

Hibrit Kompozit Yapılarda Nanokil İlavesinin Darbe Davranışına EtkisiÜmran ESENDEMİR^{1*}, Recep ŞİMŞEK², Mehmet Fahri SARAÇ¹

ÖZET: Bu çalışmada, üç farklı konsantrasyonda (%0, %1, ve %5) amino ve silan ile fonksiyonellendirilmiş nanokil ilaveli cam/aramid elyaf takviyeli epoksi hibrit kompozit plakaların darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Darbe testleri ağırlık düşürme prensibi ile çalışan CEAST Fractovis Plus darbe cihazı kullanılarak yapılmış olup testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kuvvet-çökme, absorbe edilen enerji-zaman, hız-zaman ve kuvvet-zaman eğrileri çizilmiş ve her bir eğri kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak tüm darbe enerjileri için %1 nanokil takviyeli kompozit numunelerin, %0 ve %5 nanokil içeren kompozit numunelere nazaran darbe direncinin daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm nanokil oranları için hem darbe uygulanan üst yüzeyde hem de alt yüzeyde hasar bölgesinin artan darbe enerjisi ile arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanokil, darbe enerjisi, hibrit kompozit, düşük hızlı darbe, hasar

Effect of Nanoclay Addition on Impact Behavior on Hybrid Composite Structures

ABSTRACT: In this study, the impact behavior of three different concentrations (0%, 1% and 5%) of amine ve silane functionalized nanoclay added glass/aramid fiber reinforced epoxy hybrid composite plates were experimentally investigated. Impact tests were performed using CEAST Fractovis Plus impact instrument, which works on the principle of vertical dropped weight impact at room temperature. Force-deflection, absorbed energy-time, velocity-time and force-time curves were drawn and each curve was compared against each other. For all impact energies, it was found that 1% nanoclay added hybrid composites had better impact properties than 0% and 5% nanoclay added hybrid composites. As a result, it was seen that the damage zone increased with increasing impact energy both on the impacted surface and on the lower surface for pure and nanoclay added hybrid composites.

Keywords: Nanoclay, impact energy, hybrid composite, low velocity impact, damage

¹ Ümran ESENDEMİR (Orcid ID: 0000-0001-6947-9310), Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260 Isparta, Türkiye

² Recep ŞİMŞEK (Orcid ID: 0000-0002-8425-4862), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 32260 Isparta, Türkiye

³ Mehmet Fahri SARAÇ (Orcid ID: 0000-0002-0760-5569), Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260 Isparta, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ümran Esendemir, e-mail: umranesendemir@sdu.edu.tr

GİRİŞ

Klasik mühendislik malzemelerin yerini alan kompozit malzemeler genel olarak üzerlerine gelen darbe yüklerini sönmüleyebildiklerinden darbe dayanımları daha gelişmiş özellikler kazanmıştır. Özellikle havacılık, otomobil, uzay ve savunma sanayinde giderek artan oranda kullanılan kompozitler farklı darbe enerjilerine maruz kalması nedeni ile kompozit malzemelerin yapısı ve içerikleri gitgide önemini arttırmaktadır (Sayer, 2009).

