

ALÜMİNYUM OKSİT VE TİTANYUM DİOKSİT PARTİKÜL TAKVİYELİ YAPIŞTIRICILARLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Salih AKPINAR*

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

Geliş / Received: 25.04.2016

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 13.06.2016

Kabul / Accepted: 13.06.2016

ÖZ

Havacılık alanında kullanılan yapısal yapıştırıcılar içerisine partikül katılarak elde edilen kompozit yapıştırıcılar, nano teknolojiye meydana gelen son gelişmelerle birlikte yapıştırma bağlantılarının tasarımına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Bu çalışmada; farklı özelliklerdeki yapısal yapıştırıcılar içerisine alüminyum oksit ve titanyum dioksit katılarak elde edilen tek tesirli bindirme bağlantılarının mekanik özellikleri çeki yükü altında deneysel olarak incelenmiştir. DP460, DP270, Araldite2015 ve AV138 yapıştırıcı olarak, ağırlıkça % 1 ve % 2 oranında alüminyum oksit (Al_2O_3) ve titanyum dioksit (TiO_2) katkı maddesi olarak, AA2024-T3 alüminyum alaşımı ise yapıştırılan malzeme olarak kullanılmış ve tek tesirli bindirme bağlantı numuneleri üretilmiştir. Deneylelerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde; partikül katkılı yapıştırıcıların kullanılmasıyla elde edilen bağlantılarda çeki hasar yükünün arttığı görülmüştür. Ayrıca bağlantıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, partikül katkılı yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların yer değiştirme kapasitelerinin de arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanoyapı, kompozit yapıştırıcı, tek tesirli bağlantı, çekme testi, mekanik özellikler

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM OXIDE AND TITANIUM DIOXIDE PARTICLE REINFORCED ADHESIVELY BONDED JOINTS

ABSTRACT

The composite adhesives which are produced by adding particles into the structural adhesives used in aviation area as well as the latest developments in nanotechnology have given a new perspective to the design of adhesively bonded joints. This study examined the mechanical aspects of adhesively-bonded single lap joints produced by adding aluminium oxide and titanium dioxide into adhesives with different characteristics in an experimental manner under tensile load. DP460, DP270, Araldite2015 and AV138 were used as the adhesives; aluminium oxide (Al_2O_3) and titanium dioxide (TiO_2) were used as additive materials at 1% or 2% by weight, and AA2024-T3 aluminium alloy was used as the adhered material. Under these conditions, adhesively-bonded single-lap joints were produced. The results of the experiment showed that tensile failure load was increased in the bonded joints with particle-reinforced adhesive. In addition, the study examined the force-displacement curves and found that the joints with nanoparticle-added adhesive had an increased displacement capacity.

Keywords: Nanostructure, composite adhesive, single lap joint, tensile test, mechanical properties

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: 444 53 88; e-mail/e-posta: salih.akpinar@erzurum.edu.tr

*ALÜMİNYUM OKSİT VE TİTANYUM DİOKSİT PARTİKÜL TAKVİYELİ YAPIŞTIRICILARLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ***1. GİRİŞ**

Endüstride yapısal yapıştırıcıların kullanılması yeni olmakla birlikte, meydana gelen gelişmeler sonucunda gün geçtikçe artarak havacılık, otomotiv, uzay sanayileri gibi alanlarda perçin, kaynak gibi geleneksel birleştirme yöntemlerinin yerini almaktadır. Yapıştırma bağlantıları; diğer geleneksel bağlantı şekillerinde olduğu gibi ergime sonucu kristal yapıda değişikliğe sebep olmaması, gerilme yığılmaları oluşturmaması, ergime sıcaklıkları altında birleşme işleminin gerçekleşmesi ve ayrıca daha düzgün ve temiz yüzeyler elde edilebilmesi açısından diğer bağlantı türlerine göre avantajlar sağlamaktadır [1-3].

Fakat yapıştırma bağlantılarının dayanımının işletme şartlarına bağımlı olması ve soyulma gerilmelerine dayanıksız olması nedeniyle özel birleştirme yöntemleri gerektirmektedir. Literatür incelendiğinde soyulma gerilmelerinin etkisinin azaltılmasında artık gerilme, kademeli bağlantı modeli, ikili yapıştırıcı kullanımı gibi birçok yöntemin olduğu görülmektedir [4-11].

Temiz ve ark. [8] tarafından yapılan bir çalışmada; bağlantının serbest uçlarında oluşan soyulma gerilmelerini azaltmak için bası artık gerilmeleri kullanarak tek tesirli bindirme bağlantısı incelenmiştir. Bindirme bölgesinde bası artık gerilmesi oluşturularak soyulma gerilmelerinin etkisi azaltılmış ve bağlantının yük taşıma kapasitesinde önemli artış sağlanmıştır.

