

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Halloysit Nanotüp Katkısının Al-GFRP Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısında Kayma Dayanımına Etkisi**

Özkan ÖZBEK<sup>1\*</sup>, Mehmet Veysel ÇAKIR<sup>2</sup>, Nurettin Furkan DOĞAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1532-4262>, ozkanozbek@kilis.edu.tr

<sup>2</sup> Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-0389>, cakir@kilis.edu.tr

<sup>3</sup> Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2728-8660>, nfdogan@gantep.edu.tr

**Geliş/ Received:** 27.04.2022;

**Kabul / Accepted:** 16.05.2022

**ÖZET:** Bu çalışmada, havacılık, otomotiv ve uzay gibi mühendislik alanlarında düşük yoğunluklu malzeme olarak sıklıkla tercih edilen alüminyum (Al) ve cam elyaf takviyeli kompozit (GFRP) malzemelerinin tek bindirmeli bağlantılarının (SLJ) kayma ve kırılma performanslarına halloysit nanotüp (HNT) parçacık katkısının etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, HNT parçacıkları beş farklı oranda (ağırlıkça %1.0, %1.5, %2.0, %2.5 ve %3.0) Araldite 2014-2 epoksi tabanlı yapıştırıcıya eklenmiş, hazırlanan numuneler bindirme kesme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, %3.0 HNT katkılı numuneler dışında bütün katkı oranlarında numunelerin saf numunelere göre daha yüksek kayma dayanımı sonuçları verdiğini göstermiştir. Maksimum kayma dayanımı sergileyen %2.0 HNT katkılı numunelerin (11.76 MPa) saf numunelere (9.02 MPa) kıyasla dayanımının %30.4 arttığı bulunmuştur. Ayrıca, %2.0'den daha fazla miktarda HNT katkısı, nano parçacıkların topaklanmasından (agglomeration) kaynaklanan yerel gerilme konsantrasyonları oluşumu nedeniyle düşüş eğilimi göstermiştir. Öte yandan HNT katkılarının yapıştırma bağlantılarının performanslarının arttırmasını sağlayan çatlak köprüleme ve çatlak pinlenmesi gibi tokluk mekanizmaları gösterdiği SEM görüntüleri ile belirlenmiştir. Sonuç olarak HNT katkısının belli miktarlarda yapıştırma bağlantılarında kullanılması, bu yapıların kayma dayanımlarını arttırarak daha dayanımlı malzemeler üretildiğini kanıtlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** HNT, Al-GFRP, Tek bindirmeli bağlantı, Kayma dayanımı, Hasar analizi.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: ozkanozbek@kilis.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için / To cite this article

Özbek, Ö., Çakır, M. V., Doğan, N. F. (2022). Halloysit Nanotüp Katkısının Al-GFRP Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısında Kayma Dayanımına Etkisi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 3(1), 117-128.

## Effect of Halloysite Nanotube Additive on Shear Strength in Al-GFRP Single Lap Adhesive Joint

**ABSTRACT:** In this study, the effects of halloysite nanotube (HNT) particle on the shear and fracture performance of single lap joints (SLJ) of aluminum (Al) and glass fiber reinforced composite (GFRP) materials, which are frequently preferred as low-density materials in engineering fields such as aerospace, aviation and automotive, were investigated. To this end, HNT particles were added to Araldite 2014-2 epoxy-based adhesive in five different ratios (1%, 1.5%, 2%, 2.5%, and 3% by weight), and the prepared samples were subjected to lap-shear tests. The obtained results showed that the samples gave higher shear strength results than the pure samples at all additive ratios except the samples with 3 wt.% HNT. It was found that the 2 wt.% HNT added samples (11.76 MPa) exhibiting the maximum shear strength provided an improvement of 30.4% compared to the pure samples (9.02 MPa). Furthermore, HNT additions of more than 2 wt.% amount resulted in a decreasing trend in results due to local stress concentrations caused by the agglomeration of nanoparticles. Also, SEM images showed that HNT particles showed toughening mechanisms such as crack bridging and crack pinning, which increases the performance of adhesive joints. In conclusion, the use of HNT particles at certain amounts in adhesive joints proved that more durable materials are derived by increasing the shear performance of these structures.

**Keywords:** HNT, Al-GFRP, Single lap joint, Shear strength, Damage analysis.

### 1. GİRİŞ

Özellikle havacılık, otomotiv ve uzay gibi ileri teknoloji gerektiren mühendislik alanlarında hafif yoğunluklu malzemelerin kullanımının tercih edilmesi günümüzde elyaf takviyeli kompozitleri oldukça popüler hale getirmiştir (Gemi ve ark., 2021). Sağladıkları yüksek yorulma ömrü, daha iyi sönümlenme ve yüksek özgül dayanım/dirençlilik gibi özellikleri ile klasik metal tabanlı mühendislik malzemelerine kıyasla uygulamalarda ön plana çıkmaktadırlar (Kaw, 2005; Arslan ve ark., 2022; Oğuz ve Erkiğ, 2021; Gemi ve ark., 2022; Oğuz ve ark., 2021). Öte yandan, bu malzemelerin kullanımı başta havacılık olmak üzere pek çok yapısal uygulamada metal malzemeler ile birleştirilmesini gerektirmektedir. Bu birleştirme işlemi için bugüne kadar yapılan araştırmalarda perçin, civata ve yapıştırıcı kullanımı gibi çeşitli teknikler görülmektedir (Jiang ve ark., 2020; Galińska, 2020; Liu ve Liu, 2022).

