



---

**Makale / Research Paper**

---

**Nano-Silika Parçacıklarının Al-GFRP Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Dayanımına Etkisi**

**M. Veysel ÇAKIR<sup>\*1</sup>, Didem KINAY<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mimarlık Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 79000  
Kilis/TÜRKİYE

<sup>2</sup>Gaziantep Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 27310,  
Gaziantep/Türkiye

<sup>1</sup>[cakir@kilis.edu.tr](mailto:cakir@kilis.edu.tr), <sup>2</sup>[diidemkinay@gmail.com](mailto:diidemkinay@gmail.com)

**Received/Geliş:** 07.02.2018

**Revised/Düzeltilme:** 13.02.2018

**Accepted/Kabul:** 18.04.2018

**Öz:** Al ve fiber takviyeli polimerler, yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı malzemelerin birleştirilmesinde yapışkanların kullanılması mekanik yöntemlere göre pek çok avantaj sağlamakla birlikte, yapışkan bağlantısının mukavemetini arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu amaçtan yola çıkılarak bu çalışmada, Al-GFRP tek-bindirmeli yapıya derzleri, Araldite 2014 yapıştırıcıya nanosilika parçacıkları eklenerek hazırlanmıştır. Yapıştırılan numunelerinin kayma dayanımları ASTM D 3039 uluslararası standartlara uygun olarak üniversal çekme test makinesi ile yapılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçları, yapıştırıcıya eklenen nanosilika parçacıklarının Al-GFRP yapıştırma bağlantılarını kayma performansında maksimum % 43 oranda iyileştirdiğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Al-GFRP, Kayma dayanımı, Nano-silika, Yapıştırılmalı bağlantı

---

**Effect of Nano-Silica Particles on Shear Strength of Al-GFRP Bonding Joints**

**Abstract:** Al and fiber reinforced polymers are widely used in aerospace and automotive industries because of high strength/weight ratios. Although the use of adhesives in joining of dissimilar materials provides many advantages over mechanical methods, investigations continue to increase the strength of the adhesive bond. For this aim, Al-GFRP single-lap adhesion bonds were prepared by adding nanosilica particles to Araldite 2014 adhesive. Shear performance of bonding samples were researched by universal tensile test machine in accordance to ASTM D 3039 international standards. The results showed that addition of nanosilica particles give enhancements in the shear performance of Al-GFRP bonding joints by maximum 43%.

**Keywords:** Adhesive bonding, Al-GFRP, Nano-silica, Shear strength

---

## 1. Giriş

Havacılık, otomobil ve denizcilik endüstrisinde birçok mekanik yapı, fiber takviyeli polimer malzemeler ile alüminyum, çelik, titanyum, vb. gibi metallerle birleştirilen çeşitli parçalardan üretilir. Farklı malzemelerin birleştirilmesindeki amaçlardan biri, her maddenin spesifik özelliklerine dayanılarak etkin ve işlevsel bir şekilde kullanılmasını sağlayan ürün tasarım esnekliğini arttırmaktır. Bununla birlikte, benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesi genellikle zordur. Farklı malzemeler için en sık kullanılan birleştirme yöntemleri mekanik sabitleme (cıvata,

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Çakır, M.V., Kinay, D., "Nano-Silika Parçacıklarının Al-GFRP Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Dayanımına Etkisi" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2018, 5(2); 618-625.

*How to cite this article*

Çakır, M.V., Kinay, D., "Effect of Nano-Silica Particles on Shear Strength of Al-GFRP Bonding Joints" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2018, 5(2); 618-625.

perçin) ve yapıştırma yöntemidir. Yapıştırılmalı bağlantılar mekanik bağlantılara göre kullanılan parça sayısının azlığı, hafif olması, montaj süresi, daha az gerilme yığılması, sızdırmazlık, düşük maliyet, geliştirilmiş yorulma ve korozyon direnci, pürüzsüzlük ve estetik açısından tasarımcılara önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, yapıştırılmalı bağlantıların performansı çoğunlukla yapıştırıcının mekanik özellikleriyle sınırlıdır, genellikle yapışkanlar yapıştırılan malzemelerden çok daha zayıftır [1].

