

Sandviç Kompozit ve Metal Plakalar ile Oluşturulan Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik Yaklaşım ile Belirlenmesi

Engin Erbayrak¹

ÖZ

Bu çalışmada, farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri deneysel ve nümerik yaklaşım ile belirlenmiştir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında plaka malzemesi olarak çelik, alüminyum ve alüminyum sandviç kompozit malzeme, yapıştırıcı olarak ise Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Aynı malzemeye sahip plakalar kullanılarak elde edilen yapıştırma bağlantılarının yanı sıra, farklı malzemelere sahip plakalardan oluşan yapıştırma bağlantıları da bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Deneysel yaklaşımda çekme testleri 1 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel yaklaşım sonunda her bir yapıştırma bağlantısının gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri belirlenmiştir. Ayrıca, plaka malzemesi olarak kullanılan alüminyum sandviç kompozit malzeme de yer alan polietilen polimerinin XRD testi ile karakterizasyonu yapılmıştır. Nümerik yaklaşımda, deneysel yaklaşımda kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantı geometrisi Ansys sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Model oluşturulurken yapıştırıcı ile plakalar arasında non-lineer kontak kurulmuş ve deney şartlarını karşılayan sınır şartları uygulanmıştır. Bindirme bağlantılarının non-lineer modellenmesi, doğru sınır koşullarının uygulanması ve doğru temas tipinin seçilmesi nedeniyle nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla benzer bir eğilim gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı, sandviç kompozit plaka, penaltı temas modeli, çekme dayanımı.

Determination of Mechanical Properties of Single Lap Joints Having Sandwich Composite and Metal Adherend by Experimental and Numerical Approach

ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of single lap joints having different adherends were determined by experimental and numerical approaches. Steel, aluminum, and aluminum sandwich composite material were used as adherend, and Araldite 2015 epoxy adhesive was used as adhesive in single lap joints. Alongside the single lap joints obtained by using similar adherends, different adherends were also examined within the scope of this study. In the experimental approach, tensile tests were carried out at a rate of 1 mm/min. At the end of the experimental approach, the stress-strain plots of each single lap joint were determined. In addition, the characterization of the polyethylene polymer, which is also included in the aluminum sandwich composite material used as the adherend, was made in experimental approach by XRD test. In the numerical approach, the single lap joint geometry used in the experimental approach was created in the Ansys finite element program. A non-linear contact was established between the adhesive and the adherend, and boundary conditions were applied that meet the experimental conditions. It was observed that the numerical results show a similar tendency with the experimental results due to the non-linear modeling of the lap joints, the application of the correct boundary conditions, and the selection of the correct contact type.

Keywords: Single lap joints, sandwich composite adherend, penalty contact model, tensile strength

Geliş/Received : 19.05.2021
Kabul/Accepted : 24.06.2021

¹ Bayburt Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bayburt, enginerbayrak@bayburt.edu.tr
ORCID: 0000-0002-0648-8823

EXTENDED ABSTRACT

Introduction/Background

Today, single-lap joints are frequently used in transportation sectors such as automobiles, aircraft, ships, and trains. Lap joints are preferred compared to other connection methods (welding, rivets, etc.) in terms of their advantages such as high strength, low cost, lightness, and less stress accumulation at the connection points.

Objectives/ Research Purpose

In this study, the mechanical properties of single lap joints having different adherends were determined by experimental and numerical approaches. In the experimental approach, tensile tests were carried out and the results were compared with the numerical results. Thus, the verification of the experimental results was carried out.

Methods/ Methodology

In the experimental approach, single lap joints consisted of different adherends and Araldite 2015 epoxy adhesive. Adherends are selected from the structural steel (St37), aluminum, and sandwich aluminum composite, respectively. Single lap joints are produced by combining adherend and adhesive materials in a special mold. Before determining the mechanical properties of the single lap joint, XRD material characterization tests of the aluminum sandwich composite plate were carried out. The mechanical properties of the single lap joints were determined on the MTS universal axial test device at a tensile speed of 1 mm/min. In the numerical approach, firstly, the single lap joint geometry used in the experimental approach was created in the Ansys finite element program. The most important part when creating the model is to determine the correct contact points. Therefore, a non-linear contact was established between the adhesive and the adherend. The pure penalty method was used in the non-linear contact approach. Boundary conditions were applied to the single lap joint model considering the experimental conditions. In the solution approach of the numerical model, the substep number that will determine the iteration steps of the Newton Raphson solution method was determined. The number of sub-steps consists of three parts in the program as initial, minimum, and maximum. At this point, it should be stated that to have equal iteration times used in all steps, all sub-step steps were determined as equal and 60.

Results/ Findings

It is seen that the highest tensile strength value is obtained from the lap joint AC-2015. Also, after evaluating the results, it is understood that the adhesion strength of aluminum plates is higher than other plates. Moreover, it was observed that the numerical results show a similar tendency with the experimental results due to the non-linear modeling of the lap joints, the application of the correct boundary conditions, and the selection of the correct contact type.

Discussion and Conclusions

The mechanical properties of single-lap joints determined by numerical and experimental approaches were compared with each other. The main results are as follows;

1. In single lap joints having dissimilar adherends, the strength values of the lap joints were varied when the adherend on which the tensile load was applied changed.
2. At the end of this study, it was shown that a single lap joint can be formed by using sandwich composite adherend and metal adherends together. It is stated that the lap joints formed by using sandwich composite plates will be suitable especially for the ductile behavior model in which the strain is high and the tensile strength is low.