Darbe esnasında, kompozit malzemelerin iç yapısında ortaya çıkan matris çatlağı, fiber kopması veya delaminasyon gibi hasar türleri yapının yük taşıma kapasitesini önemli derecede azaltır. Dışarıdan gözle yapılan rutin kontrollerde sadece küçük bir çatlak şeklinde görünen veya hiç görünmeyen bu hasarlar, kompozit matrisinin görevini yerine getirememesine ve yorulma hasarlarının normal süresinden önce ortaya çıkmasına sebep olabilir (Fidan ve ark., 2011).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda; Rahman ve ark. (2018) aramid (keklar)-epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe direnci üzerine nanokil ve gargen ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Analizler nanokilin grafene göre darbe dirençleri açısından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Özellikle darbe direnci nanokil ilavesinde % 29 olan artış grafen ilavesinde %7 düzeyinde görülmüştür. Ayrıca nanokil oranı arttıkça (%2, %5 ve %10 ağı.) absorbe edilen enerjinin de arttığını belirtmişlerdir. Rafiq ve ark. (2017) cam elyaf kumaş takviyeli epoksi kompozit malzemelerin darbe dirençlerine nanokil ilavesinin(%1.5 ve %3 ağı.) etkisini incelediklerinde %1.5 ağı. nanokil ilave edilmiş kompozit numunelerde çekme mukavemetinde %23'lük bir iyileşmenin yanında sertlik değerlerinde %11'lik bir artış varlığından söz edilmiştir. Fakat %3'lük nanokil ilaveye sahip numunelerde topaklaşma görüldüğü rapor edilmiştir. Singh ve ark. (2017) etilen propilen dien monomeri (EPDM) içeren epoksi-cam elyaf takviyeli nanokompozitlerde %1 ağı. nanokil ve %2.5-10 ağı. oranlarında EPDM ile güçlendirilmiş yapıların darbe davranışlarını incelemişlerdir. Maksimum darbe dayanımının %5 EPDM'li numunelerde görüldüğü belirtilmiştir. Bahari-Sambran ve ark. (2018) ise farklı ağırlık yüzdelerindeki nanokil (%0, %1, %3, %5 ağı.) ilaveli epoksi/metal matrisli kompozitlerde %3 ağı. nanokil ilavesinde eğilme ve darbe davranışlarının daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Mahdi ve ark. (2017) ise hibrit bir karışım olarak karbon nanotüp ve nanokilli kompozit numunelerde farklı darbe enerjileri uyguladıkları numunelerde %0.1 ağı. karbon nanotüp ve %2 ağı. nanokil içeren numunelerin darbe direncine daha dayanıklı olduklarını belirtmişlerdir. Kaştan ve ark. (2015) ise %1, %3 ve %5 ağı. nanokil ilavesi ile kompozit yapıların elastisite modüllerinde sırasıyla %13, %38,6 ve %63 artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Kaştan ve ark. (2017) bir sonraki çalışmalarında ise matris malzeme olarak poliamid 6 (PA 6)'ya ilave edilen yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), nanokil (modifiye edilmiş Montmorillonite) ve Maleic Anhidrid Aşılınmış Polietilen (PE-g-MA) ile üretilen kompozitin termal özelliklerine olan etkileri incelendiğinde nanokilin eklenmesinin genel olarak ergime sıcaklığını yükselttiğini belirtmişlerdir. Ferreira ve ark. (2012), nanokil katkılı epoksi ile güçlendirilen keklar kompozitlerin yorulma davranışlarını incelemiş olup nanokilin epoksi içindeki artışı statik mukavemeti azalttığını ve sertliğini arttırdığını belirtmişlerdir. Nanokil katkılı kompozitin çekme ve yorulma dayanımının nanokil katkısız kompozite göre %12 daha iyi olduğunu fakat üç nokta eğilmeli yorulma davranışlarının ise daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Uyaner ve ark. (2007), cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde plaka kalınlığının darbe direncine etkisini incelediklerinde ise tabaka kalınlığının artması ile malzeme üzerindeki çökme miktarının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Günümüzde otomotiv sektöründen savunma sanayisine kadar geniş bir yelpazede giderek artan bir talepte kullanılan kompozit malzemelerin mukavemetini arttırmak üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda oldukça yoğun bir şekilde devam etmektedir. Fakat literatürde cam/aramid elyaf (hibrit)

kompozitlerin fonksiyonelleştirilmiş nanokil ilavesi ile darbe davranışlarının incelendiği bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmada fonksiyonellendirilmiş (silan ve amino terminal gruplu) üç farklı ağırlıktaki nanokil ilavesinin (%0, %1 ve %5) cam/aramid hibrit kompozit yapılarına uygulanan düşük enerjili (10J ve 20J) darbe davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Yukarıdaki belirtilen çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, yüksek dispersiyon ve homojenlik sağlayan amin ve silan fonksiyonel grubu içeren montmorillonit nanokillerin ilavesinin epoksiler ile karışımı ile hazırlanan hibrit kompozitlerin muadil kompozitlerden daha yüksek darbe direncine ulaşılması beklenmektedir. Farklı konsantrasyonlarda (%0, %1 ve %5) ve iki farklı tabaka kalınlığında (12 ve 20) yapılan darbe test sonuçları kuvvet-çökme, hız-zaman, absorbe edilen enerji-zaman, maksimum kuvvet-maksimum çökme eğrilerinin yanı sıra sertlik ve morfolojik görüntüler ile karşılaştırılmıştır.

