



## ÇEKME YÜKÜ UYGULANMIŞ BORU YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA BİNDİRME UÇ GEOMETRİSİNİN BAĞLANTI DAYANIMINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmail SARAÇ 

Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Merkez,  
Aksaray, TÜRKİYE  
[ismailsarac@aksaray.edu.tr](mailto:ismailsarac@aksaray.edu.tr)

(Geliş/Received: 23.03.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.05.2020)

**ÖZ:** Yapıştırma bağlantıları, farklı bağlantı geometrilerinde oluşturulabilmektedir. Yapıştırma bağlantı tasarımlarında yoğun bir şekilde kullanılan ve üzerinde çok sayıda araştırma yapılmış yapıştırma bağlantı şekillerinden birisi de tek tesirli bindirme bağlantılarıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda tek tesirli bindirme bağlantılarının bindirme uçlarında oluşan gerilme yığılmalarının hasarın oluşmasında etkin rol oynadığı belirtilmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantılarında, bindirme uçlarında, malzeme azaltılması yapılmasının gerilme yığılmalarını düşürdüğü ve bunun sonucu olarak bağlantı dayanımının arttığı yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, yapıştırılan malzemelerin bindirme uçlarında malzeme azaltılmasının, farklı bağlantı geometrilerinde dayanıma etkisinin araştırılması önemli olmaktadır. Yapılan bu çalışmada, çekme yüküne maruz bırakılmış boru yapıştırma bağlantıları modellenerek, yapıştırılan boruların bindirme bölgesindeki farklı uç geometrilerinin bağlantı mukavemetine etkisi bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak yapıştırılan boruların uç kısımlarındaki et kalınlığının bağlantı dayanımına etkisi araştırılmıştır. Daha sonra, borunun bindirme bölgesi boyunca et kalınlığı, bindirme ucundan itibaren farklı uzunluklarda modellenerek boru ucu uzunluk değişiminin bağlantı dayanımına etkisi çekme yükü altında araştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma şartlarında ideal tasarımın Model-4 tasarımı olduğu bulunmuştur. Bu tasarımda yapıştırma bağlantılarında kritik bölge olan yapıştırıcı tabakasının dayanımı % 20,5 oranında artmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Boru yapıştırma bağlantısı, hasar analizi, bindirme uç geometrisi.

### The investigation of the effect of the overlap end geometry on the joint strength in pipe bonding joints with tensile load

**ABSTRACT:** The adhesive bonding joints can be created in different connection geometries. One of the forms of adhesive bonding joints, which has been used extensively in bonding designs and has been researched, is single lap joints (SLJs). As a conclusion of the studies carried out, it has been stated that the stress accumulation on the overlap ends of the SLJs plays an effective role in the formation of the failure. It is understood from the studies that the reduction of the material on the overlap ends decreases the stress accumulation in the SLJs, and as a result, the strength of the SLJs increased. Therefore, it is critical to examine the effect of material reduction on the overlap ends of the adhered materials on strength in different joints geometries. In this study, pipe bonding joints exposed to tensile load were modeled and the effect of different end geometries of the adhered pipes on the bond strength was investigated using ANSYS, a finite element analysis software. In the study, firstly, the effect of the wall thickness at the ends of the adhered pipes on the bond strength was investigated. The wall thickness along the overlap line of the pipe was modeled in

different lengths from the overlap end and the effect of the pipe end length change on the bond durability was examined under tensile load. Eventually, it was obtained that the ideal design in these working conditions was the Model-4 design. In this design, the strength of the adhesive layer, which is the critical region in bonding joints, has increased by 20.5%.

*Keywords: Pipe bonding joint, failure analysis, overlap end geometry.*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel bağlantı metotlarının yanında bir birleştirme elemanı olarak yapıştırıcıların kullanımı, özelliklerindeki gelişmelerin neticesinde 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).

Yapıştırma bağlantıları, özellikle enerji tasarrufunun ön plana çıktığı otomotiv ve havacılık sanayiinde geleneksel birleştirme metotlarına göre sağladığı daha hafif yapılar nedeniyle tercih edilmektedir. Bütün bu avantajlarının yanında yapıştırma bağlantılarının dayanımını etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Dolayısıyla, klasik bağlantı yöntemlerine göre yapıştırma bağlantılarının dayanımının her yönden incelenmesi gerekmektedir. Yapıştırma bağlantılarının dayanımını etkileyen faktörlerden birisi bağlantı tasarımıdır. Yapıştırma bağlantılarında en çok kullanılan bağlantı tasarımı tek tesirli bindirme bağlantılarıdır. Araştırmacılar tarafından tek tesirli yapıştırma bağlantıları üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde soyulma gerilmeleri bindirme uç bölgelerinde yoğunlaşarak hasar oluşumunda etkili olduğu bir çok çalışmayla gösterilmiştir. Araştırmacılar tek tesirli bindirme bağlantılarında, bindirme uç bölgelerinde bazı tasarım değişiklikleri yaparak bağlantı dayanımını arttırmayı amaçlamışlardır.

(Solmaz, 2008), farklı bindirme mesafeleri ve uç açıları, yüksek mukavemetli ve düşük mukavemetli iki farklı dayanımdaki yapıştırıcı kullanarak ürettiği basit bindirme bağlantılarının dayanım özelliklerini çekme zorlaması altında deneylerle ve nümerik tasarımlarla araştırmıştır. Sonuç olarak, düşük mukavemetli yapıştırıcı kullanarak birleştirilen bağlantıların bindirme uç açısı değişimiyle yüksek mukavemetli yapıştırıcı kullanılan bağlantılar kadar yük taşıyabileceğini göstermiştir.

