişiminin A-B hattı boyunca  $\tau_{yz}$  kayma gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Boru et kalınlığı değerinin artmasıyla bindirme uç kısımlarında (A ve B noktaları)  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri azalmıştır. Azalma miktarları lineer olarak gerçekleşmemiştir.  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri A ve B noktaları civarında maksimum değerler alırken, bindirme bölgesi orta noktasında (C noktası) minimum değerleri almıştır. Ayrıca boru et kalınlığı değerinin artması A-B arasındaki gerilme dağılımı daha düzgün olmuştur.

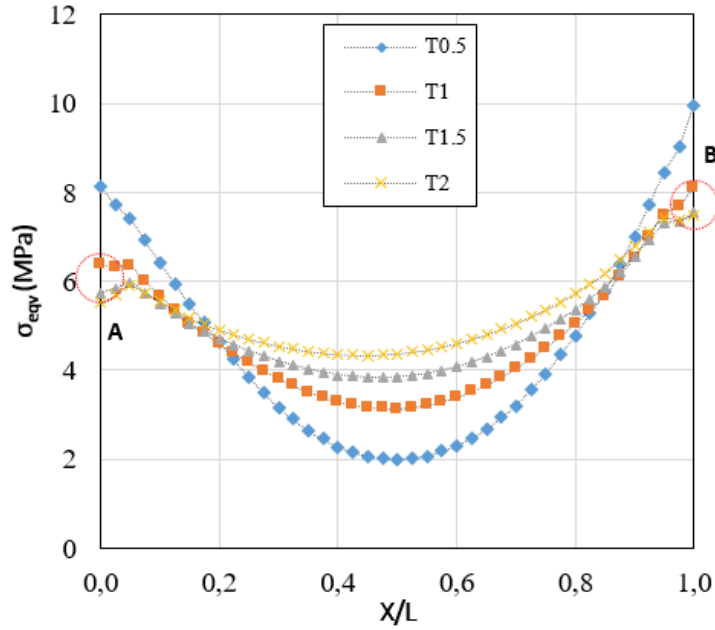
Şekil 14'te boru et kalınlığı değişiminin A-B hattı boyunca  $\sigma_{eqv}$  eşdeğer gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Boru et kalınlığının artmasıyla, yapıştırıcı tabakasındaki (A-B hattı) eş değer gerilme değerleri azalmıştır. A ve B noktalarında maksimum olan eş değer gerilmeler bindirme bölgesi orta kısmında (C noktası) minimum değerler almıştır. Boru et kalınlığının artması A-B hattındaki eş değer gerilme dağılımının daha düzgün olmasını sağlamıştır. Dayanım kriteri olarak yapıştırma tabakasındaki eş değer gerilme miktarları esas alınacak olursa, riskli bölgelerin A ve B noktaları civarları olduğu söylenebilir. Boru et kalınlığı değerinin 0,5 mm'den 1 mm'ye çıkmasıyla eş değer gerilme değerlerinde grafikte de görüldüğü gibi dikkate değer bir azalma gözlemlenmektedir. Ancak 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm boru et kalınlıkları bir bütün olarak değerlendirildiğinde A ve B noktaları civarındaki gerilme değerleri (Şekil 14) birbirine yakın değerler almıştır.