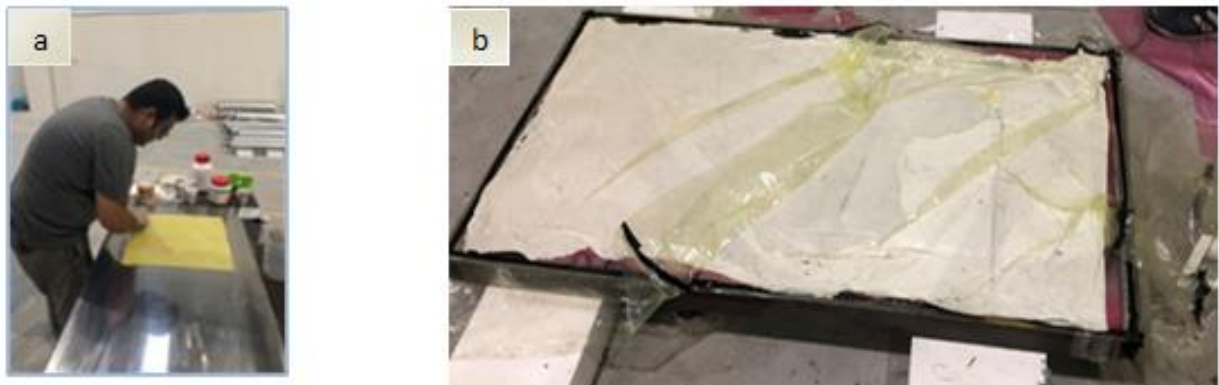
MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Elyaf kumaş olarak Dupont, Türkiye firmasının ürettiği 207 g/m² yoğunluğa sahip örgü aramid (Kevlar-49) ile 300 g/m² yoğunluğa sahip örgü cam elyaf kumaş kullanılmıştır. Kompozitsan (İzmir) firmasından matris malzemesi olarak F-1564 epoksi ve F-3486 reçine sertleştiricisi temin edilmiştir. Matris malzemesi epoksi, sertleştirici ve nanokil olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Takviye malzemesi olarak belirlenen yaklaşık 20µm partikül boyutundan küçük nanokil ise Sigma Aldrich'ten (yüzeyi modifiye edilmiş, ağırlıkça %0.5-5 aminopropiltrioksasilan, %15-35 oktadesilamin) alınmıştır.

Hibrit Kompozit Malzeme Üretimi

Hibrit kompozit plaka üretimi detaylı olarak Usal ve ark. (2020) yaptıkları çalışma da detaylıca belirtilmiştir. Özetle, darbe testi numuneleri 100x100 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Epoksi miktarı elyaf/epoksi oranı 1:1 oranı alınarak hesaplanmıştır. Belirlenen ağırlık oranına göre hesaplanan epoksi içerisine (sertleştirici dahil) %0, %1 ve %5 oranlarında nanokil ilave edilmiştir. MS 3040D model mekanik karıştırıcı ile 1250 devirde 1 dakika karıştırılan nanokil ilaveli epoksiler 3 kat aramid ve 1 kat örgü cam elyaf sıralaması olacak biçimde toplamda 12 katman (K3/C1/K3/C1/K3/C1) hibrit kompozit plaka el yatırma yöntemi ile üretilmiştir (Şekil 1a). Hazırlanan numuneler katmanları arasında hava boşluğunu gidermek için 12 saat vakumlama (Şekil 1b) ve ısıl işleme (90°C sıcaklıkta 1 saat süre ile) tabii tutulmuştur. Ayrıca tabaka kalınlığının etkisini de araştırmak için 20 tabakalı (K3/C1/K3/C1/K3/C1/K3/C1/K3/C1) kompozit plaka da üretilmiştir. Her bir set numuneden üçer adet üretilmiş olup 12 ve 20 katmanlı numunelerin tabaka kalınlığı sırası ile 9.5 mm ± %5 ve 16 mm ± %5 (standart sapma) ortalama değerlerindedir.