Üç farklı malzeme kullanarak (alüminyum, sertleştirilmiş çelik ve karbon/epoksi kompozit) birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısı üzerine Reis ve ark. [11]'nin yaptıkları çalışmada; kayma gerilmesinin malzemenin rijitliğine bağlı olduğu ve en yüksek kayma gerilmesi en yüksek rijitlikteki malzemelerin birleştirildiği bağlantıdan elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca rijitliğin artması bağlantının mukavemetini artırmış, bağlantının serbest uçlarında meydana gelen dönmeyi azaltmış ve yapıştırıcıda daha düzgün bir gerilme dağılımı oluşmasını sağlamıştır [11].

Nanoteknoloji alanında son yıllarda meydana gelen gelişmeler birçok alanda olduğu gibi yapısal yapıştırıcıların kullanımında da kendine yer bularak, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılara yeni bir boyut kazandırmıştır. Nanopartikül ilavesiyle elde edilen kompozit yapıştırıcıların kullanılmasıyla, yapıştırma bağlantılarının mukavemetini etkileyen faktörler incelenmiş, bağlantıların dayanımının arttığı tespit edilmiştir [12-21].

Tutunchi ve ark. [22] tarafından yapılan bir çalışmada; akrilik yapıştırıcı içerisine titanyum dioksit nanopartikülleri eklenerek çelik-epoksi kompozitlerle birleştirilmiş bağlantıların dayanımı incelenmiştir. Yapıştırıcı içerisine titanyum dioksit (TiO_2) eklenmesiyle elde edilen bağlantılarda, bağlantının kayma ve çekme mukavemetinde artma olduğu görülmüştür. En iyi sonucun yapıştırıcı içerisine ağırlıkça % 3'e kadar nanopartikül eklenmesiyle sağlandığını, bu değerden sonra bağlantının mukavemetinde azalma olduğunu ifade etmişlerdir.

Gilbert ve ark. [23] tarafından yapılan bir çalışmada ise; film yapıştırıcılar içerisine nano alümina katılarak kompozit ve alüminyum bağlantılar elde edilmiştir. Yapıştırıcı içerisine alümina eklenmesiyle yapıştırıcının soyulma ve kayma mukavemetinin arttığı saptanmıştır.

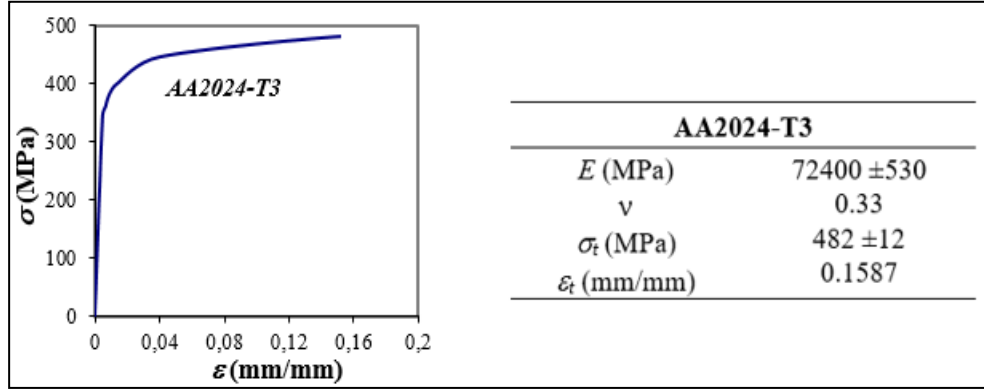
Sunulan çalışmada; farklı özelliklerdeki yapısal yapıştırıcılar içerisine alüminyum oksit (Al_2O_3) ve titanyum dioksit katılarak elde edilen tek tesirli bindirme bağlantılarının mekanik özellikleri çeki yükü altında deneysel olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT**2.1 Materyal**

Çalışmada, yapıştırıcı olarak 3M firması (St. Paul, MN, USA) tarafından üretilen çift bileşenli epoksi yapıştırıcı olan DP460 ve DP270, Huntsman (Basel, İsviçre) firması tarafından üretilen çift bileşenli Araldite2015 ve AV138 kullanılmıştır. Yapıştırılan malzeme olarak ise, hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımından dolayı havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla tercih edilen AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemesi (Şekil 1) kullanılmıştır [24].

Yapıştırıcı içerisine eklenecek olan nanopartikül olarak ise; Sigma Aldrich firmasından temin edilen 21 nm çapında titanyum dioksit (TiO_2) ve 50 nm çapında olan alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanılmıştır.