Pek çok benzersiz mekanik özellik sergileyen nano parçacıklar son yıllarda polimer malzemelerin ve yapıştırıcıların mukavemetini artırmak için en cazip seçeneklerden biri haline gelmiştir [1,2]. Bu anlamda yapıştırıcıya Alüminyum oksit [3,4] Titanyum oksit [5], nano-grafen [6], nano-karbon [7] ve nano-kil [8] gibi birçok farklı nano-parçacıklar eklenerek yapıştırma bağlantılarının performansları üzerine çalışmalar yapıldı.

Ayrıca nano-silika ilave edilen çalışmalara baktığımızda, Tutunchi ve ark. [1] iki bileşenli akrilik yapıştırıcılarla bağlanmış çelik cam elyaf bağlantılarının kayma ve çekme mukavemetlerine silika nano parçacıklarının ağırlıkça % 1,5 oranında eklenmesinin kayda değer bir artış sağladığını belirtmiştir.

Nassar ve ark. [9] tek bindirmeli Magnezyum-çelik yapıştırma bağlantılarına silika ve alümina nano parçacıklarını ekleyerek yük taşıma kapasitesini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar silika parçacıklarının alümina parçacıkları ile karşılaştırıldığında bağlantının yük taşıma kapasitesini arttıracığını göstermiştir.

Zhou ve ark. [10] yarı statik yük altında saf epoksi ve nano-silika katkılı epoksi ile bağlanmış tek bindirmeli yapıştırılmalı çelik bağlantıların kayma dayanımını araştırmıştır. Epoksi matrise ağırlıkça % 10 ve 20 oranında nano-silika eklenmesinin yapıştırıcı mukavemetini %20 oranında artırdığını belirtmişlerdir.

Chavooshiana v.d [11] iki komponentli yapısal akrilik yapıştırıcılarla bağlanmış çelik ile cam elyaf kompozit bağlantıların, yapışma mukavemetine silikon karbid nano-parçacıklarının etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır ve bu çalışmanın sonucunda, nanosilikon karbür parçacıklarının kullanılmasının, kompozit bağlantıların kayma ve gerilme mukavemetinde kayda değer bir artışa neden olduğunu rapor etmişlerdir.

Yapıştırma bağlantıların mekanik ilişkileri ve bozulma süreçleri tipik olarak çok karmaşıktır. Bağlantının dayanımı; yapıştırıcı türü, yapıştırılan malzemelerin türü, yapışma uzunluğu, yapışkan kalınlığı gibi birçok faktörlerden etkilenir. Bu yüzden farklı malzemeler ve farklı yapıştırıcılar kullanılarak bu etkilerin daha iyi anlaşılması gerekmektedir [12].

Bu çalışmanın amacı, Alüminyum 2024 T3 levhalarla cam fiber polimer levhaların birleştirilmesinde ticari epoksi yapıştırıcıya (Araldite 2014-1) ilave edilen nano-silika katkısının bağlantının kayma dayanımına etkisini araştırmaktır.

## **2. Deneysel Çalışma**

### **2.1. Malzemeler**

Bu çalışmada, havacılık ve uzay sanayi olmak üzere birçok alanda yoğun olarak kullanılan Alüminyum 2024 T3 ve G10 cam fiber polimer plakalar yapıştırılan malzemeler olarak kullanılmaktadır. Yapıştırıcı Huntsman (Basel, İsviçre) firması tarafından üretilmiş olan Araldite 2014-1 ve katkı maddesi olarak ise nano-silika (Tablo 1) kullanılmıştır. Araldite 2014-1

yapıştırıcısının sertleşme süresi oda sıcaklığında 40 dakika olup, sertleştirici-epoksi reçine oranı  $\frac{1}{2}$ ' dir.