Yapıştırma ile birleştirme işlemi diğer klasik birleştirme tekniklerine (kaynak, civata vs.) nazaran sağladığı düzgün gerilme dağılımı, daha uzun servis ömrü ve yapıştırılan malzemeler arasında meydana gelebilecek olası kimyasal reaksiyonu engelleme gibi avantajlarından dolayı günümüz mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmekte ve giderek yaygınlaşmaktadır (Banea ve da Silva, 2009; Masson ve ark., 2022). Bununla birlikte, yapıştırıcı kullanılan bölgeler yapıştırılan altlık malzemelerinden daha zayıf mekanik özellikler gösterebilmektedirler. Bu bağlamda kullanılan yapıştırıcıya eklenen nano veya mikro ölçekli parçacıkların yapıştırma bölgesinin performansını ciddi miktarlarda iyileştirdiği literatür çalışmalarında görülmektedir. Bugüne kadar yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinde nano-silika, nano kil, karbon nanotüp ve nano grafen gibi birçok nano parçacık kullanımı bilimsel araştırmalarda incelenmiştir (Çakır ve Kinay, 2021; NajiMehri ve ark., 2022; Çakır ve Özbek, 2022). Soltannia ve Taheri (2015) cam/epoksi ve grafit/epoksi plakalarının tek bindirmeli yapıştırıcı ile birleştirme işlemlerinde grafitleştirilmiş karbon elyaflar, çok cidarlı karbon nanotüp ve nano grafen parçacıklarının çekme ve darbe gibi mekanik özelliklere etkilerini araştırarak karşılaştırmışlardır. Bütün nano parçacık katkılı numuneler saf numunelere göre

daha iyi mekanik özellikler verirken, maksimum iyileşmeler nano grafen içeren numunelerde görülmüştür (Soltannia ve Taheri, 2015). Razavi ve ark. (2018) tek bindirmeli olarak birleştirilen alüminyum altlıkların kayma dayanımlarını araştırmışlardır. Birleştirme malzemesi olarak UHU plus Endfest 300 yapıştırıcısı kullanılmış ve nano parçacık etkisini belirlemek için farklı oranlarda çok cidarlı karbon nanotüp (MWCNT), nano-silika ve bu nano parçacıkların hibritlerini yapıştırıcı içerisine dahil etmişlerdir. Saf numunelere kıyasla, kayma dayanımı ve kopma uzamasında maksimum iyileşmeler sırasıyla %36 ve %28 olarak %0.4 MWCNT ve %0.4 nano-silika karışımı içeren hibrit nano takviyeli numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca ister tek nano ister hibrit nano içersin hemen hemen bütün numuneler saf numunelerden daha yüksek sonuçlar vermiştir (Razavi ve ark., 2018). Özetle, nano parçacık katkıları yapıştırıcı ile birleştirme işlemlerinde performansı arttırabilmektedir.

İlk kez 1826 yılında Berthier tarafından kil minerali olarak tanımlanan halloysit nanotüp (HNT) parçacıkları, dünya üzerinde maden yataklarında bolca bulunmakta olup, alüminosilikat türü bir kil malzemedir (Yuan ve ark., 2015; Hanid ve ark., 2014). Özellikle polimer malzemeler alanında uygulaması yeni olup, malzemelerin birçok mekanik özelliklerini olumlu etkilediği bilimsel çalışmalardan görülmektedir. Nano kil ve nano silika parçacıklarının aksine HNT parçacıkları tüp formundadır ve ayrıca karbon nanotüp parçacıklarına göre ekonomik ve kolay elde edilebilirlik ile umut verici alternatif bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Hanid ve ark., 2014; Deng ve ark., 2008). Literatürde HNT parçacık eklentisinin malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği açıkça görülmektedir (Kaybal ve ark., 2021; Ye ve ark., 2011). Ulus ve ark. (2020) bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin epoksi fazına HNT parçacıkları ekleyerek tek kenar çentik çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Farklı ağırlık yüzdelerinde (1, 2, 3, 4 ve 5) eklenen HNT parçacıklarında üretilen numunelerin deney sonuçları karşılaştırılmış ve en iyi performans %2 HNT parçacığına sahip numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca %2 HNT içeren numuneler ile saf numuneleri yapay deniz suyunda yaşlandırarak katmanlar arası mekanik özellikleri kısa kiriş testleri ile karşılaştırmışlardır (Ulus ve ark., 2020). Nagaraja ve ark. (2020) karbon/cam hibrit kompozitlerde istifleme sırası ve HNT parçacıklarının mekanik ve termal özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Çeşitli oranlarda eklenen HNT parçacıkları (ağırlıkça %1, %3 ve %5) içeren numuneler mekanik olarak çekme, basma, eğme ve darbe yüklerine maruz bırakılmışlardır. Ağırlıkça %3 HNT içeren numunelerin maksimum sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Nagaraja ve ark., 2020). Bahsedilen özellikleri ve diğer alanlarda göstermiş olduğu performansları nedeniyle HNT kullanımının yapıştırma ile birleştirme işlemlerde umut vadeden bir nano parçacık olması muhtemeldir. HNT parçacıklarının yapıştırıcı bağlantı işlemlerinde araştırılarak etkilerinin bilimsel olarak rapor edilmesi literatüre katkı sağlayacak ve gelecekteki çalışmalara ışık tutacaktır.

Yukarıda yer alan literatür çalışmalarına göre, halloysit nanotüp (HNT) kullanımının kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği açıkça görülmekte olup, yapıştırma ile birleştirme işlemlerinde kullanımı yazarların bilgisi dahilinde bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma alüminyum (Al) ve cam elyaf takviyeli kompozit plaka (GFRP) olarak farklı iki malzemenin yapıştırma ile birleştirme işleminde halloysit nanotüp (HNT) eklentisinin, numunelerin kayma dayanımına etkilerini araştırmayı amaçlamıştır. Üretilen numunelere bindirme kesme testleri uygulanmış, kayma dayanımları, yük-yer değiştirme eğrileri gibi mekanik davranışları incelenmiştir. Bağlantıların mekanik deney sonrası kırılma yüzeyleri makro görüntülerle incelenerek kopma davranışları tespit edilmiştir. Ayrıca HNT katkısının kırılma morfolojisine etkilerini incelemek için numuneler üzerinde detaylı SEM görüntüleri alınarak hasar davranışları araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Malzemeler