(Temiz ve diğ., 2005), film tipi yapıştırıcı kullanarak ürettikleri tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, malzeme kalınlığı ve bindirme mesafesi değişiminin bağlantı dayanımına etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları analizler neticesinde bindirme uçlarındaki soyulma gerilmelerinin hasar oluşumunda etkin rol oynadığını göstermişlerdir.

(Akpınar, 2014), tek tesirli bindirme bağlantısı, tek basamaklı bindirme bağlantısı ve üç basamaklı bindirme bağlantısı geometrilerinde oluşturduğu yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini çekme yükü altında deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Araştırmacı, tek tesirli bindirme bağlantılarına göre, tek ve üç basamaklı bindirme bağlantılarında, bindirme uçlarındaki gerilme yığılmalarının azaldığını ve bunun sonucunda bağlantı dayanımlarının arttığını göstermiştir.

(Solmaz ve Turgut, 2011), yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada tek tesirli bindirme bağlantılarında bindirme mesafesi ve bindirme uç açısı değişiminin bağlantı dayanımına etkisini araştırmışlardır. Sonuçta, bindirme uzunluğu artışı ve uç açısı artışının bağlantı dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir.

(Çalık, 2016), yaptığı çalışmada tek tesirli bindirme bağlantılarında yapıştırılan malzeme bindirme uçlarındaki şekilsel değişikliklerin, bağlantı mukavemetine etkisini sayısal olarak araştırmıştır. Çalışma neticesinde, yapıştırılan malzemelerde bindirme uçlarındaki şekil değişikliklerinin soyulma ve kayma gerilmelerini azaltarak bağlantı mukavemetini arttırdığını belirtmiştir.

(Pinto ve diğ., 2014), yaptıkları çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarının bindirme bölgesi uç kısımlarındaki malzeme kalınlığının azaltılması neticesinde, soyulma etkisinin azaldığını ve bunun sonucunda bağlantı dayanımının arttığını deneysel ve sayısal olarak belirtmişlerdir.

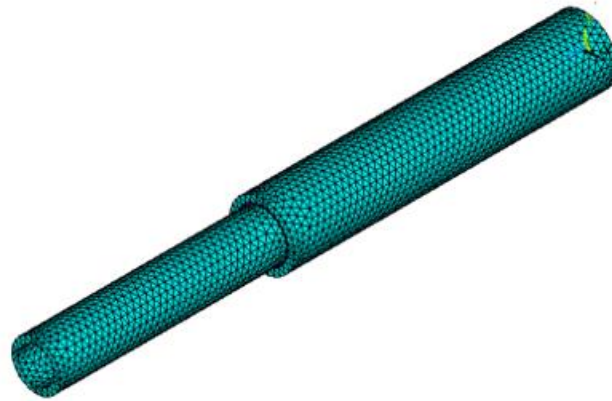
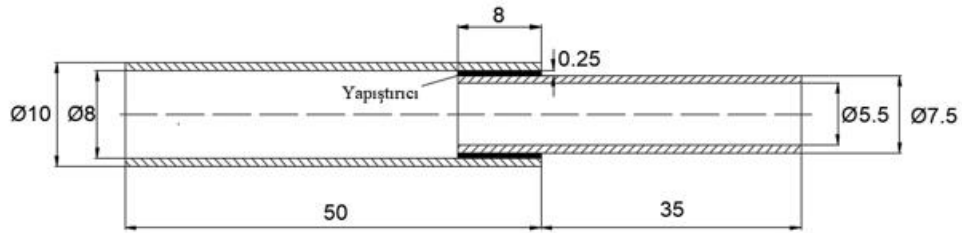
(Çalık ve Yıldırım, 2017), tek tesirli bindirme bağlantılarında, yapıştırılan malzeme uç kısımlarını girintili ve yapıştırıcı hattı uç kısımlarını dışarı doğru kavimli şekilde modelleyerek oluşturdukları bağlantı kombinasyonlarının, yapıştırıcı bölgesi uç kısımlarında oluşan soyulma gerilmelerine etkisini sayısal analizlerle incelemişlerdir. Araştırmacılar, oluşturulan yeni bağlantı kombinasyonlarının soyulma gerilmelerini azaltarak dayanımı arttırdığını belirtmişlerdir.

(Akpınar, 2019), yaptığı deneysel çalışmada, çift kirişli yapıştırma bağlantılarında, kiriş genişliği, kiriş kalınlığı ve yapıştırıcı tabaka kalınlığı faktörlerinin bağlantı performansına etkilerini Mode-I yüklemesi altında incelemiş ve oluşturduğu bağlantı tipleri için kırılma enerjisi çatlak uzunluğu grafiklerini elde etmiştir. Araştırmacı çalışma sonucunda, yapıştırılan malzeme genişliği ve kalınlığının azalmasıyla kırılma enerji değerlerinin azaldığını ve yapıştırıcı kalınlığının kırılma enerjisini önemli derecede etkilediğini belirtmiştir.

Yapılan bu çalışmada, çekme yüküne maruz bırakılmış boru yapıştırma bağlantıları modellenerek, yapıştırılan boruların farklı uç geometrilerinin bağlantı mukavemetine etkisi bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak yapıştırılan boruların uç kısımlarındaki et kalınlığının bağlantı dayanımına etkisi incelenmiştir. Daha sonra, bindirme bölgesindeki boru uçları farklı uzunluklarda modellenmiş ve boru ucu uzunluk değişiminin bağlantı dayanımına etkisi çekme yükü altında lineer gerilme ve hasar analizleri yapılarak araştırılmıştır.

#### MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

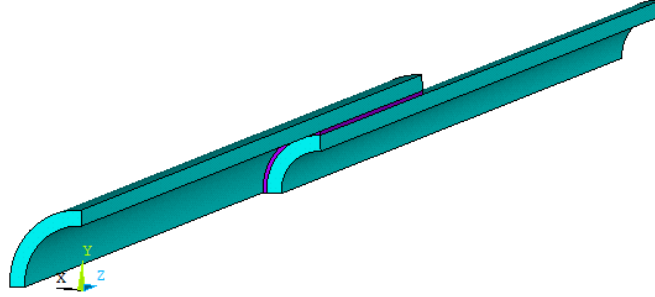
Boru yapıştırma bağlantısı referans modeli, Şekil 1'de gösterilen boyutlara uygun olarak ANSYS sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak oluşturulmuştur. Boru çapları 10 ve 7,5 mm, boru et kalınlıkları 1 mm, boru uzunlukları 50 mm, bindirme bölgesi uzunluğu 15 mm, yapıştırıcı kalınlığı ise 0,25 mm olarak alınmıştır.



Şekil 1. Referans model

Figure 1. Reference model

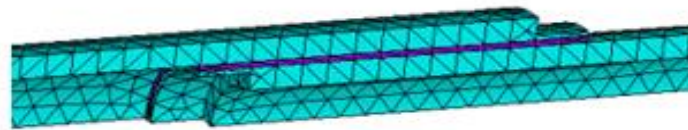
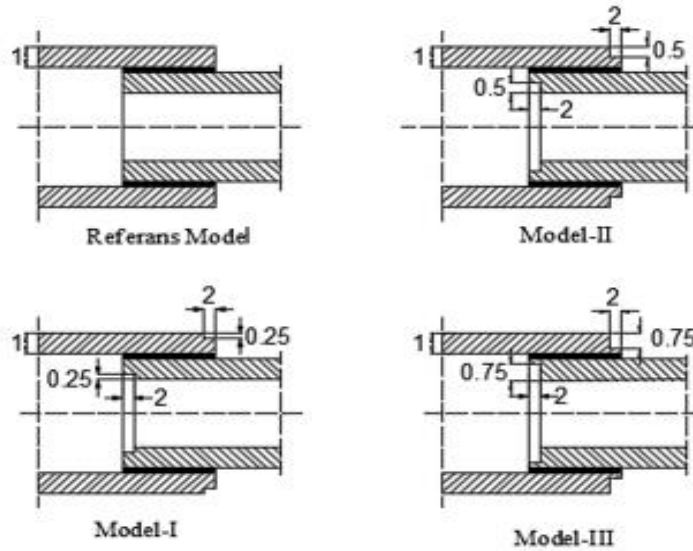
Yapıştırma bağlantı geometrisinin silindirik olmasından dolayı modelin yz ve xz düzlemlerinde simetrik olduğu bilinmektedir (Şekil 2). Bu durum göz önüne alınarak oluşturulan bütün modeller çeyrek model (1/4) olarak tasarlanmıştır. Modellerin çeyrek olarak tasarlanmasıyla eleman sayısının, düğüm noktalarının azaltılması ve bunun sonucunda ise çözümün daha kısa sürede yapılması hedeflenmiştir.



Şekil 2. Çeyrek (1/4) model

Figure 2. Quarter (1/4) model

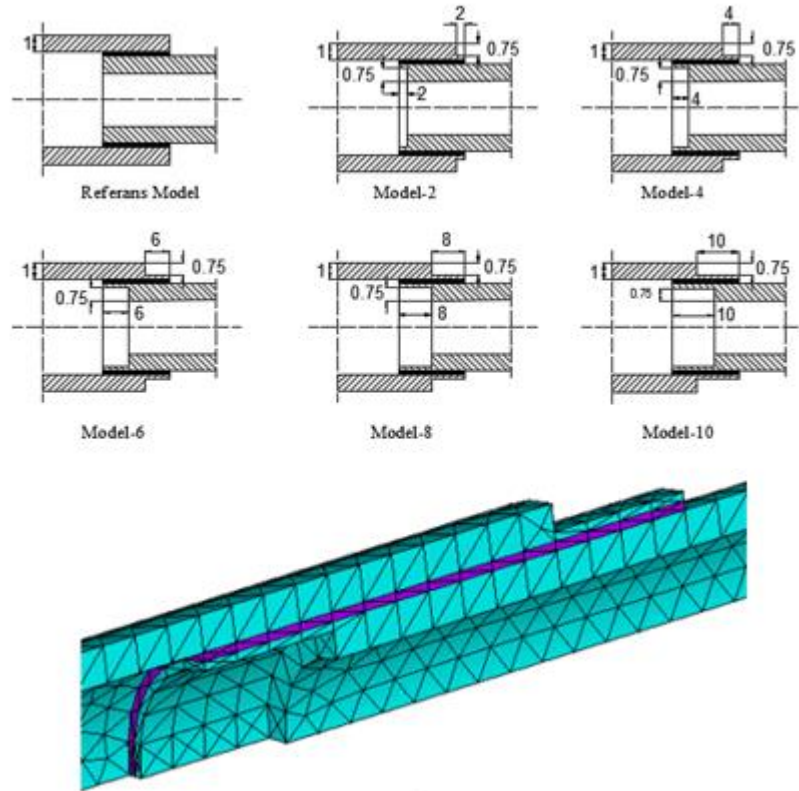
Yapılan bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bindirme bölgelerindeki, boru ucu et kalınlığı, boru eksenine boyunca (z eksenine) 2 mm mesafede azaltılmış ve Şekil 3'te gösterilen modeller oluşturulmuştur. Referans modelde bindirme uçlarında malzeme azaltılması yapılmamıştır. Diğer modellerde, yapıştırılan iki borunun bindirme ucundan itibaren sırasıyla, 0,25, 0,50 ve 0,75 mm derinliklerde malzeme azaltılması yapılarak modeller oluşturulmuştur. Modeller arası kıyaslama yapabilmek amacıyla bindirme uzunlukları ve modellere uygulanan çekme yükleri eşit alınmıştır.