1. GİRİŞ

Günümüzde tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları otomobil, uçak, gemi ve tren gibi ulaştırma sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapıştırma bağlantıları, diğer bağlantı yöntemlerine göre (kaynak,perçin vb) yüksek dayanım, düşük maliyet, hafiflik ve bağlantı noktalarında gerilme yığılmalarının az olması gibi sağladığı avantajlar bakımından tercih edilmektedir. Literatürde, yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili pek çok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalarda, yapıştırıcı kalınlığının, bindirme mesafe değerinin, plaka kalınlığının ve hibrit yapıştırıcı kullanımının yapıştırma bağlantısının mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir [1-3]. Ayrıca, farklı plakalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmesi de çok yaygın olmamak ile birlikte literatür de mevcuttur [4-6]. Ancak, bu çalışma kapsamında kullanılan plaka malzemeleri ve yapıştırıcı ile oluşturulan bindirme bağlantısına herhangi bir çalışmada rastlanılmamıştır. M. Mariam vd [7] alüminyum alaşımı (AA7075) ve cam elyaf takviyeli epoksi (GRE) kompozitin kullanılmasıyla elde edilen tek bindirme bağlantılarının çekme ve yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, birbiri ile aynı olmayan plakalar kullanılarak oluşturulan hibrit bindirme bağlantılarının en yüksek mukavemet ve sertlik değerlerini gösterdiğini belirtmişlerdir. Myeong-Su Seong vd [8] karbon elyaf takviyeli kompozit laminat ve alüminyum plaka kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin değişimi için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Bindirme bağlantılarında Cytec tarafından üretilen yüksek mukavemetli bir yapıştırıcı olan FM73m, yapıştırıcısını kullandılar. Parametrik çalışma kapsamında, bindirme uzunluğu, yapışma kalınlığı ve malzeme türü gibi çeşitli parametrelerin bindirme bağlantısına etkisini incelediler. Sonuç olarak, bindirme uzunluğunun ve yapıştırma kalınlığının değişmesinin, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısında meydana gelen hasar yüküne etkisi olduğunu rapor etmişlerdir. P. Galvez vd [9] karbon fiber takviyeli polimer (CFRP)-çelik plakalardan meydana getirilen tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının mekanik özelliklerini ve yorulma davranışını incelemişlerdir. Farklı plaka malzemelerinden elde edilen bindirme bağlantısının yüzde 30 daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğunu ve yorulma ömrünün de yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Farklı malzemelere sahip plakalardan oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarına ait çalışmalar için [10-12] referansları incelenebilir. Deneysel çalışmada uygulanan yükleme durumunun teorik yaklaşımı için [13] referansı irdelelenebilir. Kompozit malzemelerin farklı yükleme durumları altındaki davranışları da ilgili literatürde [14-17] mevcuttur.

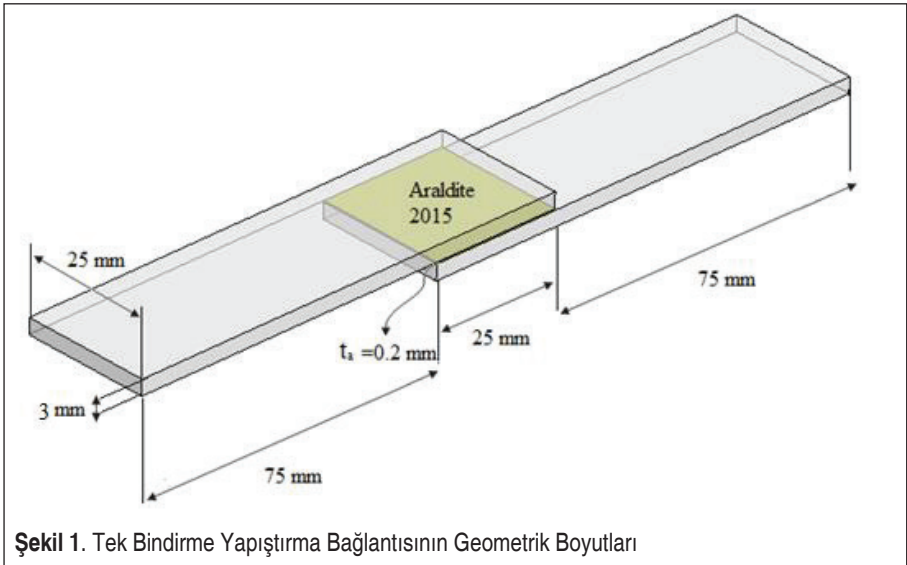
Bu çalışmada, farklı malzemelere sahip plakalardan oluşan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin değişimi deneysel ve nümerik yaklaşım ile incelenmiştir. Ayrıca, plaka malzemesi olarak kullanılan alüminyum sandviç kompozit malzeme de yer alan polietilen polimerinin XRD testi ile karakterizasyonu deneysel

yaklaşım içerisinde yapılmıştır. Nümerik yaklaşımda, deneysel yaklaşımda kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantı geometrisi Ansys sonlu elamanlar programında oluşturulmuştur. Model oluşturulurken yapıştırıcı ile plakalar arasında non-lineer kontak kurulmuş ve deney şartlarını karşılayan sınır şartları uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında farklı plaka malzemesi olarak kullanılan alüminyum sandviç kompozit plakaların sektörde yaygın kullanıldığı bilinmektedir [18-20]. Bununla birlikte, bu çalışma sektörde yaygın olarak kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarından daha önce denenmemiş alüminyum sandviç kompozit plakaların metal plakalar ile birleştirilmesini ve mekanik özelliklerinin belirlenmesini içermektedir. Dolayısıyla, çalışmanın sağladığı bu yenilik literatüre ve ilgili sektörlerle önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