Şekil 1. Kompozit plakaların (a) hazırlanması, (b) vakumlama işlemine tabii tutulması

Darbe Testleri

Hibrit kompozitin düşük hızlı darbe testleri oda sıcaklığında serbest ağırlık düşürme prensibine göre çalışan yer tipi sistem kontrollü ve yüksek hızlı çalışan Fractovis Plus marka darbe test cihazında yapılmıştır (Şekil 2). Testler sırasında kullanılan 4.926 kg kütleli vurucunun ucu yarım küre şeklinde olup 12.7 mm çapa sahiptir. Uygulanan darbe enerjisine göre vurma anında vurucunun hızı 10J için 2.85 m/s ve 20 J için 3.49 m/s olarak verilmiştir.



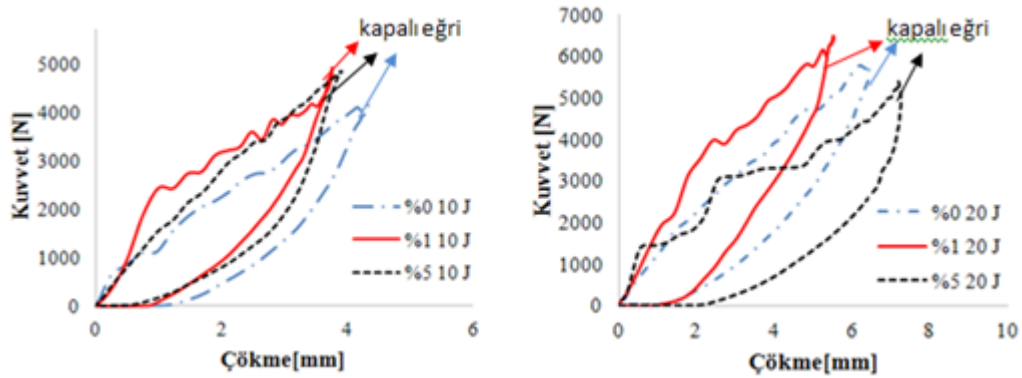
Şekil 2. Serbest Düşme Darbe test cihazı

BULGULAR VE TARTIŞMA

Darbe deneyleri farklı nanokil oranlarına sahip kompozit plakalar için 10J ve 20J enerji değerlerinde yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda kompozit plakalara ait kuvvet -çökme eğrileri çizilmiştir (Şekil 3). Kuvvet-çökme eğrileri kapalı ve açık eğri olarak iki tip eğri biçiminde bulunmaktadır. Kapalı eğri biçiminde görülen darbe enerjisi; numuneyi tam nüfuziyet şeklinde hasarına uğratmadığı için darbe ucu numuneden ilk konumuna geri dönmektedir. Darbe ucunun numuneden geri çıkması ile kuvvet-yer değiştirme eğrisi kapanır. Kısacası numune uygulanan darbe enerjisinin bir kısmını elastik enerji olarak harcayabilmektedir. Açık eğri biçiminde ise uygulanan darbe enerjisi numunenin tam nüfuziyete neden olabilecek bir enerji seviyesidir ki bu enerji seviyesinde darbe yüklemesi sonrası darbe ucu numuneden geri dönemez (Fidan ve ark., 2010).

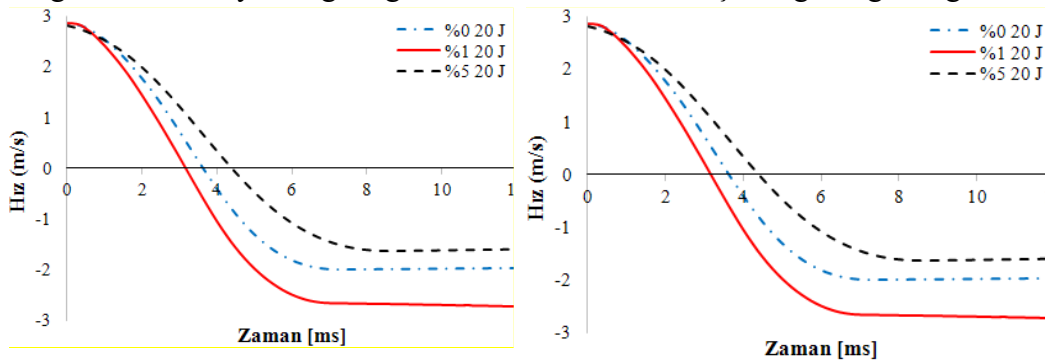
Şekil 3'deki kuvvet-çökme eğrileri incelendiğinde, farklı nanokil oranları için her iki darbe enerjisi değeri için de numunelerinin benzer darbe davranışı gösterdikleri görülmektedir. Kuvvet-çökme eğrilerinin tamamı kapalı bir eğri oluşturmuştur. Eğrinin kapalı olması vurucunun numuneye darbe uyguladıktan sonra numunede herhangi bir delinmenin oluşmadığı anlamına gelmektedir. İki farklı darbe enerji değerlerinde (10J ve 20J), %1 nanokil ilaveli plakaların %0 ve %5'e göre daha fazla