Şekil 3. Boru ucu et kalınlığı değişimine göre oluşturulan modeller

Figure 3. Models created according to pipe end wall thickness change

Çalışmanın ikinci kısmında ise, çalışmanın başlangıç kısmında belirlenen boru ucu et kalınlığı sabit alınarak bindirme bölgesi boyunca boru uçları, boru eksenı boyunca sırasıyla Şekil 4'de görüldüğü gibi farklı boylarda modellenmiştir. Referans modelde bindirme uçlarında malzeme azaltılması yapılmamıştır. Diğer modellerde, yapıştırılan iki borunun bindirme ucundan itibaren sırasıyla, 2, 4, 6, 8 ve 10 mm boylarında malzeme azaltılması yapılarak modeller oluşturulmuştur. Modeller, borulardan azaltılan malzeme uzunluğuna göre isimlendirilmiştir. Örneğin Model-2'de bindirme ucundan itibaren her iki boruda 2 mm'lik mesafede malzeme azaltılmıştır. Ayrıca modeller arası kıyaslama yapabilmek amacıyla bindirme uzunlukları ve modellere uygulanan çekme yükleri eşit alınmıştır.



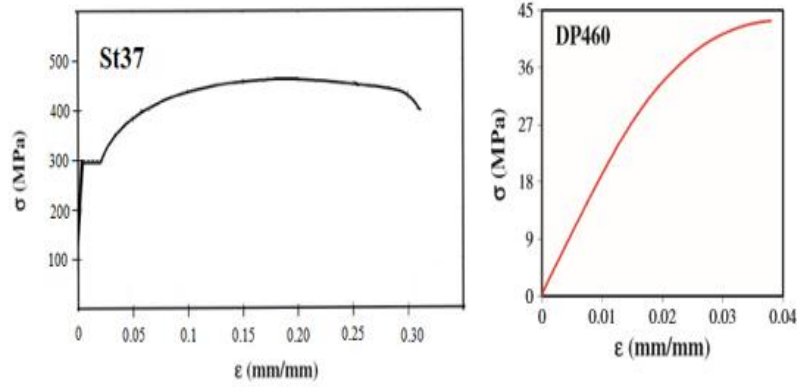
Şekil 4. Boru ucu uzunluk değişimine göre oluşturulan modeller

Figure 4. Models created according to the pipe end length change

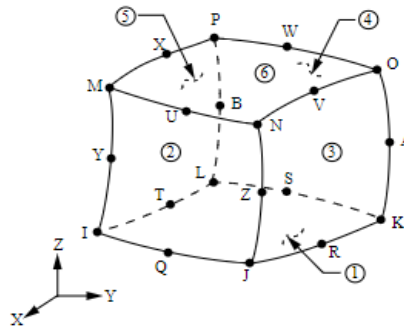
Oluşturulan bütün modellerde yapıştırıcı olarak DP460 epoksi yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme olarak ise St37 genel yapı çeliğı kullanılmıştır. DP460 epoksi yapıştırıcı ve St37 genel yapı çeliğine ait Çizelge 1'de verilen mekanik özellikler programa tanımlanmıştır. Lineer olmayan sonlu elemanlar analizleri, geometrik nonlineerlik ve malzemelerin (DP460 ve St37) tek eksenli çekme testleri sonucu elde edilen ve Şekil 5'te gösterilen nonlineer davranışları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 1.** DP460 ve St37 mekanik özellikleri (Akpınar, 2014; Malag ve Kukielka, 2007)*Table 1. DP460 and St37 mechanical properties*

Özellikler	Malzemeler	
	St37	DP460
Elastisite modülü (MPa)	200000	1984
Poisson oranı	0,3	0,38
Akma dayanımı(MPa)	235	38,4
Çekme dayanımı (MPa)	375	44,6
Tanjant modülü (MPa)	610	500

**Şekil 5.** St 37 ve DP460  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri (Kossakowski ve Wcislik, 2018; Özel ve diğ., 2014)*Figure 5. St 37 and DP460  $\sigma$ - $\epsilon$  curves*