Yapıştırma ile birleştirme işlemi için altlık olarak 2 mm kalınlığa sahip Alüminyum 2024 T3 (Seykoç Alüminyum Paz. ve San. Tic. Ltd. Şti., Türkiye) ve cam fiber takviyeli kompozit plakalar (Küçükparmak Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti., Türkiye) kullanılmıştır. Altlıkları birleştirmek için ticari bir yapıştırıcı olan epoksi tabanlı Araldite 2014-2 (Huntsman Advanced Materials Americas LLC, Canada) temin edilmiştir. Yapıştırıcı ve altlıkların mekanik özellikleri Çizelge 1.'de sunulmaktadır. HNT parçacıkları (Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş., Türkiye'den temin edilmiştir) yapıştırıcının içine nano parçacık eklentisi olarak kullanılmıştır. HNT parçacıklarının mekanik özellikleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Yapıştırıcı (Araldite 2014-2) ve altlıkların (Al ve GFRP) mekanik özellikleri

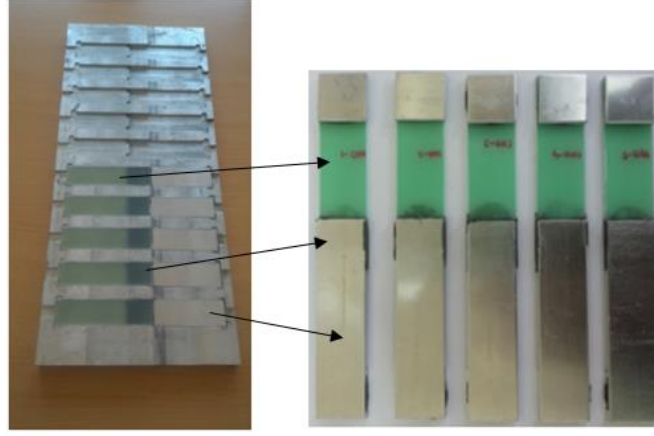
Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Young's Modülü (GPa)
Al 2024 T3	2.77	475	68
GFRP	1.82	362	18.65
Araldite 2014-2	1.60	30	3.1

**Çizelge 2.** HNT parçacıklarının fiziksel özellikleri

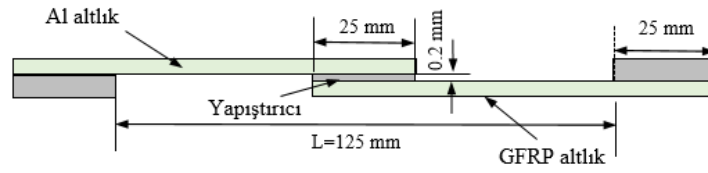
	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	Ortalama Uzunluk (µm)	Ortalama Dış çap (nm)	Ortalama İç çap (nm)
HNT	2.6	> 65	1.2	40	20

### 2.2 Numune Hazırlama

Numune hazırlama sürecinde ilk adım olarak, Al 2024 T3 ve GFRP plakalarından 100 mm uzunluğa ve 25 mm genişliğe sahip dikdörtgen altlıklar, giyotin makinesinde kesilerek hazırlanmıştır. Altlıkların yapıştırma uygulanacakları bölgeleri 120 kum zımpara ile aşındırılarak altlıklar ile yapıştırıcı arasındaki yapışma kabiliyeti arttırılacak şekilde pürüzlü bir yüzey elde edilmiştir. Sonrasında zımparalanan bölgelerdeki yağ, kir gibi kalıntılar aseton uygulanarak temizlenmiştir. İkinci aşama olarak, Araldite 2014-2 yapıştırıcı ile HNT parçacıklarının mekanik olarak karışımı gerçekleştirilmiş, bu karışıma ağırlıkça 1:1 oranında %99 saflıkta aseton eklenmiştir. Bütün numunelerin yapıştırıcılarına aseton eklenerek yapıştırıcı viskozitesinin azaltılması ve nano parçacıkların homojen dağılımını sağlanması amaçlanmıştır. Nano parçacık içeren/içermeyen karışım 5 dakika aralıklarla 8000 devirde 1 saat boyunca yüksek hızda karıştırılmıştır. Sonrasında karışım, vakumlu gaz giderme ünitesinde 65°C ve -0.75 bar basınç altında tutularak kalan asetonun ve karışımda oluşabilen hava kabarcıklarının uçması sağlanmıştır. Son adım olarak, hazırlanan karışım daha önce zımparalanan bölgelere uygulanarak Al ve GFRP altlıkların yapıştırılması Şekil 1.'de gösterilen kalıp üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler, 25 mm yapıştırma hattı uzunluğunda ve 0.2 mm yapıştırma kalınlığındadır. 24 saat kalıpta kalan numuneler, sonrasında 40°C'de 16 saat süreyle fırında bekletilerek üretim sonrası kurlaştırma işlemi yapılmıştır. Üretilen numunelerin geometrisi Şekil 2.'de verilmektedir.



Şekil 1. Yapıştırma işlemi için kullanılan kalıp ve numuneler



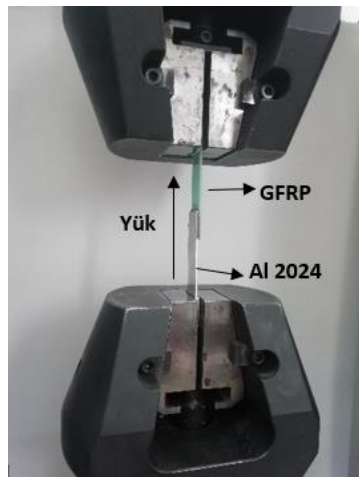
Şekil 2. Numune geometrisi

### 2.3 Bindirme Kesme Testi

HNT nano parçacık etkisini belirlemek için hazırlanan numunelere Şekil 3.'te gösterildiği gibi aksenal yönde bindirme kesme testleri uygulanmıştır. Bütün deneyler ASTM D5868-01 standardına uygun olarak 30 ton kapasiteli Shimadzu AG-X Serisi test cihazında 1 mm/dk yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında aksenal hizalamada sorun olmaması ve saf kayma kuvveti elde etmek için numunelerin uç kısımlarına 25×25 mm<sup>2</sup> kare Al parçalar yapıştırılmıştır. Veri toplama sistemi aracılığıyla deney esnasında oluşan yük-yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Numunelerin maksimum kayma gerilmeleri,  $\tau_{mak}$  aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tau_{mak} = F/(wd) \quad (1)$$