maksimum kuvvet taşıdığı görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisi arttıkça kapalı tip eğrinin genişlediği görülmektedir. Bu durum numunedeki deformasyonun ilerlediğinin de bir göstergesidir.



Şekil 3. Farklı nanokil oranlarına göre 10J ve 20J darbe enerjisi uygulanan kompozit numunelerin kuvvet-çökme eğrileri

Şekil 4'de 10J ve 20J darbe enerjisi altında test edilen %0, %1, %5 nanokil ilaveli kompozit plakaların hız-zaman eğrileri verilmiştir. Tüm nanokil oranları ve darbe enerjileri için kompozit plakaların hız-zaman grafiğindeki eğriler negatif bölgeye geçmişlerdir. Bu durum belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile temasından sonra hızında azalma oluştuğu ve vurucunun ters yönde hızlanması ile geri sekme meydana geldiğini ve delinme hasarı oluşmadığının göstergesidir.

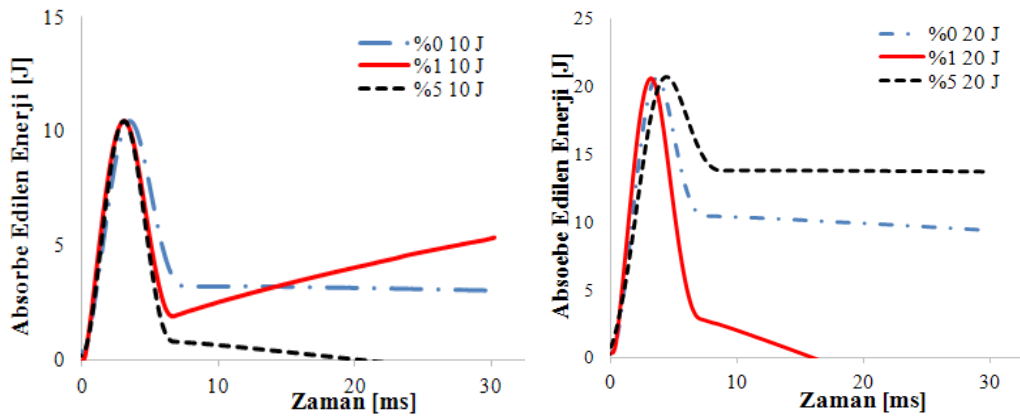


Şekil 4. Farklı nanokil oranlarına göre 10J ve 20J darbe enerjisi uygulanan kompozit numunelerin hız-zaman eğrileri

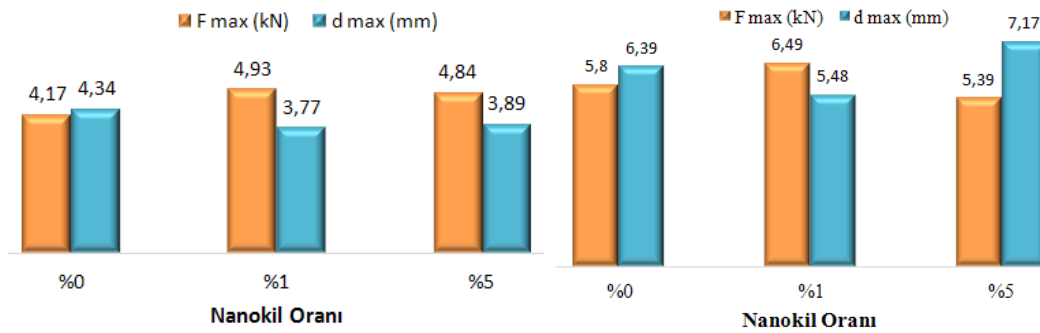
Şekil 5'de ise %0, %1, %5 ağ. nanokil ilaveli kompozit plakaların absorbe edilen enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Uygulanan darbe enerjisinin büyük ölçüde numune tarafından absorbe edildiği, diğer taraftan absorbe edilmeyen enerjinin ise geri sekme oluşturduğundan numunede herhangi bir delinme hasarı meydana getirmemiştir.