2.MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Materyal

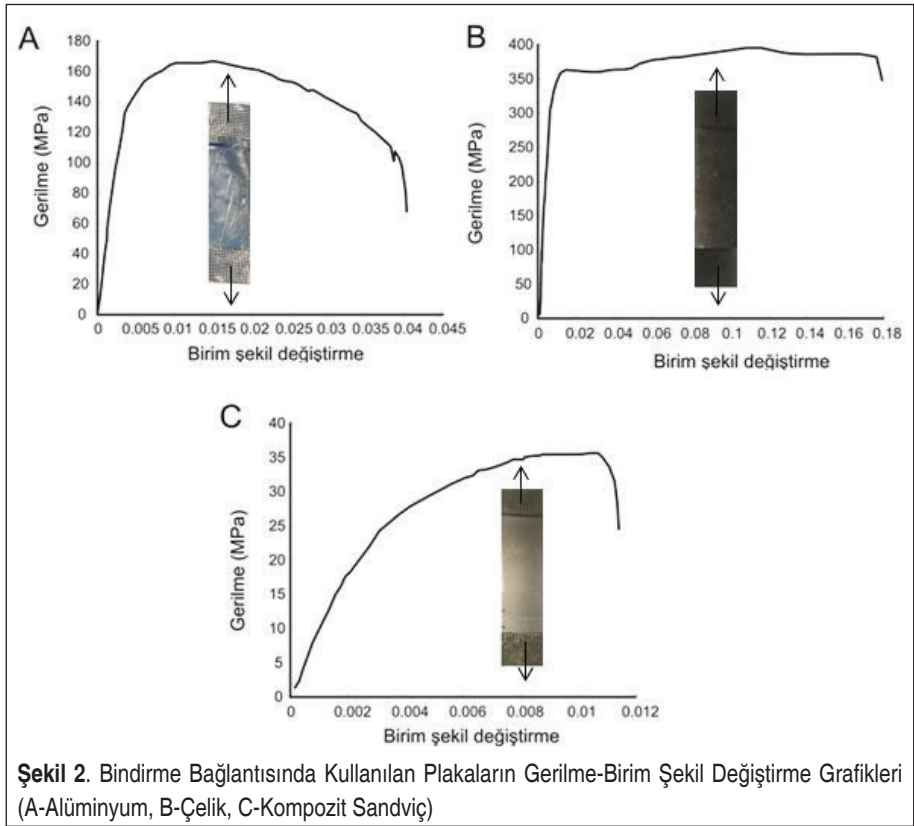
Bu çalışmada, tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, farklı malzemelere sahip plakalar ve Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısından meydana getirilmiştir. Plaka malzemeleri sırasıyla yapısal çelik (St37), alüminyum ve sandviç alüminyum kompozittir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, benzer ve farklı malzemelerden oluşan plakalar ve yapıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Bindirme bağlantıları ASTM D3165 - 07 standartları [21] dikkate alınarak oluşturulmuştur. Tek bindirme yapıştırma bağlantısının geometrik boyutları Şekil 1 de gösterilmektedir.



Şekil 1. Tek Bindirme Yapıştırma Bağlantısının Geometrik Boyutları

2.2 Yöntem

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, plaka ve yapıştırıcı malzemelerin özel bir kalıp içerisinde birleştirilmesi ile üretilmiştir. Kalıp kullanılmasının en önemli sebebi, plakalar arasında kullanılan yapıştırıcının kürleşmesi esnasında, plakaların yanal kaymalarını önlemek içindir. Bununla birlikte, plakalar yapıştırıcı ile kohesif yapışma sağlayabilmesi amacıyla yüzeyleri pürüzlendirilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı ince tel kullanılarak sağlanmıştır. Kalıp içerisinde yer alan bindirme bağlantıları, kullanılan yapıştırıcının oda sıcaklığında kürleşme süresi olan 24 saat bekletilerek, hazırlanmışlardır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik testlerinden önce, bindirme bağlantısını oluşturan sandviç kompozit ve metal plakaların çekme testleri yapılarak, mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çekme testleri tüm plakalar için 1 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testinde kullanılan plakalar ASTM 3039 standardına göre hazırlanmıştır [22]. Testlerde, her bir plakadan 3 numune test edilerek, standart sapma değerleri belirlenmiştir [23]. Testler sonunda her bir plaka için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 2 de gösterilmektedir.



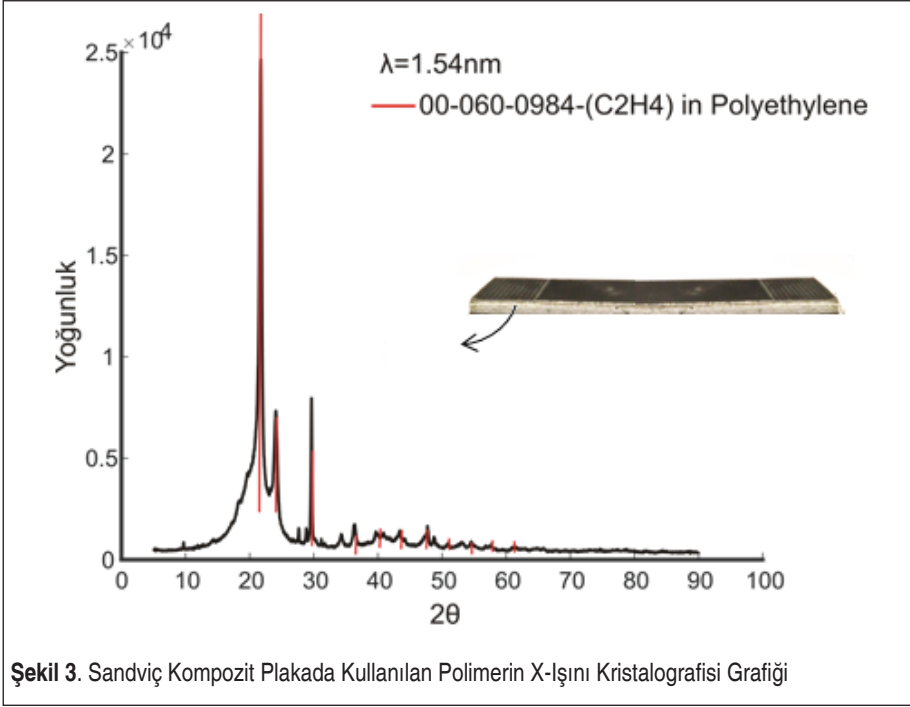
Plakaların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemetinin çelik plakaya, en düşük çekme mukavemet değerinin ise alüminyum sandviç kompozit plakaya ait olduğu görülmektedir. En yüksek birim şekil değişimi de çelik plakadan, en düşük birim şekil değişimi de alüminyum sandviç kompozit plakadan elde edilmiştir. Bu noktada belirtilmelidir ki, plaka ve yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi nümerik analiz sırasında kurulacak model için gereklidir. Bindirme bağlantılarında kullanılan yapıştırıcının mekanik özellikleri yapıştırıcının teknik veri sayfasından ve literatürde yer alan çalışmadan elde edilmiştir [24-25]. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısını oluşturan plaka ve yapıştırıcının mekanik özellikleri Tablo 1 de gösterilmektedir.