Burada  $F$  maksimum yük değerini temsil ederken  $w$  ve  $d$  sırasıyla yapıştırma hattının genişlik ve uzunluk değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 3. Bindirme kesme testi

Nano parçacık içeren malzemelerin, nano parçacık dağılımı ve kırılma morfolojisi üzerindeki etkilerini belirlemek için ZEISS marka SEM cihazı üzerinde hasarlı numunelerden görüntüler alınmıştır. HNT parçacıklarının numunelerde meydana getirdiği kırılma ve tokluk mekanizmaları deney sonrası yapıştırma bölgesinden örnekler alınarak detaylı olarak incelenmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

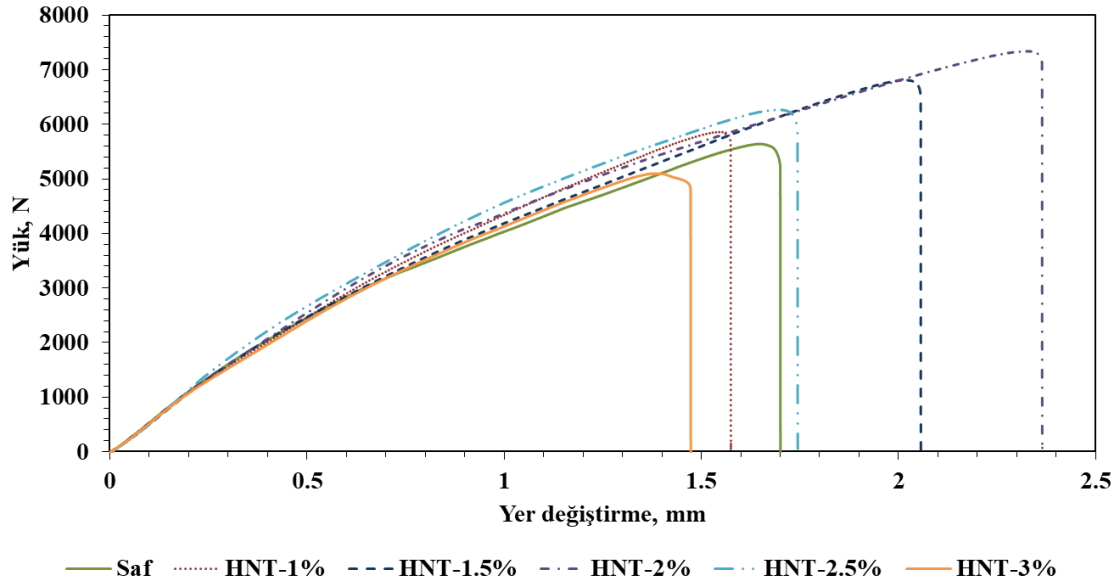
#### 3.1 Bindirme Kesme Testi Sonuçları

Eksenel yönde çekme kuvveti uygulanan numunelerden elde edilen deneysel bulgular ve numune içerikleri Çizelge 3.'te sunulmaktadır. Sonuçlara göre, %3 HNT içeriğine sahip numuneler (HNT-3) dışında bütün HNT içeren numuneler saf numunelere kıyasla iyileşmeler göstermiştir. Bu iyileşmeler HNT parçacıklarının epoksi türü yapıştırıcıların ara yüzey etkileşimi arttırmış, Araldite 2014-2 ile HNT parçacıklarının uyumlu olduğunu göstermiştir. Maksimum kayma gerilmesi  $11.76 \pm 0.38$  MPa olarak %2 HNT içeren numunelerden elde edilmiş olup, saf numunelere göre kayma dayanımı %30.4 artmıştır. Minimum kayma gerilmesi ise %3 HNT parçacığı içeren numunelerden  $8.16 \pm 0.30$  MPa olarak hesaplanmıştır. Öte yandan, HNT parçacık miktarının %2'den fazla olduğu numunelerde düşüşler görülmüş olup, fazla nano parçacık ilavesinin topaklanması ile (agglomeration) yapıştırıcı içeriğinde yerel gerilme konsantrasyonlarının oluşmasına ve malzemenin düzgün yapısının (uniform) bozulmuş olmasına atfedilmektedir. Fazla nano parçacık ilavesinin malzemelerin yapısında düzensizliklere yol açarak yerel gerilme konsantrasyonlarına neden olduğu literatürde birçok çalışmada ifade edilmektedir (Bulut, 2017; Ulus ve ark., 2019; Romanov ve ark., 2015).

Çizelge 3. HNT parçacıklarının fiziksel özellikleri

Numune	Araldite 2014-2 (ağr. %)	HNT (ağr. %)	Yük (N)	Kayma Gerilmesi (MPa)	Artış Miktarı (%)
Saf	100.0	0.0	5640.36	$9.02 \pm 0.51$	0.0
HNT-1	99.0	1.0	5869.20	$9.39 \pm 0.18$	4.1
HNT-1.5	98.5	1.5	6817.39	$10.91 \pm 0.24$	21.0
<b>HNT-2</b>	<b>98.0</b>	<b>2.0</b>	<b>7348.25</b>	<b><math>11.76 \pm 0.38</math></b>	<b>30.4</b>
HNT-2.5	97.5	2.5	6261.02	$10.02 \pm 0.22$	11.1
HNT-3	97.0	3.0	5098.01	$8.16 \pm 0.30$	-9.5

