

## ÇEKME YÜKÜNE MARUZ ALIN-EĞRİSEL VE DÜZ BİNDİRME BAĞLANTISININ KOHEZİF BÖLGE MODELİ KULLANILARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Şerif ÇİTİL<sup>1</sup>, İsmail BOZKURT<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, 02040, Türkiye  
Geliş tarihi: 04.07.2019 Kabul tarihi: 18.09.2019

### ÖZET

Yapıştırma bağlantıları endüstride kullanılan geleneksel birleştirme tekniklerine iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Düzgün gerilme dağılımı, sızdırmazlık, korozyon, farklı türden parçaları birleştirebilme özellikleri ve daha birçok avantajlarından dolayı yapıştırma bağlantılarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının birçok avantajı olmasına rağmen soyulma gerilmelerine karşı mukavemetleri iyi değildir. Bu yüzden yapıştırma bağlantılarında bağlantı modeli büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, alın eğrisel bindirme bağlantısı ile düz bindirme bağlantısı olmak üzere iki tip bağlantı modeli kullanılmıştır. Bu bağlantı modelleri alüminyum alaşımlı plakalar (A2024-T3) kullanılarak imal edilmiş ve akrilik yapısal yapıştırıcı (DP810) ile birleştirilmiştir. Eğrisel üst üste binme ve düz üst üste binme bağlantıları çekme yüküne maruz bırakılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için üç boyutlu olarak bağlantı modelleri oluşturulmuş ve yapıştırma bağlantısının mukavemetini tahmin etmek için enerji prensiplerini temel alan kohesive bölge modeli kullanılmıştır. Ayrıca nümerik çözümlerin doğrulanması için doğrulama deneyleri yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapıştırıcı, bağlantı modeli, sonlu elemanlar, gerilme analizi

## THE COMPARISON OF THE BUTT -CURVILINEAR AND STEPPED LAP JOINT SUBJECTED TO TENSILE LOAD BY USING THE COHESIVE REGION MODEL

### ABSTRACT

Adhesive joints are a well alternative to traditional joining techniques used in industry. Due to the uniform stress distribution, sealing, corrosion, the ability to bonded different types of parts and many other advantages, the interest in adhesive joints is increasing day by day. Although bonding joints have many advantages, their strength to peel stresses is not good. Therefore, the joint model is very important in adhesive joints. In this study, two types of joint models were used, including the butt-curvilinear lap joint and the stepped lap joint. These joint models were manufactured using aluminum alloy plates (A2024-T3) and bonded with acrylic structural adhesive (DP810). The butt-curvilinear and stepped lap joints were subjected to tensile load and the results compared. Three-dimensional joint models were created for finite element analysis and a cohesive region model based on energy principles was used to estimate the strength of the adhesive connection. In addition, validation tests were performed to verify numerical solutions.

**Keywords:** Adhesive, curved-lap joint, finite elements, pipe, stress analysis

\* e-posta: [ibozkurt@adiyaman.edu.tr](mailto:ibozkurt@adiyaman.edu.tr) ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-2126-3710>  
[scitil@adiyaman.edu.tr](mailto:scitil@adiyaman.edu.tr) ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-3714-3772>