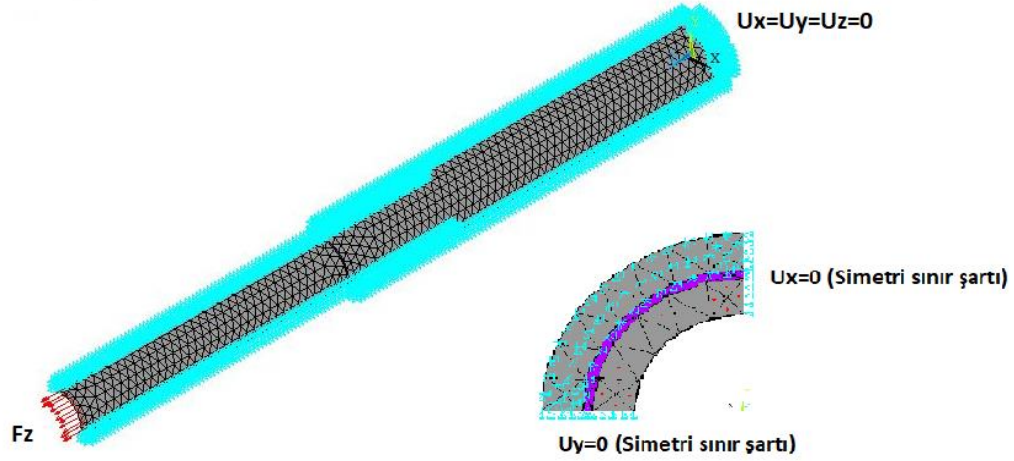
Oluşturulan modelleri elemanlara ayırma işlemi yapılan analizin doğruluğunu etkileyen çok önemli bir aşamadır. Eleman boyutu azaldıkça genellikle şekil değiştirme miktarları artmaktadır. Bundan dolayı şekil değiştirme miktarlarının stabil olduğu eleman boyutunun tespit edilmesi gerekmektedir. Yapılan yakınsama işlemleri sonucunda eleman boyutu bütün modellerde 3 olarak alındı. Sonlu elemanlar modellemesinde, Şekil 6'da gösterilen, 3 serbestlik dereceli ve 20 düğüm noktalı solid 186 elemanı kullanılmıştır.

**Şekil 6.** Solid 186 eleman (<https://ansyshelp.ansys.com13>)*Figure 6. Solid 186 element*

Probleme ait sınır şartları Şekil 7'de gösterildiği gibi programa tanımlanmıştır. Buna göre, çapı büyük olan boru ucu tüm yönlerde sabitlenmiştir. Bütün bağlantı modellerinde çapı küçük olan borunun uç kısmına  $\sigma_z=100$  MPa basınç eksi yönde uygulanarak çekme etkisi oluşturulmuştur. Uygulanan eksi yöndeki basınç değeri uygulama alanıyla çarpılması sonucunda 2041 N değerindeki çekme yükü bulunmuştur. Modelin yz ve xz düzlemlerinde simetrik olmasından



dolayı, bu düzlemlere simetrik sınır şartları, büyük çaplı boru, küçük çaplı boru ve yapıştırıcı tabakasında ayrı ayrı olmak üzere uygulanmıştır.



Şekil 7. Boru yapıştırma bağlantısı sınır şartları  
Figure 7. Pipe bonding joint boundary conditions

Yapıştırma bağlantılarının sayısal hasar yüklerini tespit etmek için Ansys programı içerisinde tanımlı olan hasar kriterleri içerisinde yer alan maksimum gerilme teorisi kullanılmıştır. Bu teoriye göre, oluşan gerilmeler lokal eksenlerde çekme, basma ve kayma gerilmesi bileşenlerine ayrılmaktadır. Bu gerilme bileşenlerinden birisi normal veya kayma mukavemetini aşarsa malzemede hasarın oluştuğu kabul edilmektedir. St37 için çeki ve bası durumları için normal gerilme mukavemet değerleri  $\pm 235$  MPa, kayma gerilmesi mukavemet değeri 117,5 MPa, DP460 epoksi yapıştırıcı için çeki ve bası durumları için normal gerilme mukavemet değerleri  $\pm 38,4$  MPa, kayma gerilmesi mukavemet değeri 24 MPa olarak programa tanımlanmıştır (Aydın ve diğ., 2015).

## SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, Ansys sonlu elemanlar paket programı kullanılarak oluşturulan silindirik yapıştırma bağlantılarına çekme yükü uygulanarak nonlinear gerilme ve hasar analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada, hasar analizleri, yapıştırılan boru malzemelerin bindirme uçları farklı et kalınlıklarında ve uzunluklarında modellenerek kritik bölge olan yapıştırıcı tabakası ve küçük çaplı boru için yapılmıştır. Hasar analizi çalışması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada yapıştırılan boru uçları farklı et kalınlıklarında modellenerek bağlantılara çekme yükü uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar referans modelle karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise birinci aşamada belirlenen boru ucu et kalınlığı sabit alınarak farklı bindirme ucu uzunluklarında modeller oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan modellere çekme yükü uygulanmış ve elde edilen sonuçlar referans modelle karşılaştırılmıştır.

Yapılan hasar analizinde maksimum gerilme hasar kriteri kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen sonlu elemanlar hasar indeksleri ve hasar yükleri Çizelge 2 ve 3'te gösterilmiştir. Hasar indeksi nümerik hasar yüklerini tespit edebilmek için kullanılan basit bir sayıdır. Sonlu elemanlar hasar yükleri, yapıştırma bağlantılarına uygulanan yüklerin hasar indekslerine bölünmesiyle bulunmuştur.

Çizelge 2'de gösterildiği gibi yapıştırıcı tabakasında, referans modele göre Model-I, Model-II ve Model-III'te hasar yükü artmıştır. Yapıştırıcı tabakasındaki mukavemet artışı referans modele göre, Model-I, Model-II ve Model-III'te sırasıyla % 0,5, % 2,8 ve % 15,1 olarak gerçekleşmiştir. Boru malzemesi için, oluşturulan modellerde referans modele göre mukavemet artışı daha küçük

oranlarda gerçekleşmiştir. Bu durumda, Model-III'ün kullanılması tasarım açısından uygun olmaktadır.