Tablo 1. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısını Oluşturan Plaka Ve Yapıştırıcının Mekanik Özellikleri [19-20]

	Araldite 2015	Çelik	Alüminyum	Sandviç kompozit
Akma mukavemeti (MPa)	12.63±0.61	268.58±22.2	124.9±11.25	19.85±1.85
Maksimum çekme mukavemeti (MPa)	21.63±1.61	395.3±28.7	166.8±14.75	35.48±3.54
Kopmada uzama (%)	4.77±0.15	18.15±3.15	4.03±0.88	1.2±0.15
Elastisite modülü (GPa)	1.85±0.21	208.3±7.65	66.12±5.12	9.18±1.25

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının mekanik özellikleri belirlenmesinden önce alüminyum sandviç kompozit plakanın malzeme karakterizasyon testleri yapılmıştır. Sandviç kompozit plaka alt ve üst levhası alüminyum ve ortada polimer malzemedan oluşan bir kompozit yapıdır. Polimer malzemenin hangi polimer yapısına ait olduğunu belirleyebilmek amacıyla XRD (X Işını Kristalografisi) testi yapılmıştır. Kompozit malzeme de kullanılan polimerin türünün doğru belirlenmesi, nümerik analiz sırasında malzeme modelinin doğru oluşturulabilmesi için son derece önemlidir. X-ışını kristalografisi, malzemenin kristalografik yapısını belirlemek için uygulanan bir tekniktir. Bu yöntem de, malzeme üzerine gönderilen X-ışınları ile malzemedan yansıyan X-ışınlarının yoğunluklarını ve saçılma açılarını ölçülerek karakterizasyon işlemi yapılmaktadır [26]. XRD analizi sonunda malzemeye gelen ve yansıyan X ışınlarının yaptığı teta açısı ile belirli bir zirvede gözlemlenen X ışınlarının sayısı olarak nitelendirilen yoğunluk grafiği elde edilmiştir. Yapılan XRD analizinde dalga boyu 1.54nm olarak belirlenmiştir. XRD analiz sonunda elde edilen grafik Şekil 3 de gösterilmektedir.

X ışınlarının gelen ve yansıyan açısı (2θ) ile ışınların toplandığı tepe noktası (Yoğunluk) arasında ki grafik kullanılarak polimerin malzeme grubu belirlenmiştir. Şekil 3 de



görülen ilgili polimerin analiz sonucu, XRD cihazında yer alan malzeme kütüphanesinde taratılarak, uygun malzeme grubu belirlenmiştir. Buna göre, sandviç kompozit plakada kullanılan polimerin XRD davranışı polietilen malzemenin XRD davranışı ile büyük benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

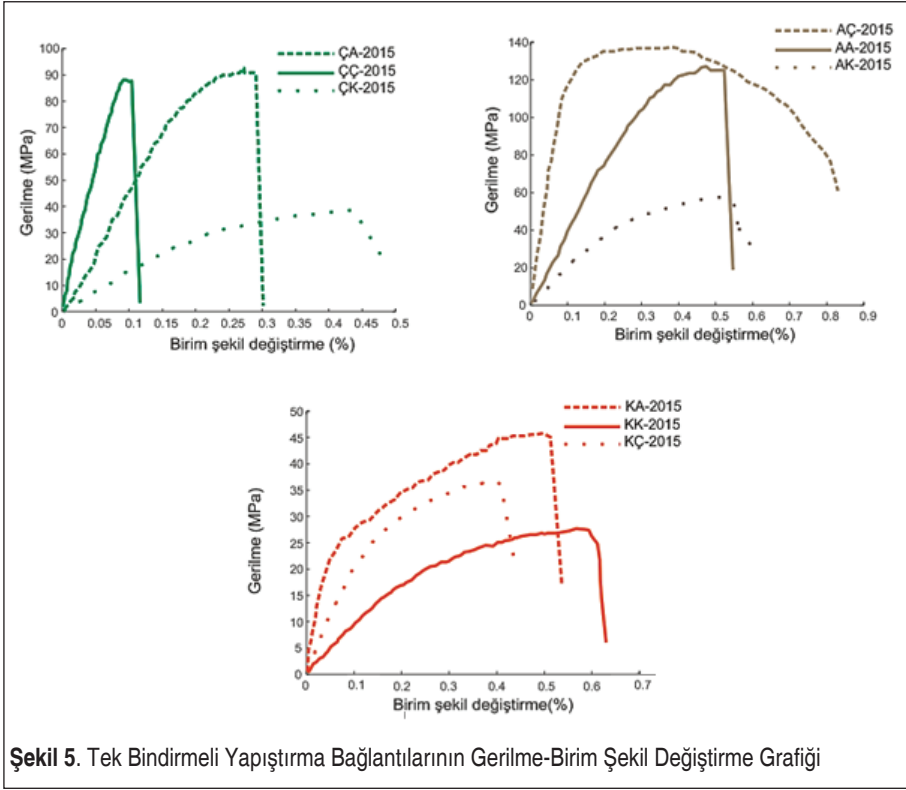
Bindirme bağlantısını oluşturan levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve sandviç kompozit levhada bulunan polimer malzemenin karakterizasyon işlemi tamamlandıktan sonra, tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik testlerine başlanmıştır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri MTS universal aksenal test cihazında, 1 mm/dak çekme hızı altında belirlenmiştir. Mekanik özellikler, test cihazının çekme yükünü uygulamaya başladığı anda cihaz üzerinde bulunan yük hücresi ve gerinim ölçer tarafından alınan dataların, test cihazının ara yüzüne aktarılarak, gerilme- birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulması ile belirlenmektedir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, benzer ve farklı plakalar ile Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısı kullanılarak elde edilmiştir. Toplam 27 adet tek bindirmeli bağlantı seti oluşturulmuştur. Bindirme bağlantıları çekme cihazının çenelerine bağlanarak, yükleme işlemi çekme cihazın ara yüzey programı kullanılarak, uygulanmıştır. Deneysel düzeneğinin görüntüsü Şekil 4 de gösterilmektedir.