**Şekil 12:**  
Boru et kalınlığının  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımına etkisi



**Şekil 13:**  
*Boru et kalınlığı değişiminin  $\tau_{yz}$  gerilme dağılımına etkisi*



**Şekil 14:**  
*Boru et kalınlığı değişiminin eşdeğer gerilme dağılımına etkisi*

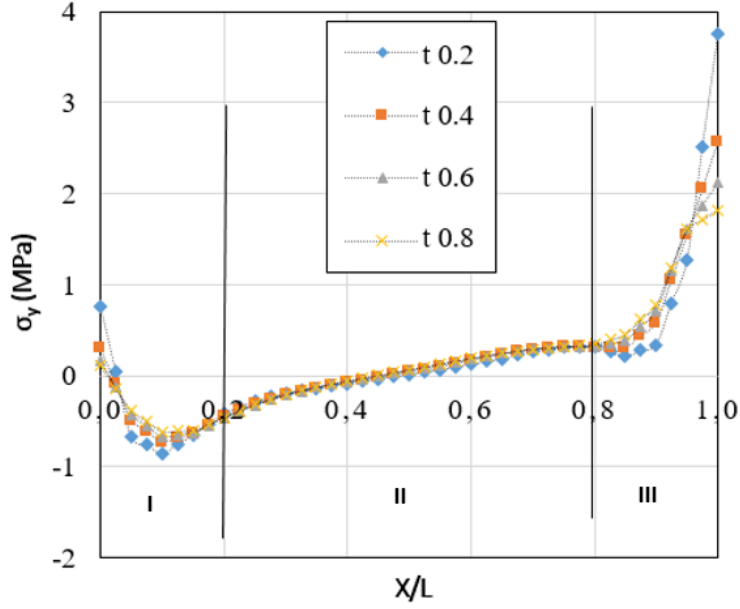
### 3.3. Yapıştırıcı kalınlığının etkisi

Şekil 15'te yapıştırıcı kalınlığı değişiminin A-B hattı boyunca,  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir.  $\sigma_y$  normal gerilme değerleri bindirme uç bölgelerinde artmaktadır. A-B hattı boyunca  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımları incelendiğinde, A noktasında pozitif karakterli olan gerilme değerleri, hızlı bir şekilde negatif bölgeye geçmekte ve tam C noktasında (orta nokta) sıfır olmaktadır. C noktasından B noktasına doğru pozitif yönde artarak B noktasında maksimum değerleri almaktadır. Şekil 15'te görüldüğü gibi, II. bölgede oluşan  $\sigma_y$  normal gerilme değerleri,

I. ve III. bölgeye kıyasla daha düzgün dağılmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla A ve B noktalarındaki  $\sigma_y$  normal gerilme değerleri azalmıştır. Ancak azalma miktarları lineer olarak gerçekleşmemiştir. Yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla A-B hattındaki  $\sigma_y$  normal gerilme dağılımı daha düzgün gerçekleşmiştir.

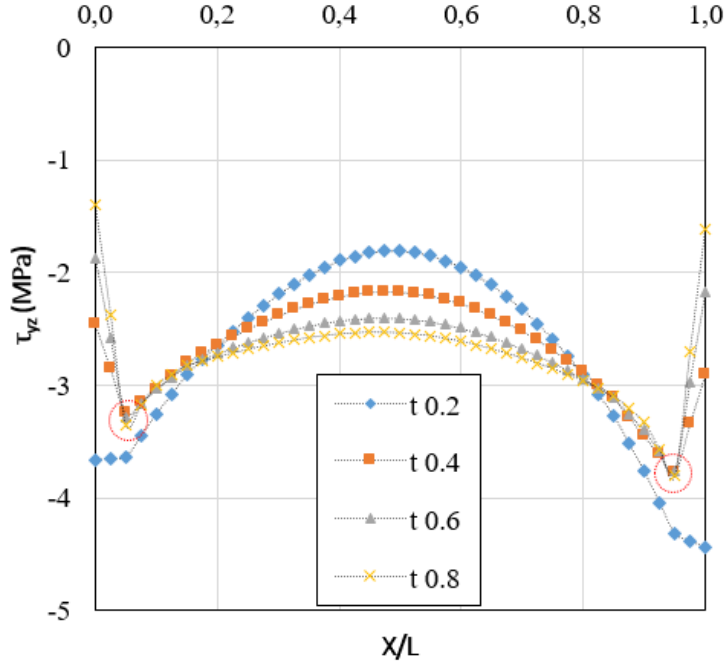
Şekil 16'da yapıştırıcı kalınlığı değişiminin A-B hattı boyunca  $\tau_{yz}$  kayma gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla bindirme uç kısımlarında (A ve B noktaları)  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri azalmıştır. Buna karşın, yapıştırıcı kalınlığının artması sonucu A-B hattındaki maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilme değerleri A ve B noktalarından iç kısımlarda yaklaşık olarak aynı noktada toplanmıştır.