10J darbe enerjisi için %1 ağ. ve %5 ağ. nanokil ilaveli numunenin %0 ağ. nanokil ilaveli numunelere oranla daha az enerji absorbe ettiği görülmektedir. Ayrıca, 20J darbe enerjisi için ağırlıkça %1 nanokil ilaveli numunenin %0 ağ. ve %5 ağ. nanokil ilaveli numunelere oranla çok daha az enerji absorbe ettiği gözlemlenmiştir. Genel olarak nanokil ilavesi tabakalar arası kayma mukavemetini artırdığından dolayı tabakaların enerji emme kapasitesini azaltmaktadır. Bu sonuç literatürle uyumludur. Alomari ve ark., (2013) nanokilin tabakalar arası kayma dayanımını artırdığı için delaminasyonu azalttığını buna bağlı olarak da absorbe edilen enerjiyi azalttığı öngörüsünü doğrulamaktadır.

Şekil 6'da ise %0, %1, %5 nanokil ilaveli kompozit plakaların 10J ve 20J darbe enerjileri için maksimum kuvvet-maksimum çökme grafikleri verilmiştir. Nanokil ilavesi %1 olan plakalar en çok yük taşıma sağlar iken %1'den daha fazla nanokil ilavesinde numunelerin yük taşıma kapasitelerinin azaldığı görülmektedir. %1 ağ. nanokil ilavesi sertliği artırarak çökmede azalmaya neden olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 5. Farklı nanokil oranlarına göre 10J ve 20J darbe enerjisi uygulanan kompozit numunelerin absorbe edilen enerji-zaman eğrileri



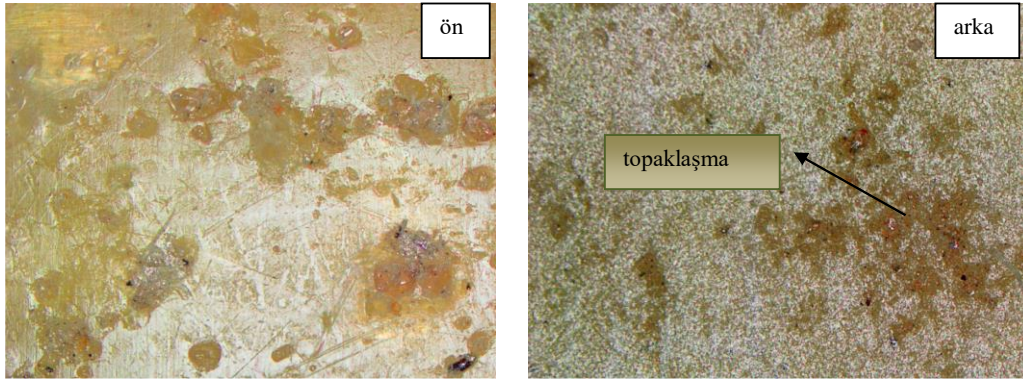
Şekil 6. 20J darbe enerjisi altında %0, %1, %5 nanokil ilaveli numunelerin maksimum kuvvet-maksimum çökme grafikleri

Çizelge 1’de %0, %1, %5 nanokil ilaveli kompozit plakaların Vickers sertlik değerleri verilmiştir (Şimşek, 2019). Rafiq ve ark., (2017) yaptıkları çalışmasında da bilindiği üzere %1,5 nanokil ilaveli kompozitin sertliğinin %3 nanokil ilaveli kompozitin sertliğine göre daha çok olması epoksi içerisindeki kilin topaklanması kaynaklı olduğu belirtilmişti. Reçine ve aramid/cam elyaflar arasındaki yapışmayı azaltan mikro boşluklarında sertliği azalmasına sebep olduğunu da ayrıca gözlemlemişlerdi. Mevcut durum %1 ağırlık nanokil içeren kompozit plakalarda yüksek sertlik değerlerine çıkılması ile doğrulanmıştır. %1 ağırlık üzerinde eklenen nanokil ilavesinin kompozit plakalarda darbe direncinin yanı sıra sertliğini de düşürdüğü ve bununla nanokil etkisi ile elyaf/epoksi boşluklarına sebebiyet verdiği şeklinde yorumlanmaktadır.