S. AKPINAR



Şekil 1. AA2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri

2.2. Deneysel Çalışma

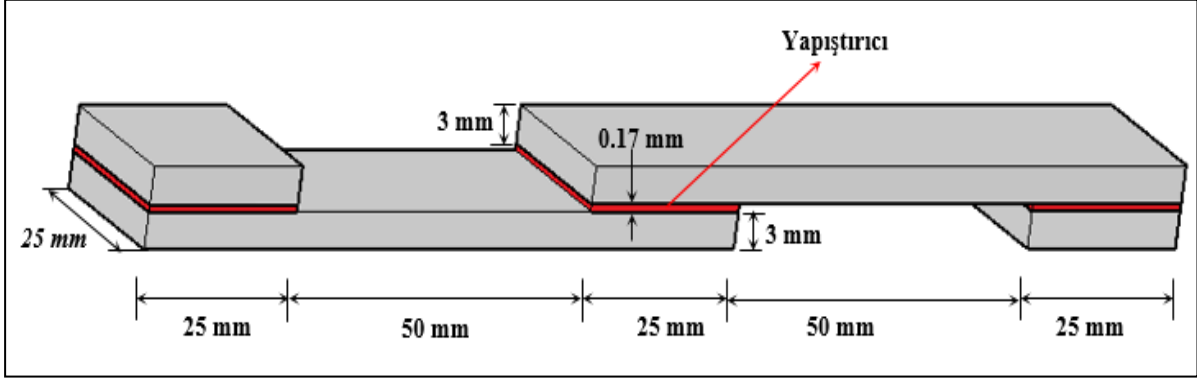
Çalışmada, çeki yüklerine maruz tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler ve bağlantı geometrisi Tablo 1 ve Şekil 2’de verilmiştir. Tek tesirli bağlantı tipleri nanoyapı katkı türüne ve oranına bağlı olarak dört ana gruba ayrılmıştır.

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler

TİP	Yapıştırıcı	Katkı Türü	Katkı Oranı (%)
Tip I	DP460	Katkısız	-
Tip-I a-1	DP460	TiO ₂	1
Tip -I b-1	DP460	Al ₂ O ₃	1
Tip -I a-2	DP460	TiO ₂	2
Tip -I b-2	DP460	Al ₂ O ₃	2
Tip II	DP270	Katkısız	-
Tip-II a-1	DP270	TiO ₂	1
Tip -II b-1	DP270	Al ₂ O ₃	1
Tip -II a-2	DP270	TiO ₂	2
Tip -II b-2	DP270	Al ₂ O ₃	2
Tip III	Araldite2015	Katkısız	-
Tip-III a-1	Araldite2015	TiO ₂	1
Tip -III b-1	Araldite2015	Al ₂ O ₃	1
Tip -III a-2	Araldite2015	TiO ₂	2
Tip -III b-2	Araldite2015	Al ₂ O ₃	2
Tip IV	AV138	Katkısız	-
Tip-IV a-1	AV138	TiO ₂	1
Tip -IV b-1	AV138	Al ₂ O ₃	1
Tip -IV a-2	AV138	TiO ₂	2
Tip -IV b-2	AV138	Al ₂ O ₃	2

Çalışmada kullanılmak üzere verilen ölçülere uygun olarak kesilen alüminyum alaşımının yapıştırma işleminden önce yüzey hazırlama metotları uygulamak gerekmektedir. Bu amaçla; deney numunelerinin üzerindeki yağ, kir ve toz gibi atıkların temizlenmesi için, numuneler asetonla yıkanmış ve parçalardan aseton tamamıyla buharlaşmaya kadar bekletilmiştir. AA2024-T3 alüminyum numuneleri sıcaklığı 65°C olan kromik asit çözeltisi içerisine daldırılıp 20 dakika bekletilmiştir. Asit kalıntılarının oluşumunu engellemek amacıyla bol su ile yıkanmıştır. Tüm numune parçaları 60°C sıcaklıktaki bir fırın içerisinde 30 dakika kurutularak yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır [24].