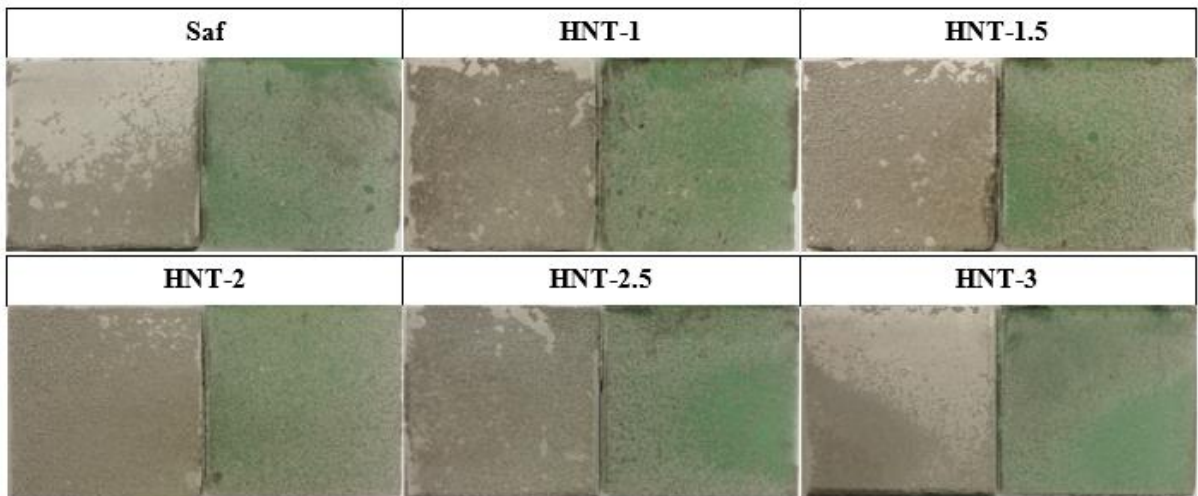
Numunelerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.'te verilmiştir. %2 HNT içeren numunelerin kayma gerilmesinde maksimum sonuçlar vermesine paralel olarak kopma uzamasının da en yüksek olduğu görülmektedir. HNT-2 numunesi 2.33 mm kopma uzaması göstererek eğrinin altında kalan alan yani tokluğun en yüksek olduğu numune olmuştur. Buda belli miktarlarda HNT katkısının yapıştırıcının tokluğu arttırarak daha dayanımlı yapışmalı bağlantılar üretildiğini göstermektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde nano parçacık katkılarının numunelerin sertlik, tokluk, kopma uzama gibi özelliklerine direkt etki ederek numuneden elde edilen sonuçları değiştirdiği açıkça görülmektedir (Ceritbinmez ve Yapıcı, 2020; Çakır ve ark., 2021). Yapıştırıcıya HNT katkısının genel olarak kopma uzamasını arttırması yapıştırıcının daha sünek hale geldiğini göstermektedir. %3 HNT içeren numunelerde ise (HNT-3) hem kesme yükü hem de kopma uzaması ciddi manada düşmüştür. HNT parçacıklarının yapıştırıcının belli bölgelerinde topaklanması buna neden olmuş olabilir.