Şekil 4. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Çekme Testi Sonunda Elde Edilen Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Grafiği Şekil 5 De Verilmektedir

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının çekme testi sonunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5 de verilmektedir.

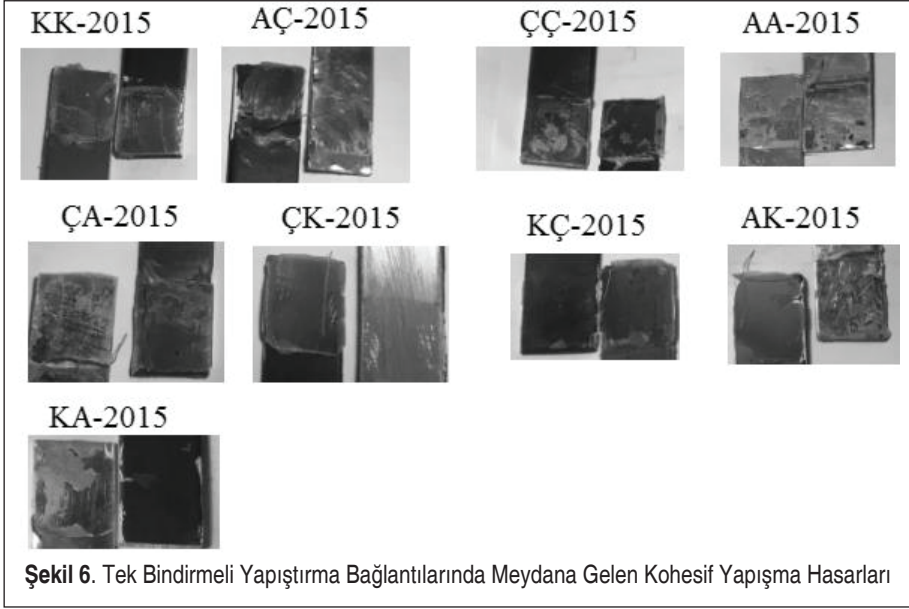
Şekil 5 de görüldüğü gibi, tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında A, Ç ve K harfleri sırasıyla alüminyum levha, çelik levha ve sandviç kompozit levhayı nitelendirmektedir. 2015 sayısı ise kullanılan Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısını belirtmektedir. Tüm setlerdeki ilk harfin, çekme yükünün uygulandığı levhayı gösterdiği belirtilmelidir. Bununla birlikte, çekme testleri oda sıcaklığında ve yaklaşık yüzde 45-50 nem seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Çekme test sonuçları irdelendiğinde, en yüksek çekme mukavemet değerinin alüminyum ve çelik levhalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısından (AÇ-2015) elde edildiği görülmektedir. En düşük çekme mukavemet değeri kompozit sandviç plakalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısından (KK-2015) elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek birim şekil değiştirme değerinin AÇ-2015 bindirme bağlantısından elde edildiği görülmektedir. En düşük birim şekil değiştirme değeri ise ÇÇ-2015 bindirme bağlantısından elde edilmiştir. Ayrıca, farklı malzemelere sahip plakalar kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında çekme yükünün uygulandığı plaka değişince bindirme bağlantısının mukavemet değerlerinde de değişimler gözlemlenmiştir. Örneğin, ÇA-2015 tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının çekme mukavemet değeri AÇ-2015 bindirmeli yapıştırma bağlantısının çek-



Şekil 5. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Gerilme-Birim Şekil Değişirme Grafiği

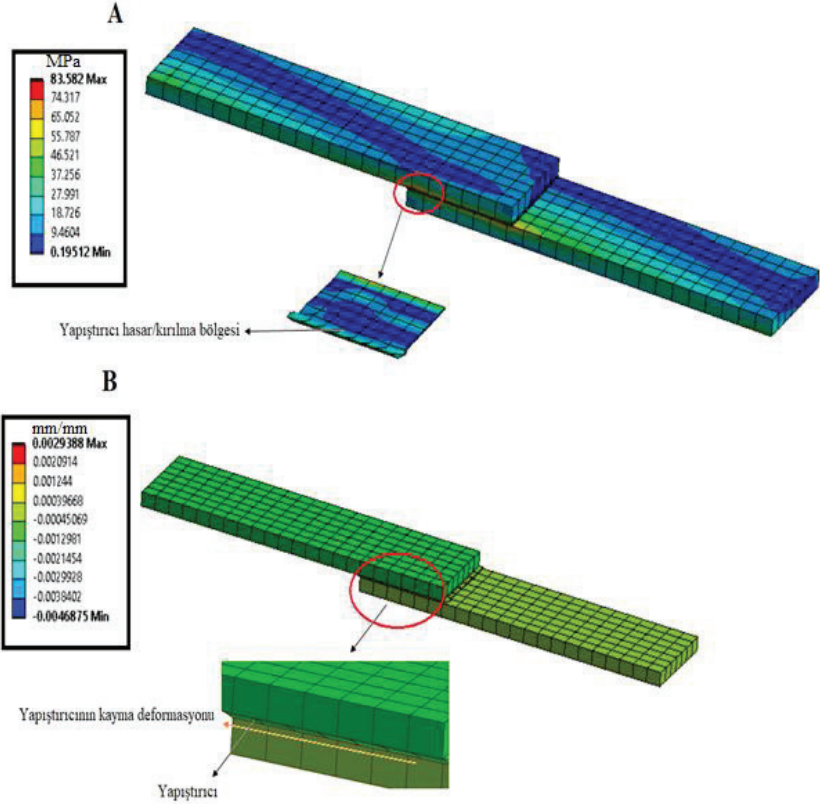
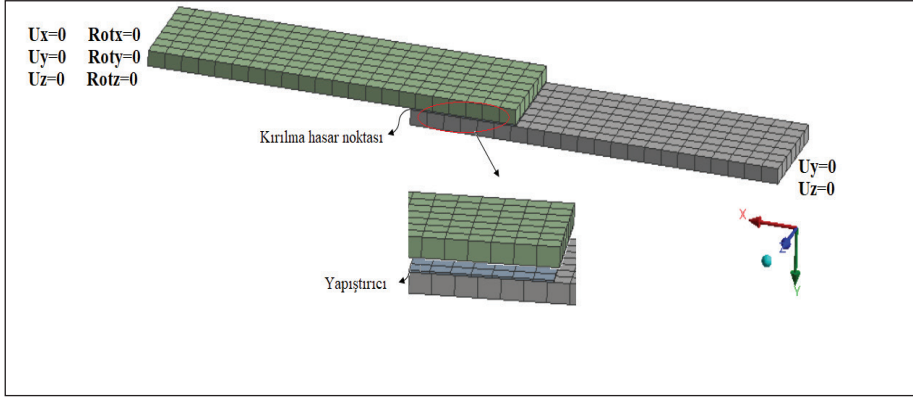
me mukavemet değerinden yaklaşık yüzde 44 daha az elde edilmiştir. Benzer durum AK-2015 bindirme bağlantısı için de geçerlidir. KA-2015 tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının çekme mukavemet değeri AK-2015 bindirmeli yapıştırma bağlantısının çekme mukavemet değerinden yaklaşık yüzde 35 daha az elde edilmiştir. Son olarak, ÇK-2015 ile KÇ-2015 bindirme bağlantılarının çekme mukavemet değerleri birbirine yakınsak gelmiştir. Bu sonuçlardan sonra alüminyum plakaların adhezyon kuvvetinin diğer plakalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Çekme yükünden sonra yapıştırıcıda meydana gelen hasarın incelenmesi önemlidir. Genellikle yüklemeye koşullarına bağlı olarak plaka yüzeylerin de kohesif ve adhesif yapışma hasarları görülür. Kohesif yapışma hasarların da yapıştırıcı, yüklemmeden sonra birbirlerinden ayrılan her iki plaka yüzeyin de bulunur. Bu durum, uygulanan yükün doğrudan yapıştırıcıya iletildiği şeklinde yorumlanmaktadır [27]. Ancak adhesif yapışma hasarında, uygulanan yük yapıştırıcıya tam olarak iletilmediği için yapıştırıcı sadece bir plaka yüzeyin de görülür. Bu çalışmada, çekme testi sırasında tüm tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının da kohesif yapışma hasarı meydana gelmiştir. Yapıştırıcılar üzerindeki kohezif yapışma hasarları, Şekil 6'da gösterilmektedir.