Çizelge 3'te gösterilen analiz sonuçlarına göre yapıştırıcı tabakasında sayısal hasar yükü referans modele göre artmıştır. Maksimum hasar yükü artışı Model-6'da % 27,3 oranında gerçekleşmiştir. Model-8 ve Model-10'da ise mukavemet artış oranı azalmıştır. Boru malzemesi için, sayısal hasar yükü, Model-2 ve Model-4'te oldukça düşük oranlarda artarken Model-6, Model-8 ve Model-10'da keskin bir şekilde azalmıştır. Bunun sonucunda en uygun tasarım Model-4 olmaktadır. Model-4'te yapıştırıcı tabakası için hasar yükü % 20,5, boru malzemesi için ise % 2,3 oranlarında artmıştır.

**Çizelge 2.** Et kalınlığı farklı modellerin sonlu elemanlar hasar yükleri

*Table 2. Finite element failure loads of different wall thickness models)*

Modeller	Uygulanan yük(N)	Yapıştırıcı hasar indeksi	Yapıştırıcı sonlu elemanlar hasar yükü (N)
Referans model	2041	0,42099	4848
Model-I	2041	0,41870	4874
Model-II	2041	0,40935	4985
Model-III	2041	0,36548	5584

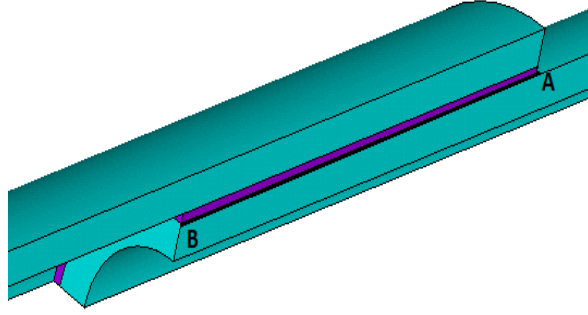
**Çizelge 3.** Bindirme ucu uzunluğu farklı modellerin sonlu elemanlar hasar yükleri

*Table 3. Finite element failure loads of different models of overlap end length*

Modeller	Uygulanan yük(N)	Yapıştırıcı hasar indeksi	Yapıştırıcı sonlu elemanlar hasar yükü (N)	Boru hasar indeksi	Boru sonlu elemanlar hasar yükü (N)
Referans model	2041	0,42099	4848	0,47518	4295
Model-2	2041	0,36548	5584	0,46622	4377
Model-4	2041	0,34924	5844	0,46406	4395
Model-6	2041	0,33059	6173	0,59591	3425
Model-8	2041	0,33107	6164	0,78665	2594
Model-10	2041	0,36684	5563	1,04618	1950

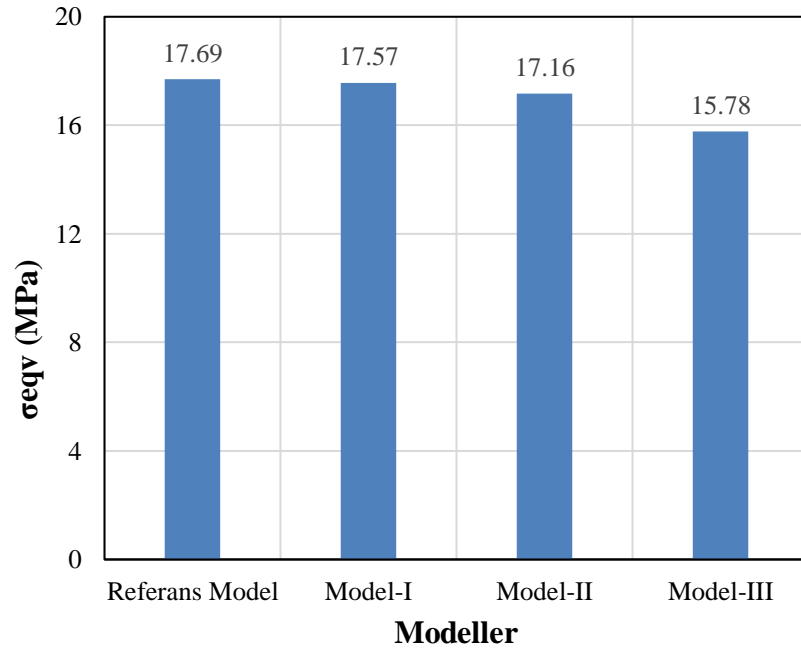
Çalışmanın bundan sonraki kısmında oluşturulan modellerin yapıştırıcı tabakasındaki Şekil 8'de gösterilen hat boyunca oluşan maksimum eşdeğer gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Gerilme dağılımları incelenerek, oluşturulan modellerin referans modele göre hasar yükü artış veya azalma durumları Şekil 9-10'da verilen eş değer gerilme (von-Misses) grafikleri ile irdelenmiştir.