Şekil 4. Yük-yer değiştirme eğrileri

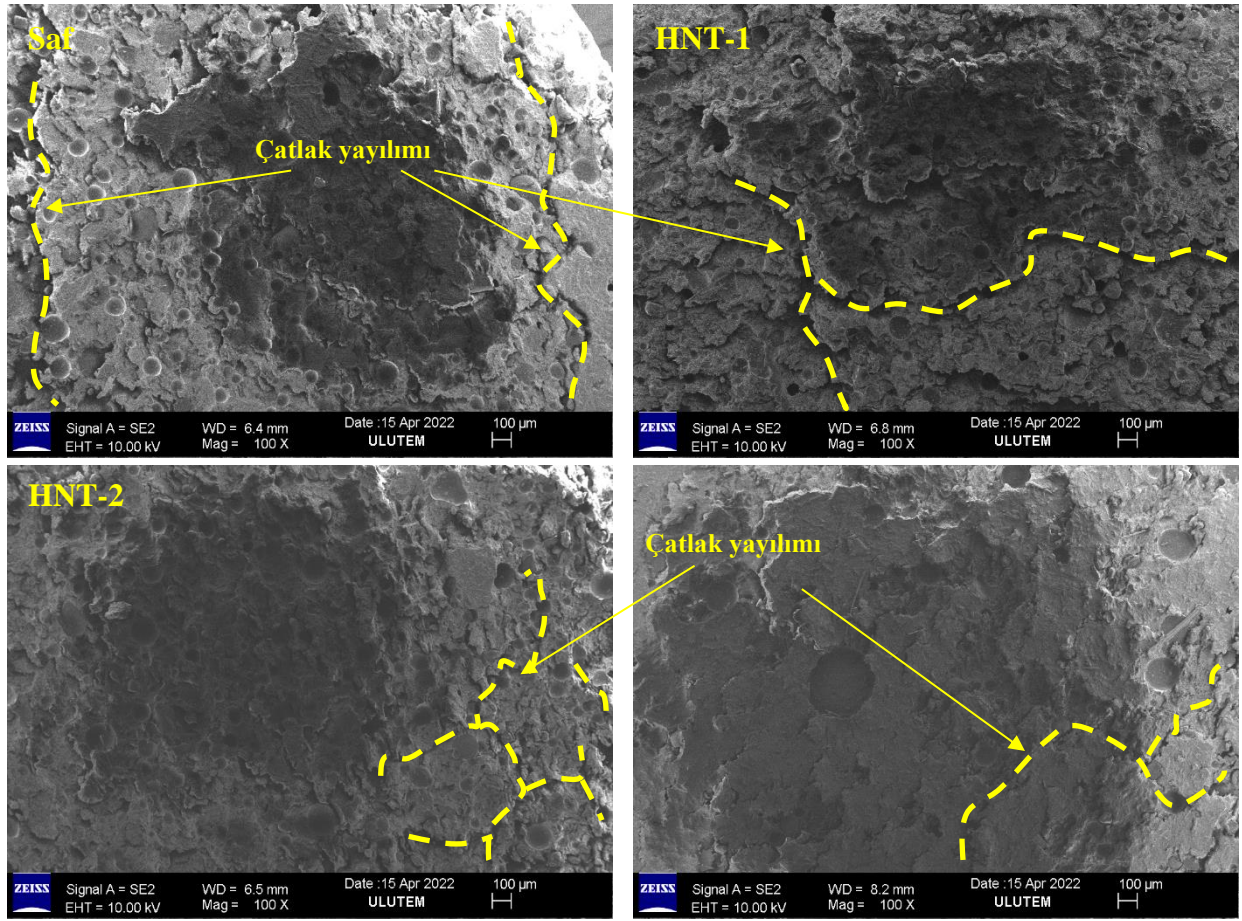
### 3.2 Hasar Analizi

Bindirme kesme testleri sonrası hasarlı numunelerin yapışan bölümleri Şekil 5.'te verilmiştir. Özellikle %2 HNT içeren numunelerde yapışkanın her iki altlığa iyi tutunduğu görünmekte olup, hasarın kohezyon kaynaklı olduğu açıktır. Bu da %2 HNT katkılı numunelerin mekanik sonuçlarda neden en yüksek değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Saf ve %3 HNT içeren numunelerde ise hasarın adezyondan kaynaklandığı dolayısıyla yapışkanın bir altlıkta kalan bölgesinin karşılığa denk gelen diğer altlık kısmında bulunmadığı açıkça görülmektedir. Ek olarak diğer numunelerde ise (HNT-1, HNT-1.5 ve HNT-2.5) hasarların karma moddan (mixed-mode) yani hem adezyon hem kohezyon hasarı olduğu gözlemlenmektedir. Açık bir şekilde HNT içermeyen saf numunelerden HNT-2 numunesine gidildikçe hasarın adezyondan kohezyona değiştiği sonrasında tekrar adezyon hasarının baskınlaştığı görülmektedir. Bu durum ayrıca mekanik sonuçlara paralel olarak kohezyon hasarı görülen numunelerde kayma dayanımının arttığını, adezyon hasarı görülen numunelerde ise dayanımın azaldığını göstermektedir.



Şekil 5. Numunelerin makro hasar görüntüleri

Saf, HNT-1, HNT-2 ve HNT-3 numunelerin hasarlı yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 6.'da sunulmaktadır. Bütün SEM görüntüleri numunelerin yapıştırıcı içeren kısımlarından alınmıştır. HNT içeren numunelerde meydana gelen çatlak yayılımları saf numunelere göre daha dağınık ve değişken yollar izlediği görülmektedir. Bu da nano parçacık içeren numunelerde gözlenen çatlak saptırma, çatlak pinlenmesi gibi tokluk mekanizmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. %3 HNT içeren numunenin (HNT-3) SEM görüntüsü diğerlerine yüzeyin daha az pürüzlü olduğu göstermekte ve daha erken koptuğuna işaret etmektedir. Nitekim mekanik sonuçlar da bu durumu desteklemektedir. Bunun sebebinin nano parçacıkların belli yerlerde yoğunlaşarak yapıştırıcının artık düzgün olmayan (non-uniform) bir nano parçacık içeriğine sahip olduğundan kaynaklı olduğu söylenebilir (Ulus ve ark., 2019). Ayrıca bu numunelerde oluşan çukurların diğerlerine göre daha büyük olduğu görülmektedir.

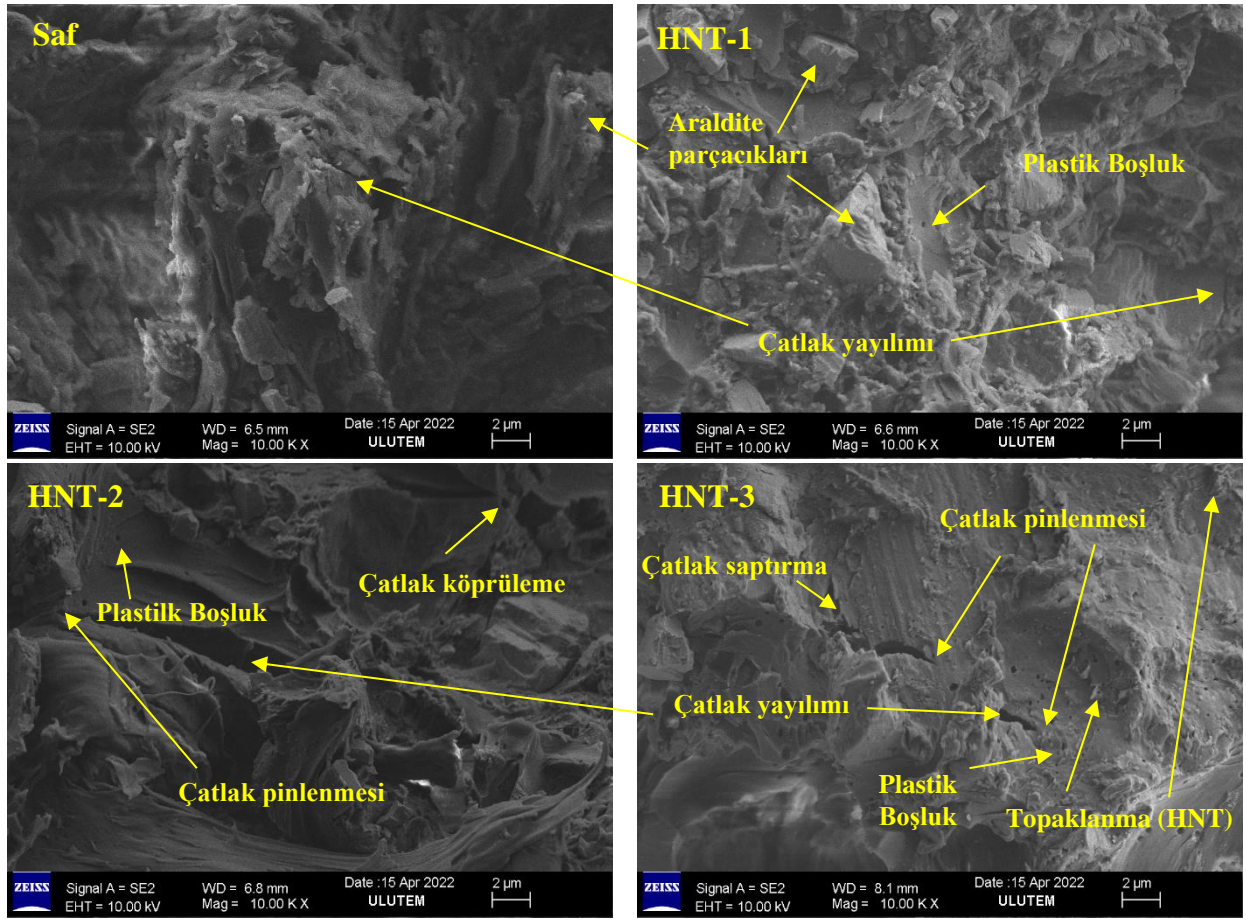


Şekil 6. Numunelerin hasarlı yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