Çizelge 1. Farklı nanokil oranlarına sahip kompozit plakaların Vickers sertlik değerleri (HV)

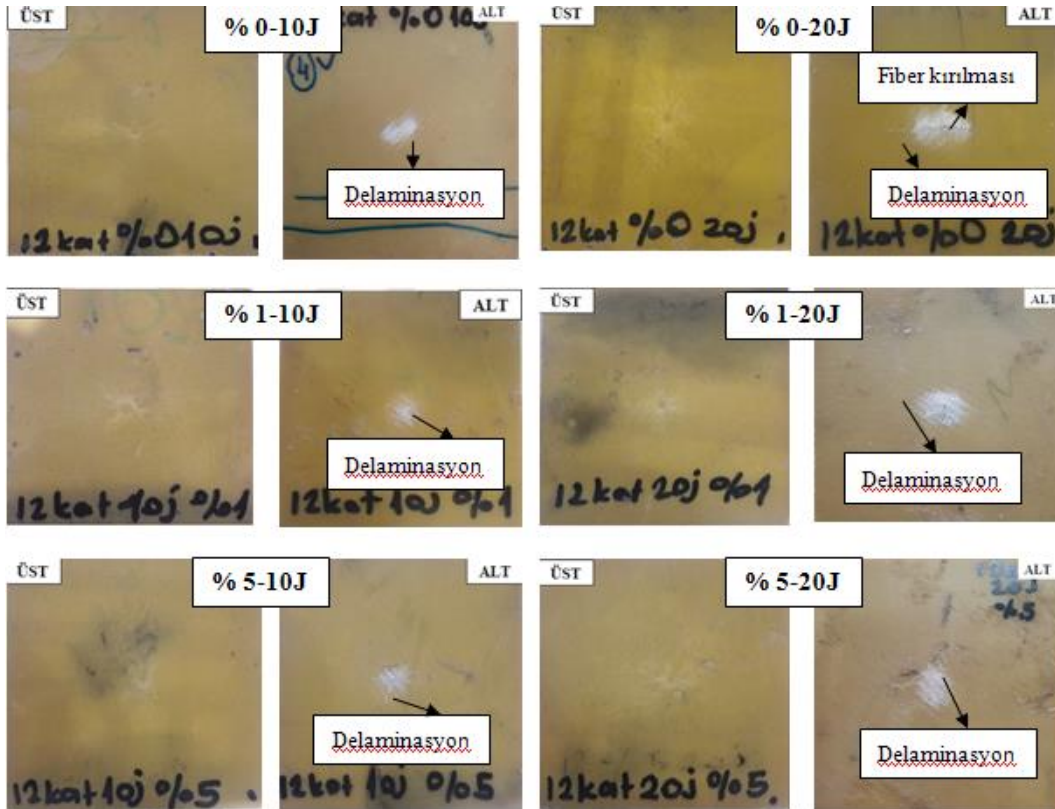
Vicker Sertlik değerleri	%0 ağırlık.	%1 ağırlık.	%5 ağırlık.
	21,75	23,60	21,00

Şekil 7’de %5 nanokil ilaveli kompozit plakalarda üst ve alt yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Darbe testlerde elde edilen sonuçları doğrulayan mikroyapı görüntülerinde nanokil tabakasının matris içerisinde ayrılarak düzgün bir şekilde dağılmamasından dolayı darbe esnasında yükün homojen deformasyon ve yük dağılımını sağlamadığını ispatlamaktadır.