## 1. Giriş

Yapısal yapıştırıcılar birçok avantajlarından dolayı günümüzde hemen hemen her alanda kullanılmaktadır [1]. Yapısal yapıştırıcıların yaygınlığı arttığından dolayı, kullanılacak malzemeye göre yapıştırıcı seçimi ve bağlantı tasarımının yapılmasını ön plana çıkarmaktadır. Buda yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mukavemetlerinin araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Yapıştırma bağlantısında uygun bir yapıştırıcının seçilmesi gerektiği gibi, uygun bir bağlantı tasarımının da yapılması gerekmektedir. Çünkü bağlantı tipi bağlantının mukavemetini etkilemektedir [2]. Aerodinamik yapının önemli olduğu durumlarda özellikle gömülü bağlantı tiplerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Bu durumla ilgili olarak düz, açılı, basamaklı ve alın bindirme bağlantı tipleri ön plana çıkarmaktadır [3]. Yapıştırıcılar özellikle çekmeden ziyade kaymaya karşı dirençlidirler [4]. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirme bağlantılarında kayma gerilmeleri bindirme uzunluğunun uç bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Bağlantı rotasyonlarından dolayı bağlantının uç bölgesinde soyulma gerilmelerinin oluşmasına neden olmaktadır [5]. Bu durumda bağlantının uç bölgesinde gerilme yoğunluğunun azaltılması gereklidir. Bunun için bağlantının özellikle bindirme uzunluğunun uç bölgesinde gerilme yoğunluğunu azaltacak şekilde tasarlanması gerekmektedir [6-8]. Gömülü bağlantı tiplerinde yüzey geometrilerini değiştirerek bağlantının yüzey alanının arttırmak mümkündür. Aynı bindirme uzunluğunda ve genişliğindeki gömülü bir bağlantı modelinin yüzey geometrisini değiştirerek bindirme genişliğini değiştirmekte mümkündür. Bağlantının uç kısımlarında gerilme yoğunluğunun azaltmak için özellikle bindirme genişliğinin artırılması gerekmektedir. Yapılan bağlantının geometrik parametreleri yapıştırıcının uygulandığı yüzey alanını etkilediğinden dolayı bağlantının mukavemetinin önemli ölçüde etkilemektedir [9-12].

Yapıştırma bağlantılarında hasar oluşumunun doğru bir şekilde tahmin etmek için uygun bir analitik analiz gerektirir. Yapıştırma bağlantıları yapılan tasarımların hasar analizleri başlangıçta lineer elastik varsayımlara göre yapılırdı. Bu çözüm modelinde hasar elastik bölgede gerçekleştiği için gevrek malzemeler için uygun bir modeldi fakat yapıştırıcıların çoğu non-lineer bir davranış sergilediklerinden dolayı yapıştırma bağlantıları için yeterli bir çözüm modeli olmamıştır. Daha sonraları elastik-plastik ve plastik deformasyon teorisiyle çözümlemelere gidilmiştir. Bu çözüm modellerinin birincisinde yapıştırıcı tabakası elastik ve plastik bölge olmak üzere iki bölgeye ayrılmıştır. Plastik bölgeler gerilme yoğunluğunun olduğu uç bölgelerinde yer almak üzere elastik ve plastik bölgeler ayrı kabul edilerek çözümlemeler yapılmıştır. İkincisinde ise elastiklik modülü yüke bağlı olarak bir secant modülü olarak yer almıştır. Secant modülü toplam şekil değiştirmeye toplam gerilmeyi ilişkilendirilerek çözümlemeye gidilmiştir. Fakat bu iki çözüm modelinin tam olarak doğrulanamadığından dolayı uygulanamamıştır. Yapıştırma bağlantılarının analizinde bir başka yaklaşım ise modifiye edilmiş von-Mises akma kriteridir. Bu yaklaşımda lineer olmayan altı diferansiyel denklemden oluşan sistem türetilmiş ve değişken adımlı sonlu farklar yöntemi kullanılarak tekrarlı olarak çözümlemeye gidilmiştir [13]. Fakat son yıllarda kohezif bölge modeli yapıştırıcılar için uygun bir model olmuştur. Enerji prensiplerini temel alan kohezif bölge modelinde normal ve kayma gerilmeleriyle bunlara karşılık gelen yer değiştirmeler arasındaki ilişkilerden yararlanılır. Ayrıca kohezif bölge modelinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tepe noktasına kadar elastik davranış sergilediğini ve eğrinin en üst noktasından itibaren hasar başlayarak kopma meydana geldiğinin söylemektedir [14].

Bu çalışmada aynı bindirme uzunluğu ve genişliğindeki alüminyum alaşımlı levhalar üzerine alın eğrisel bindirme bağlantısı ile düz bindirme bağlantısı oluşturulmuş ve daha sonra çekme yüküne maruz bırakılarak nümerik çözümlemeye gidilmiştir. Nümerik Çözümlemelerin doğrulanması için doğrulama deneyleri yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada, alın eğrisel bindirme bağlantılarının oluşturulması için özellikle uzay ve havacılık alanında yaygın olarak kullanılan Alüminyum alaşımlı levhalar (2024-T3) kullanılmıştır. Bağlantı elemanı olarak 3M şirketi tarafından üretilen iki bileşenli akrilik yapısal yapıştırıcı (DP810) kullanılmıştır. Yapıştırıcı ve alüminyum alaşımlı levhanın mekanik özelliklerini belirlenmesi için bulk numuneleri hazırlanmış ve oda sıcaklığında 1 mm/dak bir hızla çekme cihazında çekilerek mekanik verileri elde edilmiştir. Ayrıca yapıştırıcının kayma şekil değiştirme verilerinin elde edilmesi için TAST modeli kullanılmıştır. Alüminyum alaşımlı levhanın ve yapıştırıcının mekanik özellikleri ise Tablo1 ve Tablo 2 de verilmiştir [15].