Hasarlı numunelerin detaylı SEM görüntüleri Şekil 7.'de verilmektedir. Genel olarak hasarın mikro çatlaklar olarak başlayıp, bu çatlakların yayılması ve büyümesi ile numunelerin kopma davranışı gösterdiği düşünülmektedir. Saf ve HNT-1 numunelerinde nano parçacıklardan ziyade yapıştırıcının kendi içeriğine ait parçacıklar daha baskın görülmektedir. Bununla birlikte diğer HNT içeren numunelerde yüzey formu biraz daha farklı ve açık mikro boşluk oluşumları görülmektedir. En fazla pürüzlü yüzeylerin ve yıkıcı hasarların oluşumunun %2 HNT içeren numunelerde (HNT-2) meydana geldiği açıkça görülmektedir. Ayrıca bu numunelerde, çatlak köprüleme ve çatlak pinlenmesi gibi bazı tokluk mekanizmalarının olduğu gözlenmiştir. Bunlar özellikle çatlak



yayımlarını nano parçacıklar vasıtasıyla durdurmaya çalışan veya geciktiren mekanizmalardır. Mesela çatlak pinlenmesi, çatlak yayılımının bir parçacık ile karşılaştığında yeterli enerjiye sahip olmamasından kaynaklanarak durmasıdır veya parçacıkların çatlak yayılımını engellemesidir (Lange ve Radford, 1971). Dolayısıyla bu tür mekanizmaların oluşumu yapıştırıcının tokluğunun artmasını sağlamakta ve daha dayanımlı hale gelmesine neden olmaktadır. Literatürde nano parçacık katkılı epoksi tabanlı malzemelerde bu tür mekanizmaların oluştuğunu ve malzemelerin dayanımlarını arttırdığına dair birçok bilimsel çalışma yer almaktadır (Najimehr ve ark., 2022; De Cicco ve ark., 2017; Çakır ve Özbek, 2022). Öte yandan %3 HNT içeren numunelerde (HNT-3) HNT parçacıklarının olumlu etkisinin pek kalmadığı ve belli bölgelerde yoğunlaştığı (topaklanma) görülmektedir. Ayrıca boşluk oluşumlarının daha fazla olması da bu durumu desteklemektedir. Birçok çalışma nano parçacıkların belli miktardan fazla katkı malzemesi olarak kullanılmasının topaklanmaya ve dolayısıyla malzemelerde bozulma, dayanım düşüklüğü gibi olumsuz etkilere yol açtığını söylemektedir (Ayatollahi ve ark., 2017; Doğan ve ark., 2022).



Şekil 7. Detaylı SEM görüntüleri

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, HNT parçacıklarının yapıştırıcı ile birleştirme işlemlerinde mekanik olarak kayma özellikleri araştırılmıştır. Çeşitli ağırlık oranlarında (%1, %1.5, %2, %2.5 ve %3) Araldite 2014-2 epoksi yapıştırıcısına eklenen HNT parçacıkları ile güçlendirilmiş Al-GFRP altlıklarının yapıştırılması ile elde edilen numunelere bindirme kesme testleri uygulanmıştır. Ayrıca makro ve

SEM görüntüleri ile kırılma mekanizmaları tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- HNT parçacıkları Araldite 2014-2 epoksi türü yapıştırıcı ile uyum göstererek kayma dayanımının iyileşmesine katkıda bulunmuştur.
- Maksimum kayma dayanımı (11.76 MPa) %2 HNT parçacığı içeren numunelerde elde edilmiştir, bağlantıların kesme dayanımı saf numunelere kıyasla %30.4 iyileşme göstermiştir.
- %2'den fazla HNT parçacık katkısının numunelerin performansını azaltması, aşırı HNT eklenmesinin topaklanmaya (agglomeration) neden olmasına atfedilmiştir.
- HNT parçacıklarının yapıştırıcı kayma dayanımını arttırmasının ana nedenlerinden biri de gösterdiği tokluk mekanizmaları olmuştur. Çatlak köprüleme, çatlak saptırma ve çatlak pinlenmesi gibi mekanizmalar çatlak yönünü değiştirerek veya çatlak yayılımını durdurarak malzemenin daha dayanımlı hale gelmesine ve geç kopmasına neden olmuşlardır.

Sonuç olarak, HNT parçacık katkısının Al-GFRP altlıkların yapıştırma ile birleştirme işleminde kullanılan Araldite 2014-2 yapıştırıcıya ilave edilmesinin bağlantıların kayma özelliklerini arttıracığı kanıtlanmıştır.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından “21-13272” kodlu proje ile desteklenmiştir.

## 6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 7. YAZAR KATKISI

Özkan ÖZBEK, Mehmet Veysel ÇAKIR ve Nurettin Furkan DOĞAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelenmesi, son onay ve tam sorumluluk aşamalarında katkı sağlamışlardır.

## 8. KAYNAKLAR

- Arslan M. H., Yazman Ş., Hamad A. A., Aksoylu C., Özkılıç Y. O., Gemi L., Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored CFRP fabrics. In Structures 39, 527-542, 2022.
- Ayatollahi M. R., Nemati Giv A., Razavi S. M. J. Khoramshad H., Mechanical properties of adhesively single lap-bonded joints reinforced with multi-walled carbon nanotubes and silica nanoparticles. The Journal of Adhesion 93(11), 896-913, 2017.
- Banea M. D., da Silva L. F., Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 223(1), 1-18, 2009.
- Bulut M., Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets. Composites Part B: Engineering 122, 71-78, 2017.