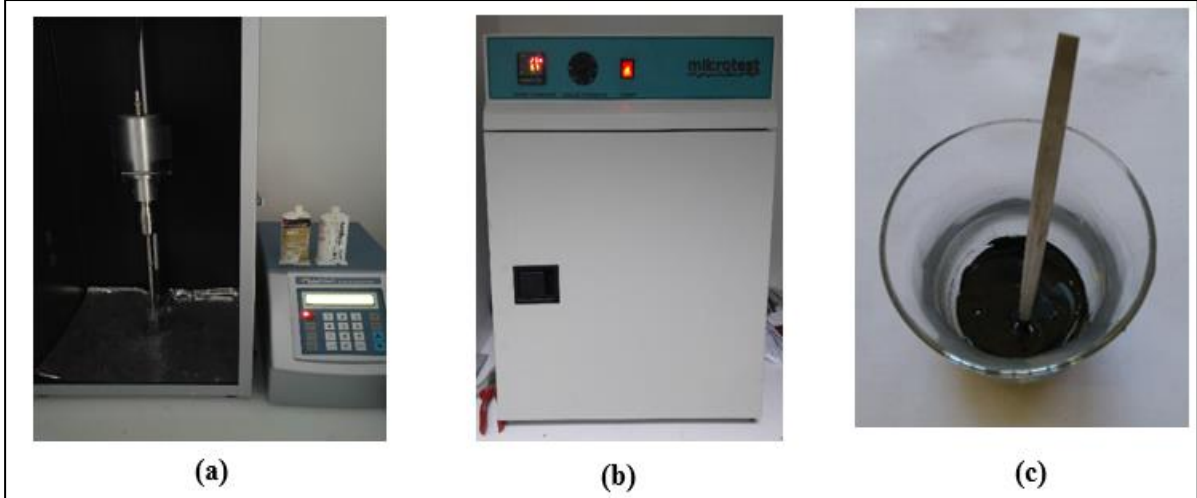
ALÜMİNYUM OKSİT VE TİTANYUM DİOKSİT PARTİKÜL TAKVİYELİ YAPIŞTIRICILARLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ



Şekil 2. Tek tesirli bindirme bağlantı geometrisi

2.2.1. Katkısız Yapıştırıcıların Hazırlanması

Katkısız yapıştırıcıların hazırlanması için ilk olarak, temizliği yapılmış boş bir cam bardağa yapılması planlanan yapıştırıcı karışım (epoksi+sertleştirici) miktarının bileşim oranına göre epoksi ve epoksi miktarının iki katı kadar aseton ilave edilerek ultrasonik karıştırıcıda 30 KHz frekans değerinde 30 dakika karıştırılmıştır (Şekil 3 a). Aseton+epoksi karışımı, kurluşma sıcaklığının altında bir sıcaklıktaki etüv içinde bekletilerek asetonun tamamen uçması sağlanmıştır (Şekil 3 b). Asetonun tamamen uçup uçmadığı, hassas terazide ağırlık ölçümüyle kontrol edilmiştir. Daha sonra bu karışıma epoksi-sertleştirici bileşim oranına göre sertleştirici eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır (Şekil 3 c).



Şekil 3. (a) Ultrasonik karıştırıcı, (b) Etüv, (c) Karışım sonrası yapıştırıcı

2.2.2. Partikül Katkılı Yapıştırıcıların Hazırlanması

Nanoyapı katkılı yapıştırıcıların hazırlanmasında ilk olarak temizliği yapılmış boş bir cam bardağa yapılması planlanan yapıştırıcı karışım (epoksi+sertleştirici) miktarına, ağırlıkça belirlenen oran kadar (% 1 ve % 2) nanopartikül ve eklenecek epoksi miktarının iki katı kadar aseton eklenerek ultrasonik karıştırıcıda 30 KHz frekans değerinde 10 dakika karıştırılmıştır. Aseton+nanoyapı karışımı 10 dakika karıştırıldıktan sonra, karışımın içerisinde bulunan aseton buharlaştırılmadan karışıma planlanan miktarda epoksi eklenerek ultrasonik karıştırıcı ile 30 KHz frekansında 30 dakika karıştırılmıştır. Aseton+nanoyapı+epoksi karışımı, kurluşma sıcaklığının altında bir sıcaklık değerinde etüv içinde bekletilerek asetonun tamamen uçması sağlanmıştır. Asetonun tamamen uçup uçmadığı, hassas terazide ağırlık ölçümüyle kontrol edilmiştir. Daha sonra bu karışıma epoksi-sertleştirici bileşim oranına göre sertleştirici eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır.