Tablo 1. Nano-silika parçacıklarının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Kurutmada Kayıp	3%
Kütle Yoğunluğu	200-500 kg/m <sup>3</sup>
Yanal Genişlik	0.5-2 $\mu$ m
Kalınlık	1-10 nm

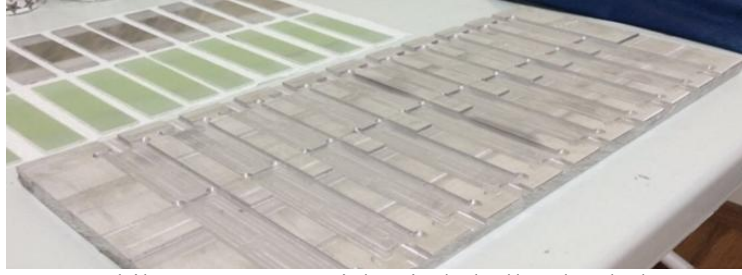
## 2.2. Numunelerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı

Numunelerin hazırlanmasına, Alüminyum ve GFRP levhaların giyotin vasıtasıyla kesilerek istenilen ölçülere getirilmesi ile başlanmıştır. Bu ölçüler tek bindirmeli bağlantı standartlarına göre belirlenmiştir. Daha önce bu konu üzerine yapmış olduğumuz deneyler [13] ve Andreassi ve arkadaşlarının [14] yapmış oldukları çalışmaların ışığında, yapıştırma bindirme alanının belirleyici bir parametre olduğu görülmektedir. Ayrıca, yapıştırma performansı temel olarak belli geometrik parametrelere ve yapıştırma kalınlığına bağlıdır. Bu bilgiler ve bağlantı mukavemeti üzerindeki etkileri göz önünde bulundurularak bindirme uzunluğu 25 mm, yapıştırıcı kalınlığı 0,2 mm ve tek bindirmeli yapıştırılmalarda sadece nano-kil parçacıklarının ilave oranının mekanik etkisi araştırılmıştır.

Numunelerin yapıştırılacak olan bölgeleri 100 gridlik zımpara yardımıyla zımparalanmış ve yüzey pürüzlülükleri uygun hale getirilmiştir. Sonrasında, numune ve kalıp yüzeyleri saf aseton ile temizlenip yağdan ve kirden arındırılmıştır. Kullanılan kalıp (Şekil 1), tek bindirmeli yapıştırma testlerinde numunelerin istenilen bindirme uzunluğu ve yapıştırma kalınlığını sağlamak amacıyla tarafımızdan özel olarak tasarlanıp imal edilmiştir.