- Cakir M. V., Kinay D., MWCNT, nano-silica, and nano-clay additives effects on adhesion performance of dissimilar materials bonded joints. *Polymer Composites* 42(11), 5880-5892, 2021.
- Ceritbinmez F., Yapici A., An investigation on cutting of the MWCNTs-doped composite plates by AWJ. *Arabian Journal for Science and Engineering* 45(7), 5129-5141, 2020.
- Çakır M. V., Erkliğ A., Ahmed B. F., Graphene nanoparticle effect on flexural and shear behaviors of adhesively bonded single lap joints of GFRP composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 43(4), 1-11, 2021.
- Çakır M. V., Özbek, Ö., Mechanical performance and damage analysis of GNP-reinforced adhesively bonded joints under shear and bending loads. *The Journal of Adhesion* 1-24, 2022.
- De Cicco D., Asaee Z., Taheri, F., Use of nanoparticles for enhancing the interlaminar properties of fiber-reinforced composites and adhesively bonded joints-A review. *Nanomaterials* 7(11), 360, 2017.
- Deng S., Zhang J., Ye L., Wu, J., Toughening epoxies with halloysite nanotubes. *Polymer* 49(23), 5119-5127, 2008.
- Doğan N. F., Özbek Ö., Erkliğ A., Effect of graphene nanoplatelets on mechanical and impact properties of an aramid/glass-reinforced epoxy composite. *Materials Testing* 64(4), 490-501, 2022.
- Galińska A., Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals-A review. Part I: Bolted joining. *Polymers* 12(10), 2252, 2020.
- Gemi D. S., Şahin Ö. S., Gemi L., Experimental investigation of axial compression behavior after low velocity impact of glass fiber reinforced filament wound pipes with different diameter. *Composite Structures* 280, 114929, 2022.
- Gemi L., Madenci E., Özkılıç Y. O., Experimental, analytical and numerical investigation of pultruded GFRP composite beams infilled with hybrid FRP reinforced concrete. *Engineering Structures* 244, 112790, 2021.
- Hanid N. A., Wahit M. U., Guo Q., Mahmoodian S., Soheilmoghaddam M., Development of regenerated cellulose/halloysites nanocomposites via ionic liquids. *Carbohydrate polymers* 99, 91-97, 2014.
- Jiang B., Chen Q., Yang J., Advances in joining technology of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite materials and aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 110(9), 2631-2649, 2020.
- Kaw A. K., *Mechanics of composite materials*. CRC press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2005.
- Kaybal H. B., Ulus H., Avcı A., Seawater Aged Basalt/Epoxy Composites: Improved Bearing Performance with Halloysite Nanotube Reinforcement. *Fibers and Polymers* 22(6), 1643-1652, 2021.
- Lange F. F., Radford K. C. Fracture energy of an epoxy composite system. *Journal of Materials Science* 6(9), 1197-1203, 1971.
- Liu P. F., Liu J. W., Finite element analysis of competitive damage mechanisms of composite scarf adhesive joints by considering thickness effect. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 103347, 2022.

- Masson J., Gigliotti M., Grandidier J. C., Delozanne J., Albouy W., Dagorn N., Numerical method to assess the stress state and gradients induced by thermo-oxidation in adhesively bonded joints for aircraft engine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 113, 103063, 2022.
- Nagaraja K. C., Rajanna S., Prakash G. S., Rajeshkumar G., Improvement of mechanical and thermal properties of hybrid composites through addition of halloysite nanoclay for light weight structural applications. *Journal of Industrial Textiles* 1528083720936624, 2020.
- NajiMehr H., Shariati M., Zamani P., Da Silva L. F., Ghahremani Moghadam D., Investigating on the influence of multi-walled carbon nanotube and graphene nanoplatelet additives on residual strength of bonded joints subjected to partial fatigue loading. *Journal of Applied Polymer Science* 139(18), 52069, 2022.
- Oguz Z. A., Erklig A., Bozkurt Ö. Y., Degradation of hybrid aramid/glass/epoxy composites hydrothermally aged in distilled water. *Journal of Composite Materials* 55(15), 2043-2060, 2021.
- Oğuz Z. A., Erkliğ A., Water absorption parameters of glass/epoxy composites based on dimension effect. *International Advanced Researches and Engineering Journal* 5(2), 202-208, 2021.
- Razavi S. M. J., Ayatollahi M. R., Giv A. N., Khoramishad H., Single lap joints bonded with structural adhesives reinforced with a mixture of silica nanoparticles and multi walled carbon nanotubes. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 80, 76-86, 2018.
- Romanov V. S., Lomov S. V., Verpoest I., Gorbatikh L., Stress magnification due to carbon nanotube agglomeration in composites. *Composite Structures* 133, 246-256, 2015.
- Soltannia B., Taheri F., Influence of nano-reinforcement on the mechanical behavior of adhesively bonded single-lap joints subjected to static, quasi-static, and impact loading. *Journal of Adhesion Science and Technology* 29(5), 424-442, 2015.
- Ulus H., Kaybal H. B., Eskizeybek V., Avcı A., Enhanced salty water durability of halloysite nanotube reinforced epoxy/basalt fiber hybrid composites. *Fibers and Polymers* 20(10), 2184-2199, 2019.
- Ulus H., Kaybal H. B., Eskizeybek V., Avcı A., Halloysite nanotube reinforcement endows ameliorated fracture resistance of seawater aged basalt/epoxy composites. *Journal of composite materials* 54(20), 2761-2779, 2020.
- Ye Y., Chen H., Wu J., Chan C. M., Interlaminar properties of carbon fiber composites with halloysite nanotube-toughened epoxy matrix. *Composites Science and Technology* 71(5), 717-723, 2011.
- Yuan P., Tan D., Annabi-Bergaya F., Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects. *Applied Clay Science* 112, 75-93, 2015.