S. AKPINAR

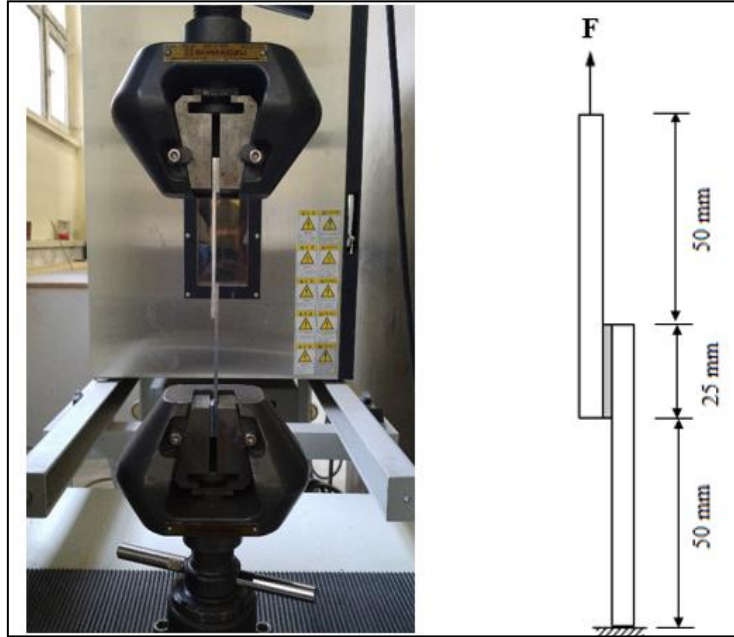
2.2.3. Bağlantı Numunelerin Hazırlanması

Yapıştırma malzemelerin konumunu koruması, yapıştırıcı kalınlığını ve bindirme uzunluğunu istenilen ölçüde ayarlamak için kalıp kullanılmıştır. Yapıştırma işleminden önce kalıp temizlenmiş ve yapışmaz sprey yapışmayı önlemek için kalıp üzerine sıkılmıştır. Yapıştırıcılar yapıştırılan malzemenin bindirme bölgesine uygulanarak, hava üfleli sıcak pres içerisinde Tablo 2’de verilen yapıştırıcılar için uygun kürleşme sıcaklığında bekletilerek kürleşmesi sağlanmıştır.

Tablo 2. Yapısal yapıştırıcılar ve kürleşme şartları

Yapıştırıcı	Bileşen Oranı (Epoksi:A / Sertleştirici:B)	Kürleşme sıcaklığı/zaman
3M™ DP-460	A:B=2:1	60°C/120 dakika
3M™ DP-270	A:B=1:1	70°C/120 dakika
Araldite2015	A:B=1:1	70°C/60 dakika
AV138	A:B=2:1	70°C/60 dakika

Her bir bağlantı konfigürasyonundan üçer adet numune olmak üzere toplamda 60 adet tek tesirli bağlantı numunesi üretilmiştir. Yapıştırma bağlantılarının çekme testi bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I (Kyoto, Japonya) üniversal çekme cihazında 1 mm/dk’lık çekme hızında yapılmıştır. Sınır şartları ve numunelere uygulanan kuvvetler Şekil 4’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4. Sınır şartları ve çekme testi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

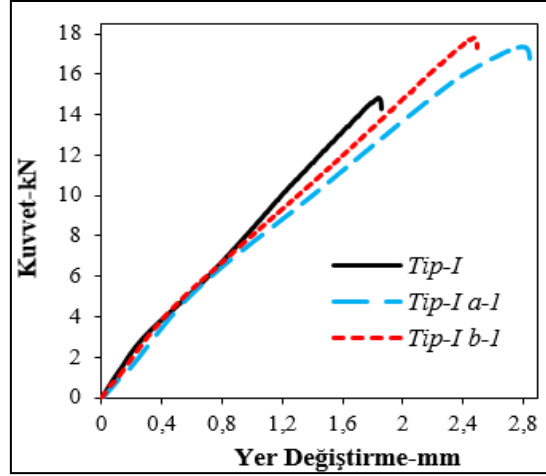
Tablo 3’te verilen DP460 kullanılarak elde edilen katkısız veya partikül katkılı tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri incelendiğinde, yapıştırıcıya TiO_2 ve Al_2O_3 ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. % 1 oranında iki farklı partikül ilave edilerek elde edilen katkılı bağlantılar ile katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında, katkısız bağlantılara göre TiO_2 katkılı bağlantılar yaklaşık % 20, Al_2O_3 katkılı bağlantılar ise yaklaşık % 24 daha fazla yük taşımıştır. Partikül ilave oranı % 2 ye çıktığında, bağlantının hasar yüklerindeki artış oranı azalmaktadır.

ALÜMİNYUM OKSİT VE TİTANYUM DİOKSİT PARTİKÜL TAKVİYELİ YAPIŞTIRICILARLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Tablo 3. DP460 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri

Tip	Partikül	Partikül İlave Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükü (N)
Tip-I	-	-	14420
Tip-I a-1	TiO ₂	1	17365
Tip -I b-1	Al ₂ O ₃	1	17823
Tip -I a-2	TiO ₂	2	16731
Tip -I b-2	Al ₂ O ₃	2	16834

Tek tesirli bindirme bağlantılarında hasar bindirme bölgesinin her iki uçundan başlayarak merkeze doğru ilerlemektedir. Bunun sebebi tek tesirli bindirme bağlantıların geometrisindeki eksantriklik bindirme bölgesinin uçlarında soyulma gerilmelerini oluşturmaktadır [10-24]. Şekil 5'te verilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, yapıştırıcıya partikül ilave edilmesi bağlantının yer değiştirme kapasitesini artırmaktadır. Yer değiştirme kapasitesindeki artış, bağlantının uçlarında meydana gelen gerilmeler şekil değiştirme enerjisi tarafından absorbe edilerek hasarın başlamasını geciktirdiği ve bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yüklerindeki artış ile uyumlu olduğu görülmektedir.