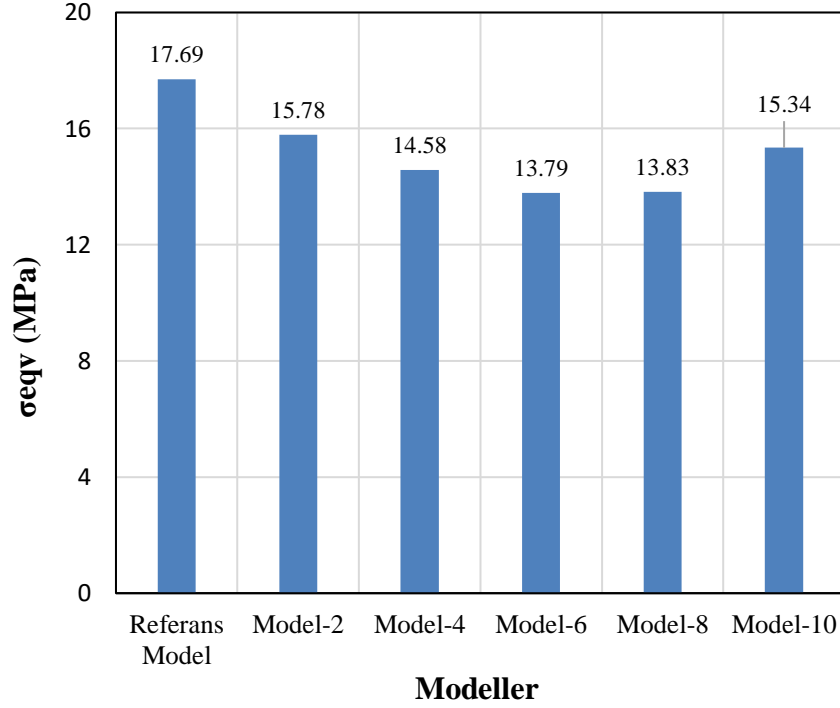
Şekil 8. Yapıştırıcı tabakasındaki A-B hattı

Figure 8. A-B line on the adhesive layer



Şekil 9. Et kalınlığı farklı modellerde A-B hattındaki maksimum eş değeri gerilmeler

Figure 9. Maximum equivalent stresses on the A-B line in different models of wall thickness



**Şekil 10.** Bindirme ucu uzunluğu farklı modellerde A-B hattındaki maksimum eş değer gerilmeler

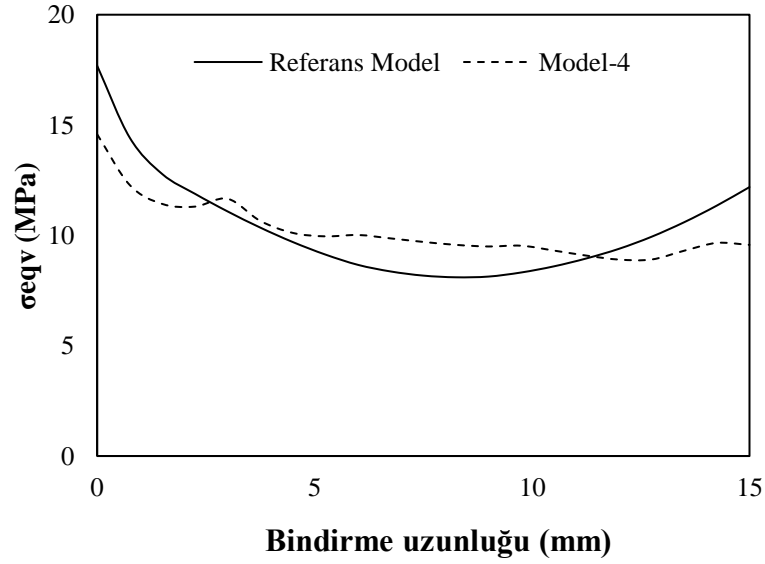
*Figure 10. Maximum equivalent stresses on A-B line in different models of overlap end length*

Şekil 9'da verilen grafik incelendiğinde Model-I, Model-II ve Model-III'te referans modele göre, maksimum eş değer gerilmenin azaldığı görülmektedir. Yapıştırıcı tabakası için Çizelge 2'de verilen modellerde hasar mukavemetlerindeki artışın, bindirme uç bölgelerindeki gerilme yığılmalarındaki azalmanın sonucu olduğu düşünülmektedir.

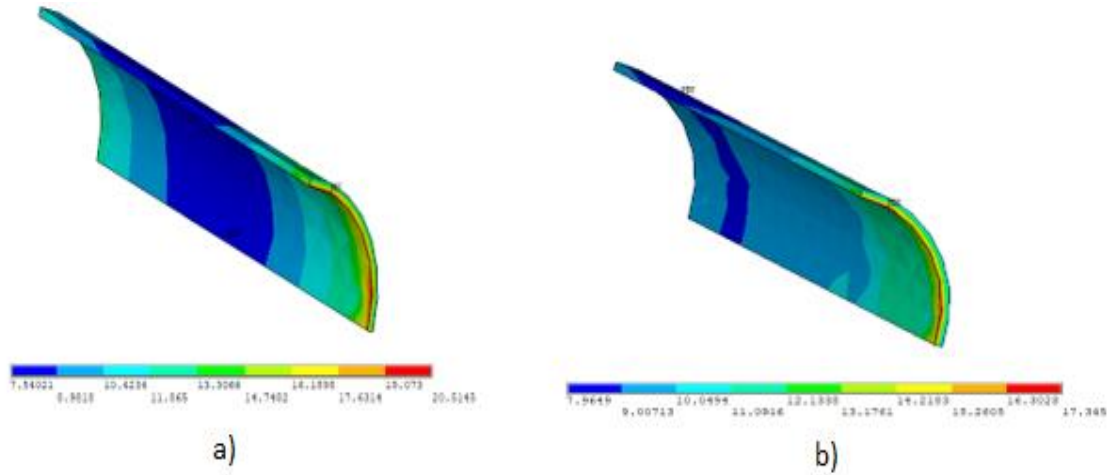
Şekil 10'da verilen grafik incelendiğinde modellerdeki eş değer gerilmeler referans modele göre azalmaktadır. Bu durum yapıştırıcı tabakası için Çizelge 3'te verilen hasar mukavemetlerindeki artışın sebebi olarak düşünülmektedir.