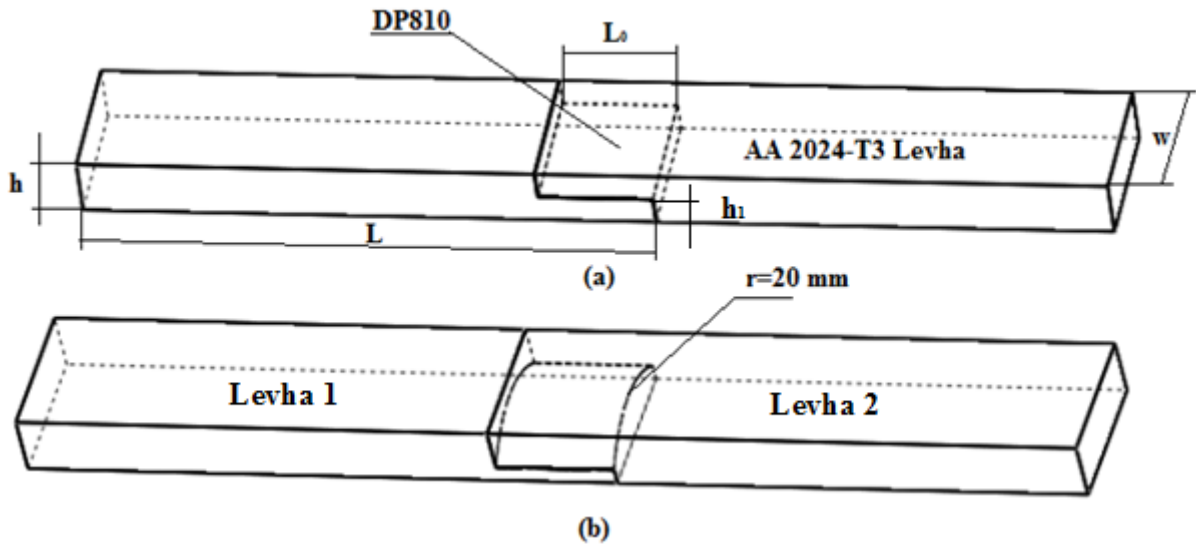
**Tablo 1.** Alüminyum alaşımın (2024-T3) mekanik özellikleri

Elastiklik Modülü, E [MPa]	71875
Poisson Oranı, $\nu$	0.33
Akma Mukavemeti, $\sigma_y$ [MPa]	361.74
Kopma Mukavemeti, $\sigma_f$ [MPa]	481.9
Kopma uzaması, $\epsilon_f$ (%)	0.1587