**Şekil 5.** DP460 yapıştırıcısına ait katkısız ve katkılı bağlantı numunelerinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri

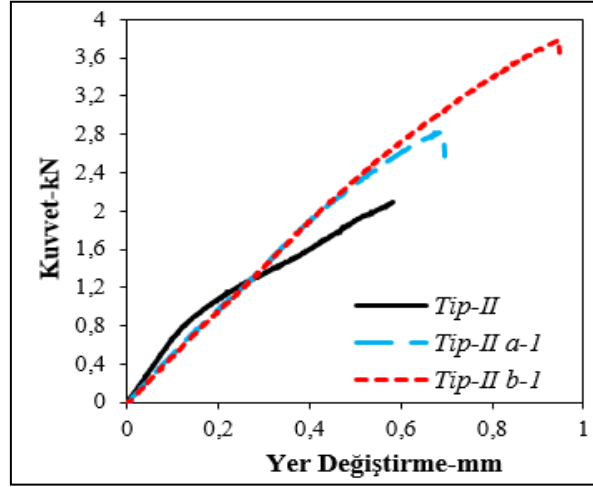
DP270 rijit yapıştırıcı kullanılarak elde edilen katkısız ve partikül katkılı bağlantı numunelerinin ortalama hasar yükleri incelendiğinde, DP270 yapıştırıcıya partikül ilave edilmesi bağlantıların hasar yükünü artırmaktadır. Ancak bu artış, yapıştırıcıya partikül ilave oranına göre değişmektedir. DP270 yapıştırıcıya % 1 oranında TiO₂ ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 38 artırırken, Al₂O₃ ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 82 artırdığı Tablo 4'den açıkça görülmektedir.

Tablo 4. DP270 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri

Tip	Partikül	Partikül İlave Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükü (N)
Tip-II	-	-	2063
Tip-II a-1	TiO ₂	1	2846
Tip -II b-1	Al ₂ O ₃	1	3761
Tip -II a-2	TiO ₂	2	2556
Tip -II b-2	Al ₂ O ₃	2	3200

Şekil 6'da verilen katkısız ve % 1 oranında partikül katkılı bağlantılardan elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğine, rijit bir yapıştırıcıya nanoyapı ilave edilmesi bağlantının yer değiştirme kapasitesini önemli derecede artırmaktadır.

S. AKPINAR



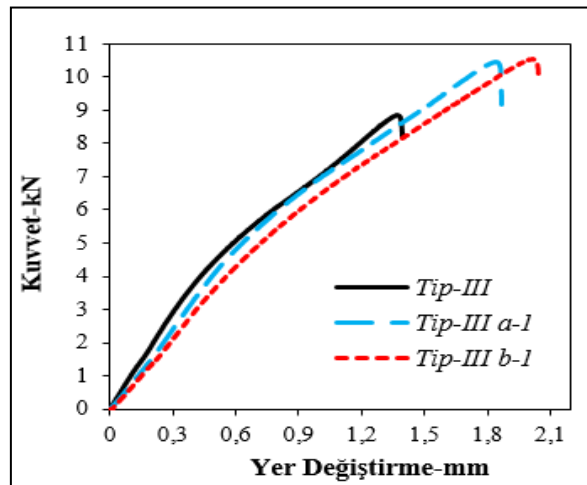
Şekil 6. DP270 yapıştırıcıya ait katkısız ve katkılı bağlantı numunelerinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Araldite2015 yapıştırıcı içerisinde % 1 oranında TiO_2 ve Al_2O_3 partikül katkı bağlantılar ile katkısız bağlantı tipleri karşılaştırıldığında, katkılı bağlantıların ortalama hasar yükleri sırasıyla % 19 ve % 20 oranında artmaktadır. Benzer şekilde; yapıştırıcı içerisinde % 2 oranında TiO_2 ve Al_2O_3 partikül katkısı bağlantıların hasar yükünü sırasıyla yaklaşık % 6 ve % 11 oranında artırmaktadır (Tablo 5).