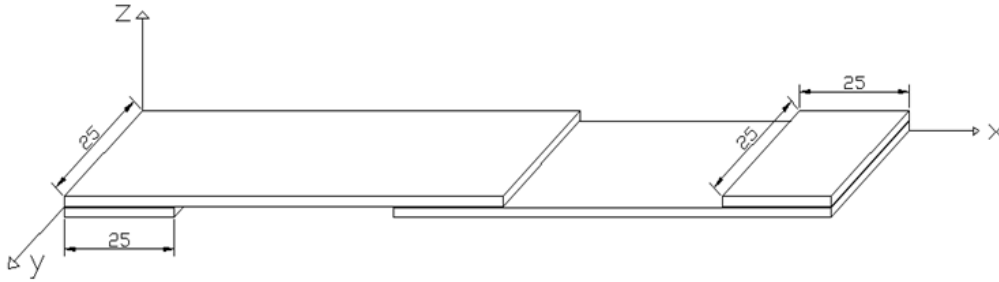
Katkılı yapıştırıcıların hazırlanmasında öncelikle boş bir beher bardağı içerisine 0,0001 gr hassasiyetli terazide istenilen miktarda Araldite 2014-1 epoksi yapıştırıcı ve sertleştiricisi (1/2 oranında) eklenmiştir. Nano-silika parçacıkları ağırlıkça sırasıyla %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında eklenmiştir. Viskozitesi yüksek olan yapıştırıcıya %99 saflıkta Merck 100014 marka aseton (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) 1:1 oranında ilave edilerek hafif yük homojenizatör ile 22 bin rpm hızda 30 dakika süre ile karıştırılmıştır. Aseton tamamen uçuncaya kadar kürleşme sıcaklığının altında bekletilmiş, hassas terazide kontrol edildikten sonra numulere sürülerek yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin hazırlanmasına, Alüminyum ve GFRP levhaların giyotin vasıtasıyla kesilerek istenilen ölçülere getirilmesi ile başlanmıştır. Bu ölçüler tek bindirmeli bağlantı standartlarına göre belirlenmiştir. Daha önce bu konu üzerine yapmış olduğumuz deneyler [13] ve Andreassi ve arkadaşlarının [14] yapmış oldukları çalışmaların ışığında, yapıştırma yüzey alanının tek bindirmeli bağlantılarda belirleyici bir parametre olduğu söylenebilmektedir. Bununla birlikte, yapıştırma performansı temel olarak belli geometrik parametrelere ve yapıştırma kalınlığına dayanır [12]. Bu bilgiler ve bağlantı mukavemeti üzerindeki etkileri göz önünde bulundurularak bindirme uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı ve metot belirlenmiştir.



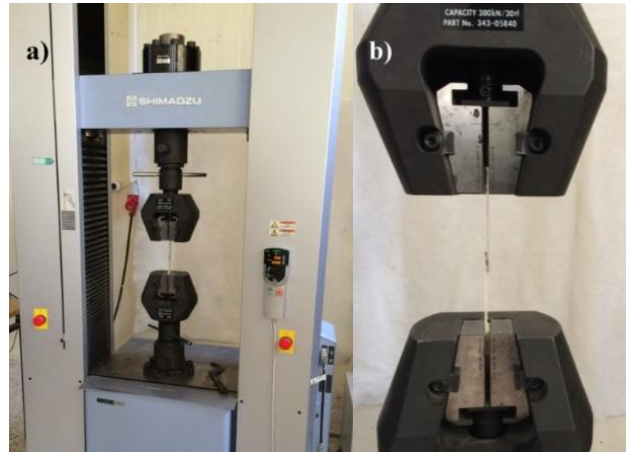
Şekil 1. Yapıştırma işleminde kullanılan kalıp

Şekil 2’de görüldüğü üzere numunelerin uç kısımlarına 25×25 mm olarak kesilen parçalar yapıştırılmıştır. Bu şekilde kalınlık farkından dolayı oluşacak eğilme momenti önlenerek bağlantıların direkt kayma gerilmesine maruz kalması amaçlanmıştır.



Şekil 2. Uç bölmelerdeki ekstra yapıştırmanın numune üzerinde gösterilmesi

Eksenel çekme deneyleri ASTM D 3039 standartlarında 300 kN kapasiteli Shimadzu AG-X (Şekil 3) üniversal test makinesi ile yapılmıştır. Numuneler, 1 mm/dak ilerleme hızında test edilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında (23 °C) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Shimadzu AG-X çekme test cihazı(a), numunelere yük uygulanması (b)

Yapıştırma ile birleştirilen numuneler test edildikten sonra kopma yükü ve uzama verileri kaydedilmiş, her tip için 5 numunenin ortalama kopma yükleri alınarak (Tablo 2) bağlantıların kayma dayanımı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\tau = \frac{F}{w \cdot b} \quad (1)$$

Burada F kopma yükünü, w yapışma genişliğini (25 mm), b ise bindirme uzunluğunu (25 mm) göstermektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