3. NÜMERİK YAKLAŞIM

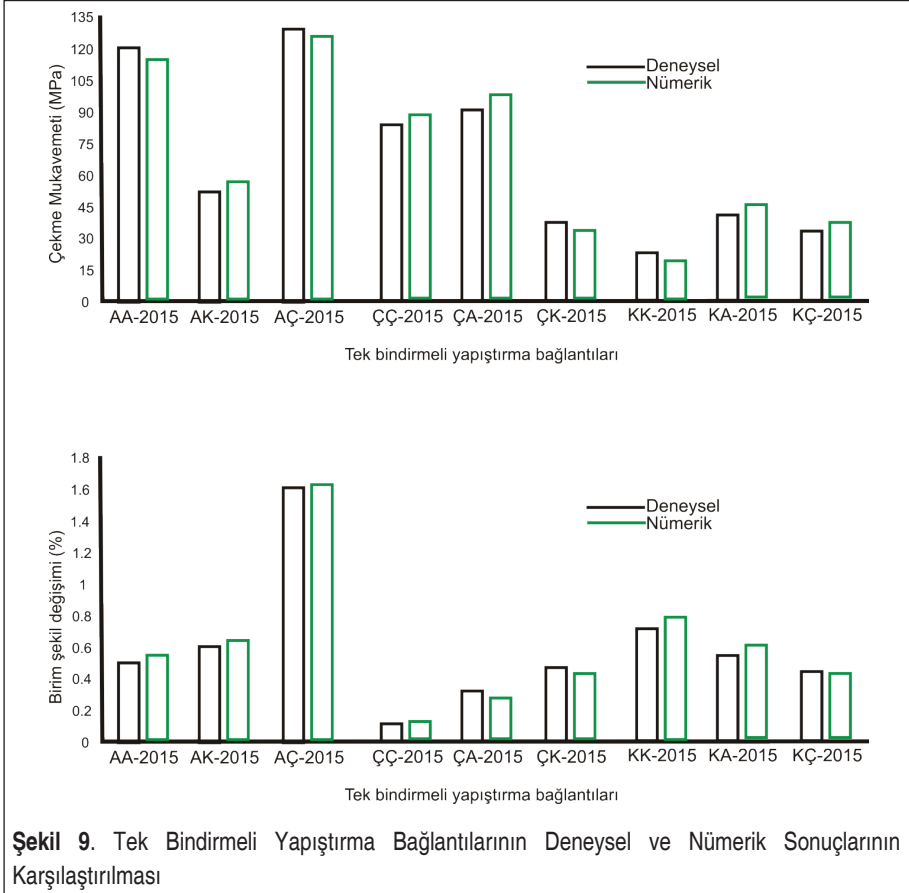
Nümerik yaklaşımda, ilk olarak, deneysel yaklaşımda kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantı geometrisi Ansys sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Model oluşturulurken en önemli kısım doğru temas (kontakt) noktalarını belirlemektir. Bu kapsamda, yapıştırıcı ile plakalar arasında non-lineer kontakt kurulmuştur. Non-lineer kontakt yaklaşımında penaltı yöntemi (pure penalty method) kullanılmıştır. Bu yöntemin diğer non-lineer kontakt yöntemlerine göre en büyük avantajı varyasyonel formülasyondan kaynaklanan kısıtlamaları açıkça ortadan kaldırmasıdır [28]. Dolayısıyla, kontakt bölgesinde ki plastik deformasyonlar rahatlıkla belirlenebilmektedir. Kontakt durumu belirlendikten sonra modelin sonlu elemanlar ağına bölünmesi (mesh) işlemine geçilmiştir. Mesh duyarlılığı ve eleman kalite değeri göz önünde bulundularak, model 1 mm eleman boyutunda, düzgün dörtgenel mesh (mapped mesh) ile sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Modelin sınır şartlarını belirlemeden önce, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının plakaları ve yapıştırıcısının malzeme davranışları programın malzeme kütüphanesine tanıtılmıştır. Plakaların çekme testleri sonunda ki mekanik davranışları deneysel yaklaşım içerisinde belirlendiğinden, elde edilen bu davranışlar programa tanıtılmıştır. Yapıştırıcının mekanik davranışı ise yazarın daha önceden yaptığı çalışmada mevcuttur [29]. Ayrıca sandviç kompozit plakaların mekanik davranışı yanında alüminyum plaka ve polietilen ara tabaka yapısı da programa tanıtılmıştır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantı modeline, deneysel koşullar göz önünde bulundurularak, bir ucundan ankastre, diğer ucundan Y,Z yönünde hareketini