Şekil 17'de yapıştırıcı kalınlığı değişiminin A-B hattı boyunca  $\sigma_{eqv}$  eşdeğer gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla, bindirme uçlarındaki (A ve B noktaları) eş değer gerilme değerleri azalmıştır. Yapıştırıcı kalınlığının artması sonucu A-B hattındaki maksimum eş değer gerilme değerleri A ve B noktalarından iç kısımlarda yaklaşık olarak aynı noktada toplanmıştır. Dayanım kriteri olarak yapıştırma tabakasındaki eş değer gerilme dağılımı esas alınacak olursa, 0,2 mm yapıştırıcı kalınlığı için riskli bölgelerin A ve B noktaları, 0,4 mm, 0,6 mm ve 0,8 mm yapıştırıcı kalınlıkları için A ve B noktalarından 1 mm içerideki kısımlar olduğu söylenebilir.

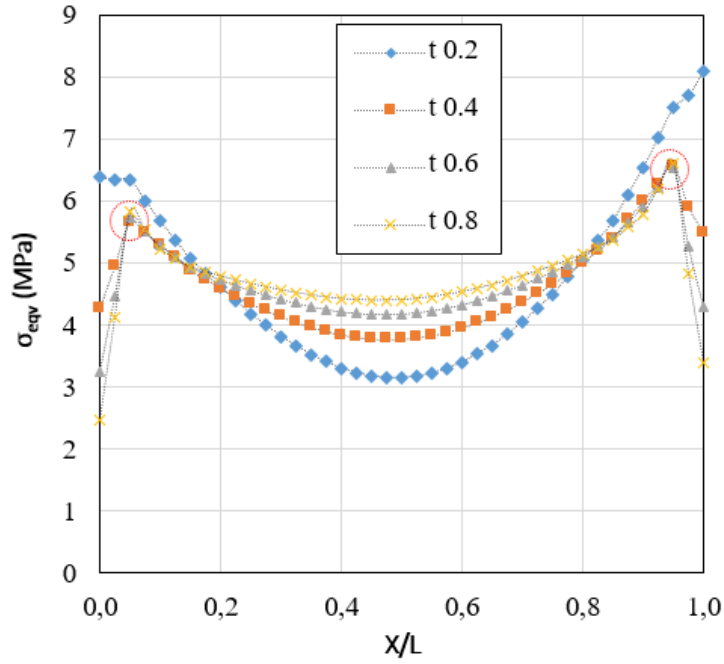


Şekil 15:

Yapıştırıcı kalınlığı değişiminin  $\sigma_y$  gerilme dağılımına etkisi



**Şekil 16:**  
*Yapıştırıcı kalınlığı değişiminin  $\tau_{yz}$  gerilme dağılımına etkisi*



**Şekil 17:**  
*Yapıştırıcı kalınlığı değişiminin eşdeğer gerilme dağılımına etkisi*

#### 4. GENEL SONUÇLAR

Yapılan bu sayısal çalışmada çekme yükü etkisindeki boru yapıştırma bağlantılarında, bindirme uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı ve boru et kalınlığı değişimlerinin dayanım açısından

kritik bölge olan yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımına etkileri üç boyutlu sonlu elemanlar analizleriyle incelenmiştir. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Bindirme uzunluğunun 10 mm'den 20 mm'ye çıkmasıyla, bindirme uç kısımlarındaki gerilmelerde dikkate değer bir azalma gözlemlenmektedir. Ancak 20, 30 ve 40 mm bindirme boyları bir bütün olarak düşünüldüğünde özellikle dayanım açısından riskli kısımlar olan A ve B noktaları civarındaki gerilmeler birbirine yakın değerler almıştır. Bindirme uzunluğunun 10 mm'den 20 mm'ye çıkmasıyla, yapıştırıcı tabakası bindirme uç kısımlarındaki maksimum eşdeğer gerilme değeri % 25 oranında azalmıştır. Ancak bindirme uzunluğu 20 mm'den 30 mm'ye ve 30 mm'den 40 mm'ye çıktığında azalma miktarları sırasıyla % 4 ve % 0,6 oranlarında gerçekleşmiştir.