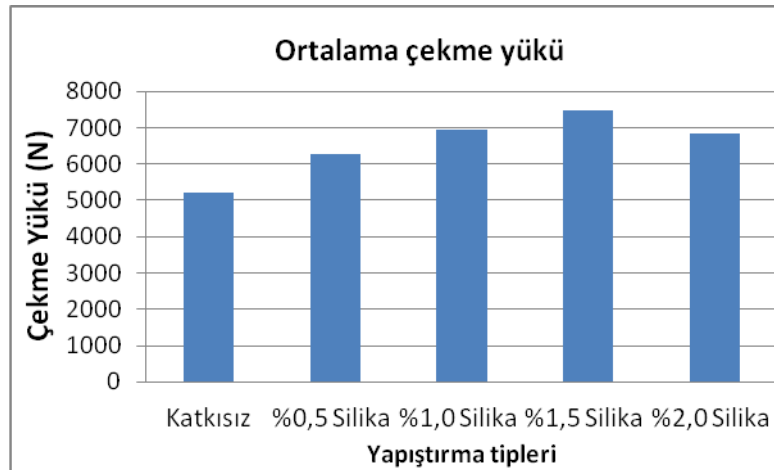
Uygulanan mekanik testlerin sonuçları ve hesaplanan çekme mukavemeti ortalamaları Tablo 2 ile verilmektedir.

Şekil 4 ve 5'e bakıldığında nano-silika katkısının bağlantı mukavemetini genel olarak iyileştirdiği görülmektedir. Katkısız yapıştırıcı numunelerin ortalama kayma dayanımları 8,36 MPa iken, ağırlıkça %0,5 katkılı bağlantının 10,04 MPa kayma dayanımına ulaştığı görülmektedir.

Tablo 2. Deney sonuçları

Yapıştırma tipi	Numune No & Çekme kuvveti (N)					Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Kayma gerilmesi (MPa)
	1	2	3	4	5		
<b>Katkısız</b>	4697,8	5141,7	5915,2	4749,3	5633,3	5227,5	8,4
<b>%0,5 Silika</b>	6148,3	6357,5	6450,5	6268,5	6154,9	6275,9	10,0
<b>%1,0 Silika</b>	7938,7	6953,0	7012,9	6897,7	6006,0	6961,7	11,1
<b>%1,5 Silika</b>	7702,8	6387,2	7663,7	7426,6	8273,5	7490,8	12,0
<b>%2,0 Silika</b>	6950,2	6548,0	6268,5	7702,8	6671,5	6828,2	10,9

%1,5 nano-silika katkılı yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantının ise %43,3'lük artış ile en iyi çekme ve kayma dayanımına sahip olduğu görülmektedir.