Şekil 8. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısının Nümerik Analiz Sonuçları (A-Eş değer gerilme dağılımı, B-Toplam deformasyon)

kapatacak sınır şartı uygulanmıştır. Bindirme bağlantısının serbest bırakılan X yönüne ise çekme testi sırasında elde edilen deplasman değeri girilmiştir. Bindirme bağlantısının nümerik modeli, meydana gelecek hasar noktaları ve sınır şartlarının gösterimi Şekil 7'de gösterilmektedir.

Nümerik modelin çözüm yaklaşımında, nonlineer çözüm parametreleri olan büyük deformasyonlar (Large deflection) ve Newton Raphson çözüm yönteminin iterasyon adımlarını belirleyecek alt adım sayısı (substep) belirlenmiştir. Alt adım sayısı program içerisinde başlangıç, minimum ve maksimum olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Bu noktada belirtilmelidir ki, tüm adımlarda kullanılan iterasyon zamanlarının eşit olması için tüm alt adım sayıları eşit ve 60 olarak belirlenmiştir. Çözüm başlandıktan sonra, tek bindirme bağlantısı üzerinde meydana gelen eş değer gerilme ve eş değer birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Eş değer gerilme seçilmesi, bindirme bağlantısı üzerine uygulanan çekme yüküne bağlı olarak hem normal geril-



Şekil 9. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması



me hem de kayma gerilmesinin oluşmasıdır [30]. Tek bindirme yapıştırma bağlantı yapısının, nümerik analiz sonunda ortaya çıkan gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri ile deforme olan yapısı Şekil 8 de gösterilmektedir.

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantı setlerinden ÇA-2015' e ait nümerik model sonucu şekil 8de görülmektedir. Eş değer gerilme dağılımında açıkça görülmektedir ki, yapıştırıcı beklenildiği gibi hasar bölgesinden plastik deformasyona uğramıştır. Bu durum doğru kontak çeşidi ile çalışıldığına bir göstergesidir. Ayrıca, birim şekil değiştirme sonucunda, çekme yüküne maruz yapıştırıcıda meydana gelen kayma deformasyonu da açıkça gözlemlenebilmektedir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının nümerik analiz sonucunda elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri deneysel sonuçlar ile kıyaslanarak, şekil 9 da verilmiştir.

Şekil 9 da, çekme yüküne maruz tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının hem deneysel hem de nümerik yaklaşım sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, sayısal yaklaşımda yapıştırıcıların non-lineer modeli kullanılarak modellenmesi, doğru sınır koşullarının uygulanması ve doğru temas tipi seçimi sonuçların yakınsamasında önemli bir rol oynamıştır. Öte yandan, uygun deney koşullarının sağlanması, test cihazının kalibrasyonu ve birden fazla numunenin test edilmesi de sonuçların deneysel yaklaşım açısından yakınsamasını sağlamıştır. Deneysel ve nümerik yaklaşım irdelendiğinde en yüksek çekme mukavemeti her iki yaklaşım için de AÇ-2015 bindirme bağlantısından elde edilmiştir. Benzer şekilde, en yüksek birim şekil değişimi de yine AÇ-2015 bindirme bağlantısından elde edilmiştir. Böylelikle, nümerik yaklaşım sonuçları, deneysel yaklaşım sonuçlarını doğrulamıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri deneysel ve nümerik yaklaşım ile belirlenmiştir. Deneysel yaklaşım, bindirme bağlantılarının çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Nümerik yaklaşım da ise, yapıştırıcı ile plakalar arasında non-lineer kontak kurulmuş, deneysel koşullar ile birebir benzer sınır şartları uygulanmıştır. Nümerik ve deneysel yaklaşımlarla belirlenen tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekaniksel özellikleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Ana sonuçlar şu şekildedir;

1. Deneysel yaklaşımda, en yüksek çekme mukavemet değerinin alüminyum ve çelik levhalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısından (AÇ-2015) elde edilmiştir. En düşük çekme mukavemet değeri kompozit sandviç plakalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısından (KK-2015) elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek birim şekil değiştirme değerinin AÇ-2015 bindirme bağlantısından belirlenmiştir.
2. Farklı malzemelere sahip plakalar kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştır-

ma bağlantılarında çekme yükünün uygulandığı plaka değişince bindirme bağlantısının mukavemet değerlerinde de değişimler gözlemlenmiştir.

3. Benzer ve farklı plaka malzemelerinden oluşan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının çekme test sonuçlarına göre, alüminyum plakaların adhezyon kuvvetinin diğer plakalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.
4. Nümerik analiz sonuçları irdelendiğinde, tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının hem deneysel hem de nümerik sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, sayısal yaklaşımda yapıştırıcıların non-lineer modeli kullanılarak modellenmesi, doğru sınır koşullarının uygulanması ve doğru temas tipi seçimi sonuçlarının yakınsamasında önemli bir rol oynamıştır.
5. Bu çalışma , sektörde yaygın olarak kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarından daha önce denenmemiş alüminyum sandviç kompozit plakaların metal plakalar ile birleştirilmesini ve mekanik özelliklerinin belirlenmesini içermektedir. Dolayısıyla, çalışmanın sağladığı bu yenilik literatüre ve ilgili sektörlerle önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, özellikle birim şekil değişiminin yüksek, çekme mukavemetinin düşük olduğu sünek davranış modeli için sandviç kompozit plakalar kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantılarının uygun olacağı belirtilmektedir.