Boru et kalınlığı değerinin 0,5 mm'den 1 mm'ye çıkmasıyla bindirme uç kısımlarındaki gerilmelerde azalma gözlemlenmektedir. Buna karşın, 1, 1,5 ve 2 mm boru et kalınlıklarında A ve B noktaları civarındaki gerilmeler birbirine yakın çıkmıştır. Boru et kalınlığının artması A-B hattındaki gerilme dağılımının daha homojen olmasını sağlamıştır. Boru et kalınlığı değerinin 0,5 mm'den 1 mm'ye çıkmasıyla yapıştırıcı tabakası bindirme uç kısımlarındaki maksimum eşdeğer gerilme değeri % 18,8 oranında azalmıştır.

Yapıştırıcı kalınlığının artması ile bindirme uçlarındaki  $\sigma_y$  normal gerilme,  $\tau_{yz}$  kayma gerilme ve eş değer gerilmeler azalmıştır. Fakat yapıştırıcı tabakasındaki, maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilme ve maksimum eş değer gerilme değerleri bindirme uçlarından yaklaşık 1 mm iç taraflarda oluşmuştur. 0,4, 0,6 ve 0,8 mm yapıştırıcı kalınlıkları için yapıştırıcı tabakasındaki maksimum  $\tau_{yz}$  kayma gerilme ve eş değer gerilmeleri birbirine yakın çıkmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre genel olarak; bağlantı dayanımını arttırmak için bindirme uzunluğunu sürekli arttırmanın ve boru et kalınlığının 1 mm'den daha yüksek değerlere çıkarmanın gereksiz olduğu söylenebilir. Yapıştırıcı kalınlığını arttırmak ise bindirme uçlarındaki gerilme değerlerini düşürmüştür.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadır.

## YAZAR KATKISI

İsmail Saraç, bu çalışmanın bütün süreçlerini yürütmüş ve sonuçlandırmıştır.

## KAYNAKLAR

1. Şekercioğlu, T. (2018) *Makine Elemanları Hesap Şekillendirme*, Birsen yayın evi, İstanbul.
2. Solmaz, M.Y. (2008) Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik analiz ve tasarımları, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
3. Temiz, Ş., Özel, A. ve Aydın, M.D. (2005) The effect of adherend thickness on the failure of adhesively bonded single lap joints, *J Adhes Sci Technol*, 19(8), 705-718. doi.org/10.1163/1568561054890499
4. Solmaz, M.Y. ve Turgut A. (2011) An experimental and numerical study on the effects of taper angles and overlap length on the failure and stress distribution of adhesively bonded single lap joints, *Math Comput Appl*, 16, 159-170. doi.org/10.3390/mca16010159
5. Çalık, A. (2016) Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively bonded single lap joint, *Engineering Review*, 36, 29-34. https://hrcak.srce.hr/151838