Tablo 5. Araldite2015 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri

Tip	Partikül	Partikül İlave Oranı (%)	Ortalama Hasar Yüğü (N)
Tip-III	-	-	8784
Tip-III a-1	TiO_2	1	10472
Tip-III b-1	Al_2O_3	1	10587
Tip-III a-2	TiO_2	2	9331
Tip-III b-2	Al_2O_3	2	9756

Şekil 7'de verilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, Tip-III a-1 ile Tip-III b-1 bağlantı tiplerinde yer değiştirme kapasitesinin artması, bağlantıların hasar yüklerini artırmaktadır. Bu artış Tip-III b-1 bağlantı tipinde daha fazla olması, deneylerden elde edilen ortalama hasar yükündeki artış oranını desteklemektedir.



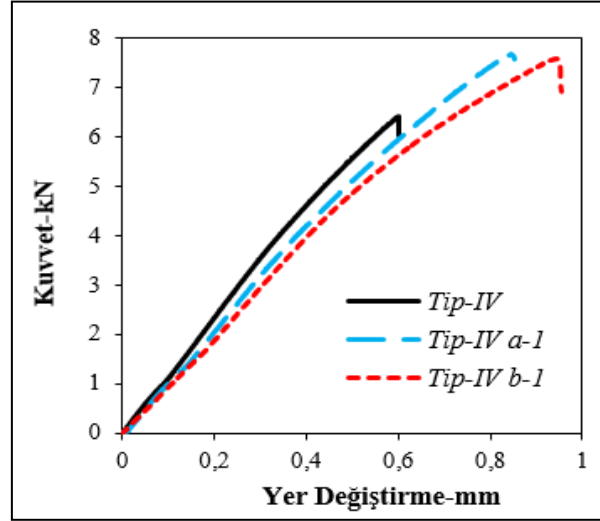
Şekil 7. Araldite2015 yapıştırıcıya ait katkısız ve katkılı bağlantı numunelerinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri

ALÜMİNYUM OKSİT VE TİTANYUM DİOKSİT PARTİKÜL TAKVİYELİ YAPIŞTIRICILARLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Diğer bir rijit yapıştırıcı olan AV138 yapıştırıcısına TiO_2 ve Al_2O_3 partikül ilave edilmesi bağlantıların hasar yükünü artırmaktadır. Bu artışın partikül oranının % 1 olduğunda daha iyi olduğunu ve katkısız göre TiO_2 partikül katkılı bağlantıların yaklaşık % 20, Al_2O_3 partikül katkılı bağlantıların ise yaklaşık % 18 daha fazla yük taşıdığı Tablo 6'dan anlaşılmaktadır. Ayrıca yapıştırıcıya partikül ilave edilmesi bağlantının yer değiştirme kapasitesini artırdığı Şekil 8'den görülmektedir.

Tablo 6. AV138 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri

Tip	Partikül	Partikül İlave Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükü (N)
Tip-IV	-	-	6403
Tip-IV a-1	TiO_2	1	7693
Tip -IV b-1	Al_2O_3	1	7568
Tip -IV a-2	TiO_2	2	6734
Tip -IV b-2	Al_2O_3	2	7103



Şekil 8. AV138 yapıştırıcısına ait katkısız ve katkılı bağlantı numunelerinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Yapıştırıcıya TiO_2 ve Al_2O_3 partikülleri ilave edilmesi yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların hasar yükünü artırmaktadır.

Tek tesirli bindirme bağlantıların ortalama hasar yüklerine göre, DP460, DP270, Araldite2015 ve AV138 yapıştırıcısına en iyi TiO_2 ve Al_2O_3 partikül ilave oranının % 1 olduğu ve ilave oranının artmasıyla hasar yükündeki artış oranının azaldığı tespit edilmiştir.

Bağlantıların hasar yüklerine göre, yapıştırıcıya en iyi partikül ilavesinin Al_2O_3 olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bağlantıların hasar yüklerindeki artışın kuvvet-yer değiştirme eğrileriyle de uyumlu olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] EDWARDS, K.L., "A Brief Insight into the Selection and Use of Engineering Adhesives for Preliminary Joint Design", Materials and Design, 19, 121-123, 1998.
- [2] HIGGINS, A., "Adhesive Bonding of Aircraft Structures", International Journal of Adhesion and Adhesives, 20, 367-376, 2000.