KAYNAKÇA

1. **Akhavan-Safar, A., Ayatollahi, M.R., da Silva, L.F.M.**2017. “Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with different bondline thicknesses: A critical longitudinal strain approach”, *International Journal of Solids and Structures*, 109,189-198.
2. **Özel, A., Aydın M.D., Temiz, Ş.** 2004. “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*,18,313-325.
3. **Kadioğlu, F., Avil, E., Ercan, M.E., Aydoğan, T.** 2018. “Effects of different overlap lengths and composite adherend thicknesses on the performance of adhesively-bonded joints under tensile and bending loadings”, *Materials Science and Engineering*,369,1-8.
4. **Hasheminiaa,S.M., Parka, B.C., Chuna,H.J., Parkb,J.C., Changb, H.S.** 2019. “Failure mechanism of bonded joints with similar and dissimilar material”, *Composites Part B*, 161,702-709.
5. **Rudawska, A.,** 2019. “Comparison of the adhesive joints’ strength of the similar and dissimilar systems of metal alloy/polymer composite”, *Applied Adhesion Science*, 7,1-17.
6. **Butt, J., Mebrahtu, H., Shirvani,H.** 2016. “Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper foil/ 1050 aluminium composites made with composite metal foil manufacturing”, *Journal of Materials Processing Technology*,16,1-38.
7. **Mariama, M., Afendia,M., Abdul Majida, M.S., Ridzuana,M.J.M., Gibson A.G.** 2018. “Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy/glass fibre



- reinforced composites fabricated with different joining methods”, *Composite Structures*,18,1-31.
8. **Su Seong,M., Kim,T.H., Nguyen,K.H., Kweon,J.H., Choi J.H.** 2008. “A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum”, *Composite Structures*,86,135-145.
 9. **Galvez ,P., Quesada, A., Martinez , M.A., Abenojar,J., Boada,M.J.L., Diaz, V.** 2017. “Study of the behaviour of adhesive joints of steel with CFRP for its application in bus structures”, *Composites Part B*,129,41-46.
 10. **Pramanik,A., Basak,A.K., Dong, Y., Sarker,P.K., Uddin, M.S., Littlefair,G., Dixit,A.R., Chattopadhyaya, S.** 2017. “Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys-A review”, *Composites: Part A*,17.
 11. **Anyfantis,K.N., Tsouvalis, N.G.** “Experimental parametric study of single-lap adhesive joints between dissimilar materials”, *ECCM15 - 15th european conference on composite materials*,24-28 Haziran 2012, Venedik,İtalya.
 12. **Budhe,S., Ghumatkar,A., Birajdar N., Banea M.D.** 2015. “Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength”, *Applied Adhesion Science*,3,1-10.
 13. **Khusnutdinov, N.** 2021.”Self-action in gravity”, *The European Physical Journal Plus*, 136, 1-16, <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01640-4>
 14. **Safaei, B.** 2020.” The effect of embedding a porous core on the free vibration behavior of laminated composite plates.” *Steel and Composite Structures*, 35(5), 659–670. <https://doi.org/10.12989/SCS.2020.35.5.659>
 15. **Dastjerdi, R.M., Behdinin, K.,Safaei, B., Qinc, Z.** 2020. “Static performance of agglomerated CNT-reinforced porous plates bonded with piezoceramic faces”, *International Journal of Mechanical Sciences*,188,105966.
 16. **Dastjerdi, R.M., Behdinin, K.,Safaei, B., Qinc, Z.** 2020. “Buckling behavior of porous CNT-reinforced plates integrated between active piezoelectric layers”, *Engineering Structures*,222, 111141
 17. **Safaei, B, Dastjerdi, R.M., Qin, Z., Behdinin, K.,Chu, F.** 2019. “Determination of thermoelastic stress wave propagation in nanocomposite sandwich plates reinforced by clusters of carbon nanotubes”, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, <https://doi.org/10.1177/1099636219848282>.
 18. **A. Aliminyum kompozit.** “Alüminyum Kompozit Panel”, <https://www.alpil.com.tr/urunler/aluminyum-kompozit-panel/>, 10.05.2021.
 19. **Y.Metal.** “Kompozit Panel”, <https://www.yavuzaluminum.com/kompozit-panel-nedir/>, 15.05.2021.
 20. **S. Aliminyum.** “Alüminyum Kompozit Panel”, <https://www.sisteval.com/tr/uretim/aluminyum-kompozit-panel>, 05.05.2021.
 21. **ASTM D3165 – 07.** “Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear

- by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies” <https://www.astm.org/Standards/D3165.htm>, 01.01.2014.
22. ASTM 3039. “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, <https://www.astm.org/Standards/D3039>, 01.01.2017.
 23. **Newbold, P., Carlson, W.L., Thorne, B.M.** 1994. “Statistics for business and economics”, ISBN: 0132745658, Prentice Hall, New Jersey.
 24. Araldite 2015 adhesive. “Hunstman advanced materials”,https://krayden.com/technical-data-sheet/hunts_araldite_2015_tds/, 01.01.2015.
 25. **Carvalho,U.T.F., Campilho, R.D.S.G.** 2017. “Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints”, International Journal of Adhesion and Adhesives,77,41-50.
 26. **J, Epp.** 2016. “Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods”, Bölüm: “X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization”, ISBN: 978-0-08-100040-3, Woodhead Publishing, İngiltere.
 27. **Wei, K., Chen, Y., Li, M., Yang, X.** 2018. “Strength and failure mechanism of composite-steel adhesive bond single lap joints” Advance Material Science and Engineering, <https://doi.org/10.1155/2018/5810180>.
 28. **Laursen, T.A.** 2013.“Computational contact and impact mechanics: fundamentals of modeling interfacial phenomena in nonlinear finite element analysis”, ISBN: 978-3-662-04864-1, Springer Science & Business Media, İsviçre.
 29. **Özer, H., Erbayrak, E.** 2018. “The effects of curing temperature on fracture energy and cohesive parameters for the adhesive Araldite 2015”, Journal of Adhesion Science and Technology, 32,12, 1287-1312.
 30. **Zhou, D., Di, M.** 2019. “Numerical simulation analyses of Single Lap joints for wood PE composites formed with Epoxy and Acrylic ester adhesives”,14,5908-5922.