**Tablo 2.** Yapıştırıcının (DP 810) mekanik özellikleri

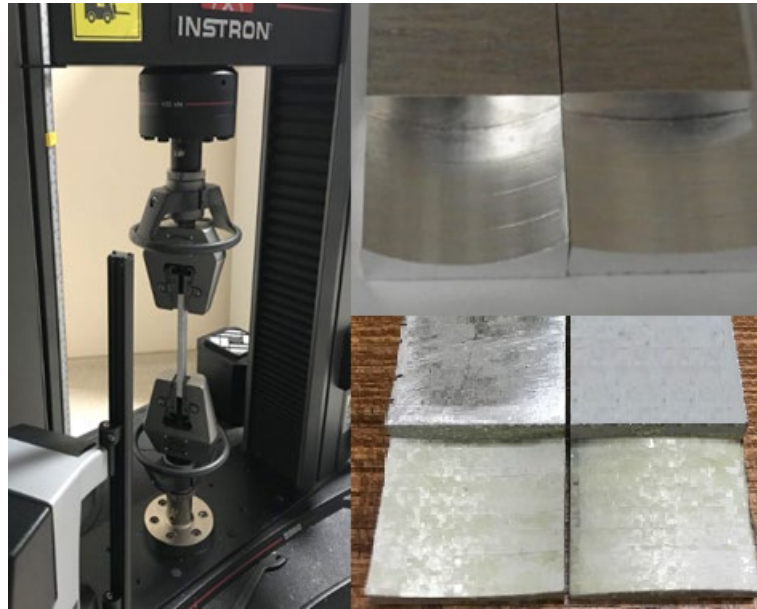
Elastiklik Modülü, E [MPa]	497.76±28.75
Poisson oranı, $\nu$	0.35
Akma Mukavemeti (Normal) , $\sigma_y$ [MPa]	15.38±3.48
Kopma Mukavemeti , $\sigma_f$ [MPa]	20.07±2.61
Kopma uzaması (Normal), $\epsilon_f$ (%)	0.078±0.02
Kayma Modülü, G [MPa]	184.35±28.75
Akma Mukavemeti (Kayma), $\tau_y$ [MPa]	15.28±4.8
Kopma Mukavemeti (Kayma), $\tau_f$ [MPa]	29.73±2.02
Kopma uzaması (Kayma), $\gamma_f$ (%)	0.12±0.008
Tokluk (Normal doğrultuda), $G_n^0$ [N/mm]	0.7
Tokluk (Kayma doğrultusunda), $G_s^0$ [N/mm]	1.9

Çekme yüküne maruz bindirme bağlantılarının sonlu elemanlarla yapılan çözümlerin doğrulanması için L= 100 mm uzunluğunda, h=10 mm kalınlığında, w=25 mm genişliğinde alüminyum levhalar üzerine, alın eğrisel bindirme bağlantısı oluşturmak için  $L_0= 20$  mm bindirme uzunluğunda ve  $r= 20$  mm yarıçapında alın eğrisel bindirme bağlantıları oluşturulmuştur. Ayrıca  $t=0.2$  mm yapıştırıcı kalınlığının elde edilmesi için, levha 1'e  $r_1=19.9$  mm yarıçaplarında eğrisel yüzeyler oluşturulmuş, levha 2'ye ise  $r_2=20.1$  mm'lik yarıçaplarında eğrisel yüzeyler oluşturulmuştur (Şekil 1). Oluşturulan numunelerin levha-yapıştırıcı arasında iyi bir tutunmanın sağlanması için levha yüzeyleri temizlik işlemine tabi tutulmuş ve alüminyum levha üzerine yapıştırıcı uygulanmıştır. Yapıştırıcı uygulanan deney numuneleri bir kalıba konularak oda sıcaklığında bir gün bekletilerek elde edilmiştir.



Şekil 1. Bindirme bağlantılarının geometrik parametreleri (a) Düz Bindirme bağlantısı (b) alın eğrisel bindirme bağlantısı

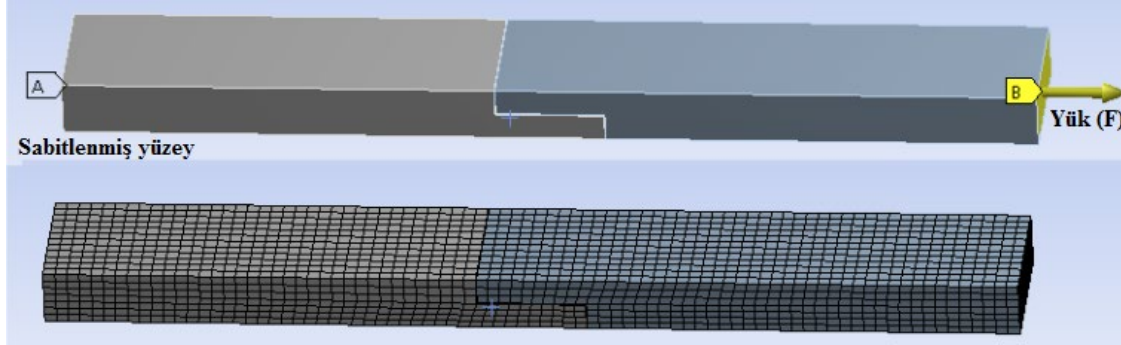
Elde edilen deney numuneleri, 100 kN lük çekme cihazında, 0.5 mm/dak bir hızla, oda sıcaklığında çekme yüküne maruz bırakılmıştır (Şekil 2). Elde edilen hasar yükleri sonuç bölümünde verilmiştir.