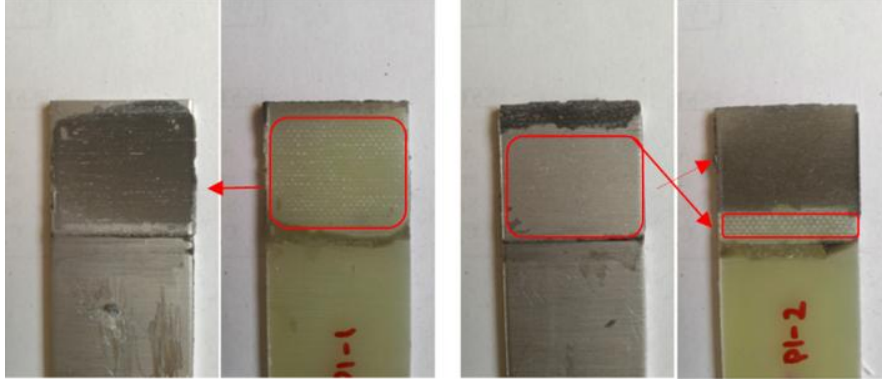


Şekil 4. Yapıştırma tiplerine göre ortalama çekme yükleri



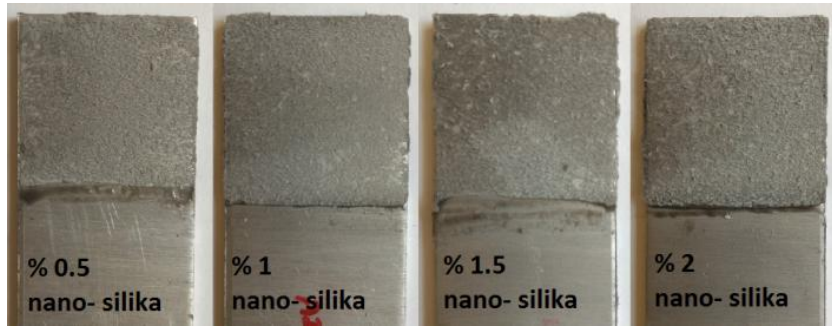
Şekil 5. Yapıştırma tiplerine göre ortalama kayma gerilmeleri

Şekil 6– 8’de katkısız Araldite 2014-1 ve sırası ile %0,5, %1, %1,5, %2 oranlarındaki nano-silika katkıli yapıştırıcılar ile birleştirilmiş numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları görülmektedir. Yapıştırma yüzeyleri incelendiklerinde, katkısız yapıştırıcı ile elde edilen bağlantılarda yapışkanın ya alüminyum yâda cam elyaf plakada kaldığı yani adezyon kaynaklı kopma olduğu görülmektedir (Şekil 6).

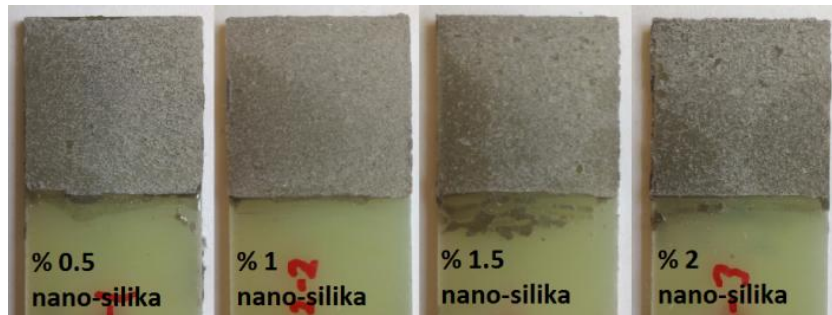


Şekil 6. Katkısız Araldite 2014-1 ile birleştirilmiş numunelerin kopma sonrası görünümü

Nano silika katkıli numunelerin deney sonrası gözle muayene edildiklerinde ise hasarın kohezyon kaynaklı (yapışkan tabakanın kopması) olduğu yani yapışkanın gerek Al gerekse cam elyaf plakalara iyi tutunduğu anlaşılmaktadır (Şekil 7-8).



Şekil 7. Nano-silika katkıli bağlantıların çekme deneyi sonrası Al plakalar üzerindeki görünümü



Şekil 8. Nano-silika katkıli bağlantıların hasar sonrası GFRP plakalar üzerindeki görünümü

%0,5 ila %1,5 nano silika parçacıklarının yapıştırıcıya ilave edilmesi, etkili bir temas alanının artmasına neden olan film yapısı oluşturup yapıştırıcının kohezyon direncinin artmasını sağlamıştır. Ancak %2 nano-silika katkısı, parçacıkların yığın oluşturmaya (toplanması, agregasyon) neden olmaktadır. Bu yığılma, düşük gerilmeler altında dahi yapışkan tabakada gerilme konsantrasyonu ve çatlamalara neden olarak bağlantının ani kopmasına sebep olabilmektedir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, Araldite 2014 yapıştırıcıya nano-silika parçacıkları eklenerek Al-GFRP tek-bindirmeli yapışkanlı bağlantıların çekme yükleri ve kayma dayanımları ASTM D 3039 uluslararası standartlara uygun olarak üniversal çekme test makinesi ile incelenmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları aşağıda verildiği gibi özetlenebilir.