S. AKPINAR

- [3] GRANT, L.D.R., ADAMS, R.D., DA SILVA, L.F.M., “Experimental and Numerical Analysis of Single-Lap Joints for the Automotive Industry”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 405-413, 2009.
- [4] GÜLTEKİN, K., *Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Malzeme Genişliğinin ve Kalınlığının Bağlantının Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2014.*
- [5] SOLMAZ, M.Y., TOPKAYA, T., “Progressive Failure Analysis in Adhesively, Riveted, and Hybrid Bonded Double-Lap Joints”, *Journal of Adhesion*, 89, 822-836, 2013.
- [6] ZHAO, X., ADAMS, R.D., DA SILVA, L.F.M., “Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25, 837–856, 2011.
- [7] SOLMAZ, M.Y., “Residual Stress Analysis of Steel Fibre Reinforced Composite Inverted-Tooth Chains” *Materials Testing*, 54, 694–699, 2012.
- [8] TEMİZ, S., AKPINAR, S., AYDIN, M.D., SANCAKTAR, E., “Increasing Single Lap Joint Strength by Adherend Curvature-Induced Residual Stresses”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27, 244-251, 2013.
- [9] SOLMAZ, M.Y., TURGUT, A., “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”, *Mathematical and Computational Applications*, 16, 159–170, 2011.
- [10] AKPINAR, S., “The Strength of the Adhesively Bonded Step-Lap Joints for Different Step Numbers”, *Composites Part B*, 67, 170-78, 2014.
- [11] REIS, P.N.B., FERREIRA, J.A.M., ANTUNES, F., “Effect of Adherent’s Rigidity on the Shear Strength of Single Lap Adhesive Joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 193-201, 2011.
- [12] ZHOY, H., LIU, H.Y., ZHOU, H., ZHANG, Y., GAO, X., MAI, W.Y., “On Adhesive Properties of Nano-Silica/Epoxy Bonded Single-Lap Joints”, *Material and Design*, 95, 212-218, 2016.
- [13] GHOSH, P.K., PATEL, A., KUMAR, K., “Adhesive Joining of Copper Using Nano-Filler Composite Adhesive”, *Polymer*, 87, 159-169, 2016.
- [14] JOJIBABU, P., JAGANNATHAM, M., HARIDOSS, P., RAM, J.G.D., DESHPANDE, A.P., BAKSHI, S.R., “Effect of Different Carbon Nano-Fillers on Rheological Properties and Lap Shear Strength of Epoxy Adhesive Joints, *Composite Part A*, 82, 53-64, 2016.
- [15] KWON, D.J., WANG, Z.J., CHOI, J.Y., SHIN, P.S., DEVRIES, K.L., PARK, J.M., “Interfacial and Mechanical Properties of Epoxy Composites Containing Carbon Nanotubes Grafted with Alkyl Chains of Different Length”, *Composite Part A*, 82, 190-197, 2016.
- [16] LIU, S., FAN, Z., HE, C., “Improving the Fracture Toughness of Epoxy with Nanosilica-Rubber Core-Shell Nanoparticles”, *Composite Science and Technology*, 126, 132-140, 2016.
- [17] TÜZÜN, F.N., TUNALIOĞLU, M.Ş., “The Effect of Finely-Divided Fillers on the Adhesion Strengths of Epoxy-Based Adhesives”, *Composite Structures*, 121, 296-303, 2015.
- [18] GHOSH, P.K., NUKALA, S.K., “Properties of Adhesive Joint of Inorganic Nano Filler Composite Adhesive”, *Indian Journal of Engineering and Material Sciences*, 15, 68-74, 2008.
- [19] GKIKAS, G., BARKOULA, N.M., PAIPETIS, A.S., “Effect of Dispersion Conditions on the Thermo-Mechanical and Toughness Properties of Multi Walled Carbon Nanotubes-Reinforced Epoxy”, *Composite Part B*, 43, 1697-2705, 2012.
- [20] ZHAI, L.L., LING, G.P., WANG Y.W., “Effect of Nano-Al₂O₃ on Adhesion Strength of Epoxy Adhesive and Steel”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28, 23-28, 2007.
- [21] GKIKAS, G., SIOULAS, D., LEKATOU, A., BARKOULA, N.M., PAIPETIS, A.S., “Enhanced Bonded Aircraft Repair Using Nano-Modified Adhesives”, *Material and Design*, 41, 394-402, 2012.
- [22] TUTUNCHI, A., KAMALI, R., KIANVASH, A., “Steel-Epoxy Composite Joints Bonded with Nano-TiO₂ Reinforced Structural Acrylic Adhesive”, *Journal of Adhesion*, 91, 663-676, 2015.
- [23] GILBERT, E.N., HAYES, B.S., SEFERIS, J.C., “Nano-Alumina Modified Epoxy Based Film Adhesives”, *Polymer Engineering and Science*, 43, 1096-1104, 2003.
- [24] GÜLTEKİN K., AKPINAR, S., ÖZEL, A., “The Effect of Moment and Flexural Rigidity of Adherend on the Strength of Adhesively Bonded Single Lap Joints”, *Journal of Adhesion*, 91, 637-650, 2015.