Şekil 11'de Referans Model ve yapılan hasar analizi sonucunda en uygun tasarım olarak önerilen Model-4'e ait bindirme bölgesindeki A-B hattındaki eşdeğer gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 12'de ise Referans Model ve Model-4'e ait yapıştırıcı tabakasındaki çeyrek model için genel eş değer gerilme dağılımları gösterilmiştir.

Şekil 11-12'de görüldüğü gibi maksimum eşdeğer gerilmeler bindirme uçlarında oluşmaktadır. Şekil 11'de görüldüğü gibi Model-4'te bindirme uçlarındaki eşdeğer gerilmeler azalarak, bindirme bölgesinde daha homojen bir gerilme dağılımı elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak hasar mukavemeti artmıştır.



Şekil 11. Yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesi A-B hattındaki eş değer gerilme dağılımı  
Figure 11. Equivalent stress distribution in Adhesive layer overlap zone A-B line



Şekil 12. Yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesi eş değer gerilme dağılımı, a-Referans model, b-Model-4

Figure 12. Adhesive layer overlap zone equivalent stress distribution, a-Reference model, b-Model-4

## SONUÇLAR (RESULTS)

Yapılan çalışmada, boru yapıştırma bağlantılarının farklı uç geometrilerinin, bağlantı dayanımına etkisini incelemek amacıyla nonlinear gerilme ve hasar analizleri bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıda verilen genel sonuçlar bulunmuştur.

Çekme yükü uygulanmış boru yapıştırma bağlantılarında maksimum gerilmeler bindirme bölgesi uç kısımlarında oluşmaktadır.

Boru ucu et kalınlığını azaltmak, bindirme uçlarındaki gerilme yığılmalarını düşürerek bağlantı dayanımının artmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada yapıştırıcı tabakası için Model-III tasarımında %15,1 oranında bir mukavemet artışı hesaplanmıştır.

Yapıştırma bölgesindeki boru uçlarından itibaren, bindirme bölgesi boyunca, boru uçlarını daha düşük et kalınlığında farklı uzunluklarda tasarlamak bağlantı dayanımını etkilemektedir.

Yapıştırıcı tabakası için referans modele göre diğer modellerde mukavemet artışı görülürken, boru malzemesi için Model-2 ve Model-4'te sınırlı da olsa mukavemet artmıştır. Ancak Model-6, Model-8 ve Model-10'da boru malzemesi için mukavemet değerleri keskin bir şekilde azalmıştır.

Bu çalışma şartlarında ideal modelin Model-4 tasarımı olduğu düşünülmektedir. Model-4'te yapıştırma bölgesi için mukavemet artışı %20,5, boru malzemesi için ise %2,3 olarak gerçekleşmiştir.

Boru malzemesi bindirme ucu tasarımında, belirli mesafeden sonra yapıştırılan boru dayanımı dikkate değer biçimde azalmaktadır. Model-6, Model-8 ve Model-10'da boru mukavemeti sırasıyla %20,2, %39,6 ve %54,5 oranlarında azalmıştır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akpınar, S., 2014, "The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers", *Composites Part B*, Cilt 67, Sayı 1, ss. 170-178.
- Akpınar, S., 2019, "The effect of adherend thickness and width on fracture behavior in adhesively bonded double cantilever beam joints", *European Mechanical Science*, Cilt 3, Sayı 3, ss. 83-87.
- Aydın, M.D., Akpınar, S., Özel, A., Erdoğan, S., 2015, "Kayma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarından yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi", *Mühendis ve Makine*, Cilt 56, Sayı 668, ss. 48-55.
- Çalık, A., 2016, "Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively bonded single lap joint", *Engineering Review*, Cilt 36, Sayı 1, ss. 29-34.
- Çalık, A., Yıldırım, S., 2017, "Effect of adherend recessing on bi-adhesively bonded single-lap joints with spew fillet", *Sadhana*, Cilt 42, Sayı 3, ss. 317-325.
- Kossakowski, P.G., Wcislik, W., 2018, "Numerical simulation of material damage for structural steels S235JR and S355J2G3", *Advances in Computational Design*, Cilt 3, Sayı 2, ss. 133-146.
- Malag, L., Kukielka, L., 2007, "Hybrid method to determinate the states of deformation and stress in material during the tensile test", *Proc. Appl. Math. Mech.*, Cilt 7, Sayı 1, ss. 2090025-2090026.
- Özel, A., Yazıcı, B., Akpınar, S., Aydın, M.D., Temiz, Ş., 2014, "A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends", *Composites Part B*, Cilt 62, Sayı 1, ss. 167-174.
- Pinto, A.M.G., Ribeiro, N.F.Q.R., Campilho, R.S.D.G., Mendes, I.R., 2014, "Effect of Adherend Recessing on the Tensile Strength of Single Lap Joints", *The Journal of Adhesion*, Cilt 90, Sayı 8, ss. 649-666.
- Solmaz, M.Y., 2008, *Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Solmaz, M.Y., 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*, Cilt 16, Sayı 1, ss. 159-170.
- Şekercioğlu T., 2018, *Makine Elemanları Hesap Şekillendirme*, Birsen Yayın Evi, İstanbul, Türkiye, 96-97.
- Temiz, Ş., Özel, A., Aydın, M.D., 2005, "The effect of adherend thickness on the failure of adhesively bonded single lap joints", *J Adhes Sci Technol*, Cilt 19, Sayı 8, ss. 705-718.
- <https://ansyshelp.ansys.com>, ziyaret tarihi 17 Ocak, 2020.