- Araldite 2014 yapıştırıcısına nano-silika parçacıklarının ilave edilmesi bağlantının mukavemetini iyileştirmektedir.
- Maksimum kayma dayanımı %1,5 ağırlık oranında elde edilmiş olup katkısız yapıştırıcı ile yapılan bağlantılara göre %43,3 oranında artmıştır.
- Ağırlıkça %2 veya daha fazla nano-silika ilavesinin ise, nano-parçacıklarının topaklanmasına sebebiyet verdiği bu yüzden bağlantı mukavemetinin azaldığı görülmektedir.
- Nano-silika parçacıklarının yapıştırıcıya ilavesi yapıştırıcının yapıştırılan parçalara daha iyi tutunmasını sağlamaktadır.
- Katkısız yapıştırıcıli bağlantılarda kopmaların adezyon hasarlı iken, nano-silika katkılı bağlantılarda kopmanın yapıştırma tabakasının kopması şeklinde yani kohezyon hasarı şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

## 6. Teşekkür

Yapılan bu çalışma, Gaziantep Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi HUBF.YLT.17.02 nolu proje ile desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Tutunchi, A., Kamali, R., Kianvash, A., “Adhesive strength of steel–epoxy composite joints bonded with structural acrylic adhesives filled with silica nanoparticles”. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2015, 29 (3):195–206.
- [2] Guo, D., Guoxin X., Jianbin, L., “Mechanical properties of nanoparticles: basics and applications.” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47:1-25.
- [3] Zhai, L., Guoping, L., Jian, L., Wang, Y., “The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive.” *Materials Letters*, 2006, 60:3031–3033.
- [4] Ghabezi, P., Farahani, M., “Composite Adhesive-Bonded Joint Reinforcement by Incorporation of Nano-Alumina Particles.” *Journal of Computational Applied Mechanics*, 2016, 47(2):231-239.
- [5] Akpınar, S. “Alüminyum Oksit ve Titanyum Dioksit Takviyeli Yapıştırıcılarla Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi.” *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2016, 5(2):244-252.
- [6] Neto, A.S., Lopes da Cruz, D.T., Avila, A.F., “Nano-modified adhesive by graphene: the single lap-joint case.” *Materials Research*, 2013, 16(3):592-596.
- [7] Suzhu, Y., Tong, M. N., Critchlow, G., “Use of carbon nanotubes reinforced epoxy as adhesives to join aluminum plates.” *Materials and Design*, 2010, 31:126–129.
- [8] Khalili, S. M. R., Tavakolian, M., Sarabi, A., “Mechanical Properties of Nanoclay Reinforced Epoxy Adhesive Bonded Joints Made with Composite Materials.” *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010, 24:1917–1928.
- [9] Nassar, S.A., Wu, A. Z., Moustafa, K., Tzelepis, D., “Effect of Adhesive Nanoparticle Enrichment on Static Load Transfer Capacity and Failure Mode of Bonded Steel–Magnesium Single Lap Joints.” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, 137(5):1-6
- [10] Zhou, H., Liu, H.Y, Zhou, H., Zhang, Y., Gao, X., Mai, Y. W., “On adhesive properties of

- nano-silica/epoxy bonded single-lap joints.” *Materials and Design*, 2016, 95:212–218
- [11] Chavooshiana, M., Kamalia, R., Tutunchi, A., Kianvash, A., “Effect of silicon carbide nanoparticles on the adhesion strength of steel–epoxy composite joints bonded with acrylic adhesives.” *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017, 31(4):345–357.
- [12] Goudarzia, R.H., Khedmati, M.R., “An experimental investigation of static load capacity of AL-GFRP adhesively bonded single lap and double butt lap joints.” *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2015, 12:1583-1594
- [13] Çakır, M. V., Kınay, D., “Cam elyaf kompozitlerin alüminyum plaka ile yapıştırılması ve yapışmanın mekanik özelliklerinin araştırılması.” *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 2016, 31(ÖS 1): 99-108.
- [14] Andreassi, L., Baudille, R., Biancolini, M. E. “Spew formation in a single lap joint.” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2007, 27:458-468.