6. Pinto, A.M.G., Ribeiro, N.F.Q.R., Campilho, R.S.D.G. ve Mendes, I.R. (2014) Effect of Adherend Recessing on the Tensile Strength of Single Lap Joints, *The Journal of Adhesion*, 90, 649-666. doi.org/10.1080/00218464.2013.766132
7. Çalık, A. ve Yıldırım, S. (2017) Effect of adherend recessing on bi-adhesively bonded single-lap joints with spew fillet, *Sadhana*, 42, 317–325. DOI 10.1007/s12046-017-0603-2
8. Saraç, İ., Adin, H. Ve Temiz, Ş. (2018) Experimental determination of the static and fatigue strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles, *Composites Part B: Engineering*, 155, 92-103. doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.006
9. Saraç, İ., Adin H. Ve Temiz, Ş. (2019) Investigation of the effect of use of Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nano-TiO<sub>2</sub> and Nano-SiO<sub>2</sub> powders on strength of single lap joints bonded with epoxy adhesive, *Composites Part B: Engineering*, 166, 472-482. doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.007
10. Eusebio, S.M.L. Ve Campilho, R.D.S.G. (2019) Modelling of tubular adhesively bonded joints by the Extended Finite Element Method, *Procedia Manufacturing*, 41, 484-491. doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.001
11. Nguyen, V. ve Kedward, T. (2001) Non-linear modeling of tubular adhesive scarf joints loaded in tension, *The Journal of Adhesion*, 76(3), 265-295. doi.org/10.1080/00218460108029629
12. Şekercioğlu, T., Rende, H., Gülsöz, A. ve Meran, C. (2003) The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical components, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 82–86. doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00463-1
13. Pungo, N. Ve Carpinteri, A. (2003) Tubular adhesive joints under axial load, *Journal of Applied Mechanics*, 76(6), 832-839. doi.org/10.1115/1.1604835
14. Nemes, O., Lachaud, F. Ve Mojtabi, A. (2006) Contribution to the study of cylindrical adhesive joining, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26, 474-480. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.07.009
15. Zou, G.P. ve Taheri F. (2006) Stress analysis of adhesively bonded sandwich pipe joints subjected to torsional loading, *International Journal of Solids and Structures*, 43(20), 5953-5968. doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.05.035
16. Esmaeel, R.A. ve Taheri, F. (2009) Stress analysis of tubular adhesive joints with delaminated adherend, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23, 1827-1844. doi.org/10.1163/016942409X12459095670511
17. Lyon, P.E. (2010) Axisymmetric finite element modeling for the design and analysis of cylindrical adhesive joints based on dimensional stability, *Master of Science*, Utah State University, Utah.
18. Kumar, S. ve Khan, M.A. (2016) An elastic solution for adhesive stresses in multi-material cylindrical joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 64, 142-152. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.10.009
19. Aimmanee, S. ve Hongpimolmas P. (2017) Stress analysis of adhesive-bonded tubular-coupler joints with optimum variable-stiffness composite adherend under torsion, *Composite Structures*, 164, 76-89. doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.043
20. Noda, N.A., Ren, F., Takaki, R., Wang, Z., Oda, K., Miyazaki, T. ve Sano Y. (2018) Intensity of singular stress field over the entire bond line thickness range useful for evaluating the adhesive strength for plate and cylinder butt joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85, 234-250. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.05.013



21. Albiez, M., Vallée, T., Fricke, H. ve Ummerhofer, T. (2019) Adhesively bonded steel tubes Part I: Experimental investigations, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 90, 199-210. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.02.005
22. Lavalette, N.P, Bergsma, O.K., Zarouchas, D. ve Benedictus R. (2020) Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints, *Composite Structures*, 240, 112077. doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112077
23. Kossakowski, P.G. ve Weislik W. (2018) Numerical simulation of material damage for structural steels S235JR and S355J2G3, *Advances in Computational Design*, 3(2), 133-146. doi.org/10.12989/acd.2018.3.2.133
24. Özel, A., Yazıcı, B., Akpınar, S., Aydın, M.D. ve Temiz Ş. (2014) A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends, *Composites Part B*, 62, 167-174. doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.001
25. Akpınar, S. (2014) The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers, *Composites Part B*, 67, 170-178. doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.06.023
26. Malag, L. ve Kukielka L. (2007) Hybrid method to determinate the states of deformation and stress in material during the tensile test, *Proc. Appl. Math. Mech.*, 7, 2090025–2090026. DOI 10.1002/pamm.200701099
27. ANSYS eleman tipleri. Erişim Adresi: <https://ansyshelp.ansys.com> (Erişim tarihi: 17.01.2020)