Şekil 2. Çekme cihazında deneylerin yapılması

### 3. Nümerik Analiz

Alın eğrisel bindirme bağlantılarının sonlu elemanlar çözümü için Ansys Workbench (Versiyon 15) programında üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve oluşturulan modellere yük ve sınır şartları uygulanarak çözümler yapılmıştır (Şekil 3). Yapılan çalışmanın lineer olmayan malzeme özellikleri Tablo1 ve Tablo 2’den elde edilerek tanımlanmıştır.



Şekil 3. Sınır şartları ve sonlu elemanlar modeli

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi için kohezif bölge modeli olarak üçgen (bilinear) ve üstel (exponential) kuralı kullanılmıştır. CZM kanunlarına göre gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin (Çekme, kayma) en üst noktasına kadar olan bölgede malzeme elastik bölgededir. en üst noktadan sonra ise malzeme plastik bölgeye girdiğini söylemektedir [16]. Kohezif bölge modeli lineer elastik davranış sergileyen ara yüzeydeki kayma ve çekme durumlarına karşılık gelen gerilme ve şekil değiştirme halleri cinsinden ifade edilir. Burada kohezif bölge modelinin üçgen kuralında  $t_n$  ve  $t_s$  eşitlik 1’deki gibi ifade edilir [17].

$$t_{n,s} = K_{n,s} \delta_{n,s} (1 - d_{n,s}) \quad (1)$$

$$d_{n,s} = \begin{cases} 0 & \delta_{n,s}^f \leq \delta_{n,s} \\ \left[ \frac{\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0}{\delta_{n,s}} \right] \left[ \frac{\delta_{n,s}^f}{\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0} \right] & \delta_{n,s} < \delta_{n,s}^f \leq \delta_{n,s}^0 \\ 1 & \delta_{n,s}^f \geq \delta_{n,s}^0 \end{cases} \quad (2)$$

$K_{n,s}$  (çekmede  $K_n$ , kaymada  $K_s$ ) kohesive rijitliğini,  $d_{n,s}$  (çekmede  $d_n$  ve kaymada  $d_s$ ) üçgen (bilinear) cohesive kanunu için hasar parametrelerini (2) ifade eder (burada  $d_{n,s}=0$  ise malzeme elastik bölge olduğunu,  $d_{n,s}=1$  ise malzemenin tamamıyla hasara uğradığını göstermektedir),  $\delta_{n,s}^0$  maksimum cohesive çekme anındaki yer değiştirmeyi,  $\delta_{n,s}^f$  ayrılma tamamlandığı andaki yer değiştirmeyi,  $\delta_{n,s}$  deformasyon boyunca elde edilen maksimum yer değiştirmeyi temsil etmektedir. Kohezif bölge modelinin üstel modelinde [18-19] ise  $t_n$  ve  $t_s$  eşitlik 3 ve 4’deki gibi ifade edilir.

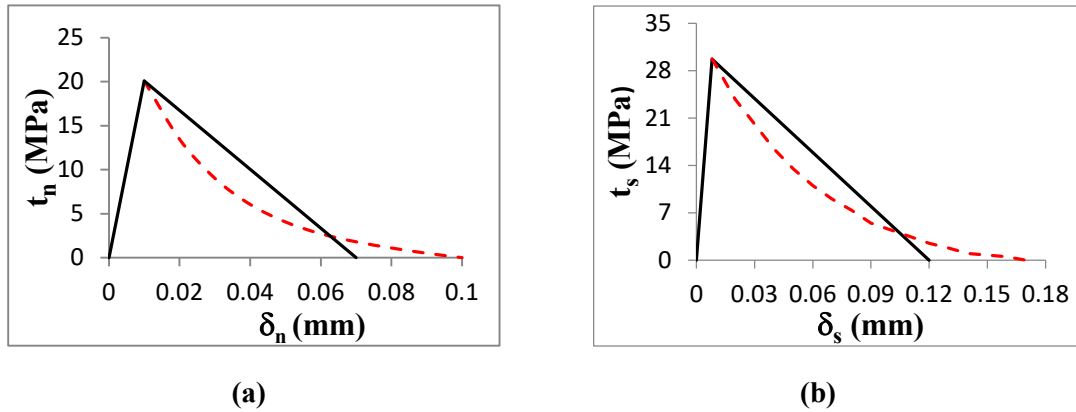
$$t_n = e \sigma^{\max} \Delta_n e^{-\Delta_n} e^{-\Delta_t^2} \quad (3)$$

$$t_s = 2e \sigma^{\max} \frac{\delta_n}{\delta_t} \Delta_t (1 + \Delta_n) e^{-\Delta_n} e^{-\Delta_t^2} \quad (4)$$

Burada  $\sigma^{max}$ , çekmedeki maksimum gerilmeyi ifade etmekte,  $\Delta_n, \Delta_t$ , ise eşitlik (5) ile ifade edilmektedir.

$$\Delta_{n,t} = \frac{\delta_{n,s}}{\delta_{n,s}^0} \quad (5)$$

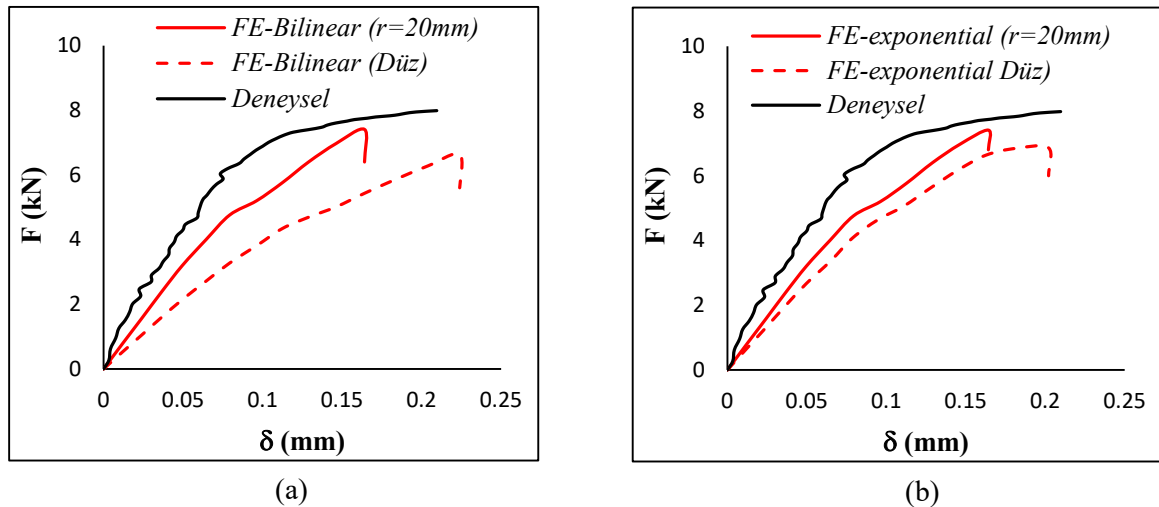
Bu çalışmada nümerik modeller kohezif bölge modeli kanunlarına göre üçgen (bilinear) ve üstel (exponential) kurallarına göre çözümlenmiştir. Kohezif bölge modeli ile yapılacak nümerik analizlerde, Şekil 1 ve Tablo 2 dikkate alınarak  $t_n$  ve  $t_s$  eğrileri elde edilmiştir. (Şekil 4).



Şekil 4. Kohezif bölge kuralına göre DP810'nun (a) Kohezif Normal mukavemet değeri ( $t_n$ ) (b) Kohezif Kayma mukavemet değeri ( $t_s$ )

#### 4. Araştırma Bulguları

Şekil 5 (a), (b)'de kohezif bölge kanunlarına göre nümerik hasar yüklerinin üçgen, üstel ve deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 5. a, b incelendiğinde her iki çözüm yöntemine göre alın eğrisel bindirme bağlantısının düz bindirme bağlantısına göre daha fazla hasar yükü çektiği görülmektedir. Bu durum alın eğrisel bindirme bağlantısının bindirme genişliği eğrisel bir geometrik yapıya sahip olduğundan dolayı bindirme genişliği düz bindirme bağlantısına göre daha uzun olmaktadır.



Şekil 5. Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması

Alın eğrisel bindirme bağlantısının bindirme genişliği yayın uzunluğuna kadar olmaktadır (Şekil 1). Bindirme genişliği arttığından dolayı birim uzunluk başına düşen soyulma gerilmelerinin düşmesine sebep olmuştur. Ayrıca bindirme genişliği arttıkça yapıştırıcının uygulandığı yüzey alan artmasına ve birim alan başına düşen gerilme değerinin düşmesine sebep olmuştur.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada çekme yüküne maruz alüminyum alaşımlı levhalar için yapıştırıcı ile birleştirilmiş alın eğrisel bindirme bağlantısı ile düz bindirme bağlantısının nümerik olarak kohezif bölge modeline göre karşılaştırılması yapılmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre alın eğrisel bindirme bağlantısının bindirme genişliğinin artmasıyla özellikle hasarın başladığı uç bölgelerde birim uzunluk başına düşen soyulma gerilmelerinin azalmasına sebep olduğu görülmüştür. Alın eğrisel bindirme bağlantısının düz bindirme bağlantısına göre daha fazla hasar yükü çektiği tespit edilmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışma; Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi birimi tarafından MÜFMAP/2018-0003 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Barbosa, AQ, da Silva LFM, Abenojar J, Figueiredo M, Ochsner A. Toughness of a brittle epoxy resin reinforced with micro cork particles: Effect of size, amount and surface treatment. *Composites: Part B* 2017; 31: 299–310.
- [2] Lia R, Noda NA, Takaki R, Sano Y, Takase Y, Miyazaki, T. Most suitable evaluation method for adhesive strength to minimize bendeffect in lap joints in terms of the intensity of singular stress field. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2018; 86: 45–58.
- [3] Bendemra H, Compston P, Crothers PJ. Optimisation study of tapered scarf and stepped-lap joints in composite repair patches. *Composite Structures* 2015; 130: 1–8.
- [4] Costa-Mattos HS, Monteiro AH, Sampaio EM. Modelling the strength of bonded butt-joints. *Composites: Part B*; 41: 654–662.
- [5] Moreira RDF, Campilho RDSG. Strength improvement of adhesively-bonded scarf repairs in aluminium structures with external reinforcements. *Engineering Structures* 2015; 101: 99–110.
- [6] Marques EAS, da Silva LFM. Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches. *The Journal of Adhesion* 2008;. 84: 915–934.
- [7] Adams RD, Pepiatt NA. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *Journal of strain analysis* 1974; 9: 185–196.
- [8] Adams RD, Harris JA. The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 1987; 7: 69–80.
- [9] Aydın MD, Özel A, Temiz Ş. The effect of adherend thickness on the failure of adhesively-bonded single-lap joints. *Journal of adhesion science and technology* 2005; 19: 705-718.
- [10] Özel A, Aydın M, Temiz Ş. The effects of overlap length and adherend thickness on the strength of adhesively bonded joints subjected to bending moment. *Journal of adhesion science and technology* 2004; 18: 313-325.
- [11] Özel A, Temiz Ş, Aydın MD. Effect of overlap length on durability of joints bonded with a pressure-sensitive adhesive. *Journal of adhesion science and technology* 2005; 19: 57-71.

- [12] Adams RD, Harris JA. The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 1987; 7: 69-80.
- [13] Stein N, Rosendahl PL, Becker W. Modelling load transfer and mixed-mode fracture of ductile adhesive composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2018; 82: 299–310.
- [14] Campilho RDSG, Banea MD, Neto JABP, da Silva LFM. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2013; 44: 48–56.
- [15] Çitil Ş, Bozkurt İ, Aydın MD. Experimental and 3D non-linear stress analysis of adhesively bonded pipes with curved-surface lap joints. *The Journal of Adhesion* 2019; 95: 515–528.
- [16] Jimenez S, Duddu R. On the parametric sensitivity of cohesive zone models for high cycle fatigue delamination of composites. *International Journal of Solids and Structures* 2016; 82: 111–124.
- [17] Alfano G, Crisfeld MA. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 2001; 50: 1701-1736.
- [18] Xu XP, Needleman A. Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1994; 42: 1397-1434.
- [19] Ansys HTML Documentation, Cohesive Zone Material (CZM) Model –SHARCNet, 2017.