Şekil 7. %5 ağ. nanokil içeren hibrit kompozit yapının ön ve arka yüzeylerine ait optik görüntüsü

Şekil 8'de 10J ve 20 J darbe enerjisi uygulanan farklı nanokil oranlarındaki plakaların darbe sonrası üst ve alt yüzey hasar fotoğrafları görülmektedir. Nanokil ilavesinin delaminasyonları azalttığı görülmüştür. Bu azalma en fazla ağırlıkça %1 nanokil oranına sahip plakalarda görülmüştür. Alomari ve ark., (2013), yaptıkları çalışma sonucunda da düşük nanokil ilaveli numunelerdeki delaminasyonun daha yüksek nanokil oranlı numunelere göre daha az olduğu sonucunu doğrulamaktadır.

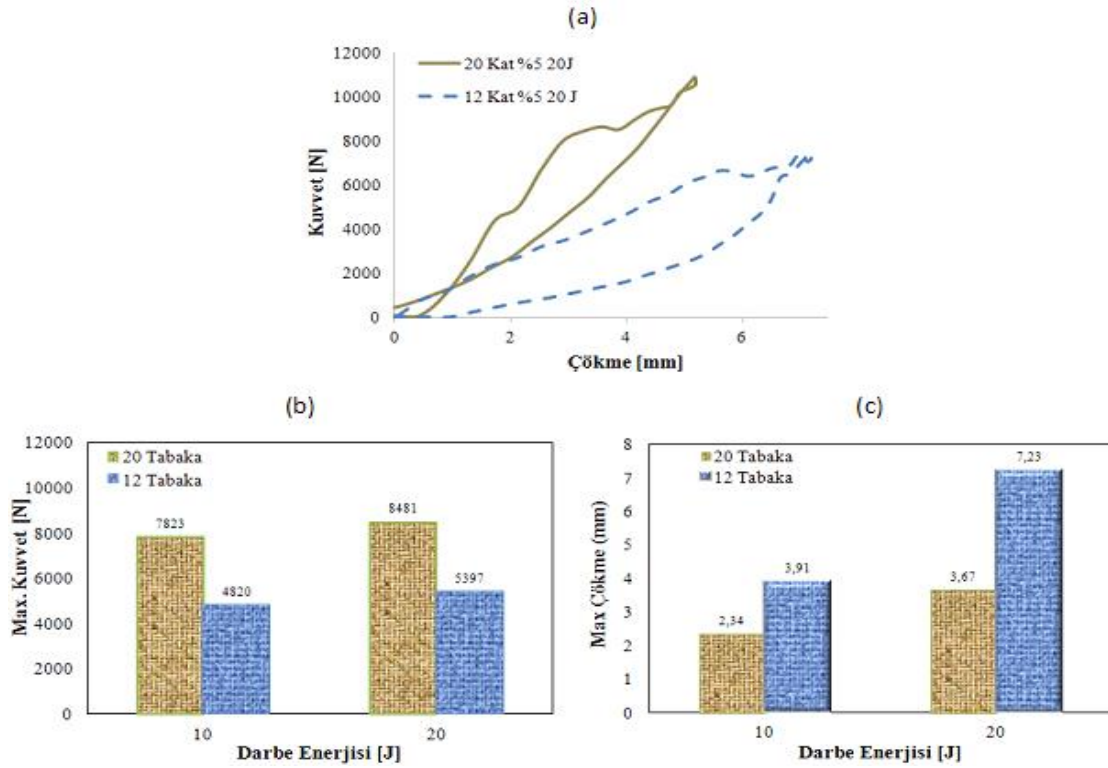


Şekil 8. 10J ve 20J darbe enerjisi uygulanan numunelerin darbe sonrası üst ve alt yüzey hasar fotoğrafları

Şekil 9'da ise %5 nanokil oranına sahip farklı tabaka kalınlıklarına sahip (12 ($K^3/C^1/K^3/C^1/K^3/C^1$) ve 20 tabakalı ($K^3/C^1/K^3/C^1/K^3/C^1/K^3/C^1/K^3/C^1$)) kompozitlerin 20J darbe enerjisi altında (a) kuvvet-çökme, (b) maksimum kuvvet, (c) maksimum çökme grafikleri verilmiştir.

Şekil 9a'da kuvvet-çökme grafikleri incelendiğinde her iki tabaka içinde eğrinin kapalı olduğu görülmüştür. Eğrinin kapalı olması tabaka kalınlığında artması ile beraber vurucunun kompozit numune yüzeyinden geri sekme yaptığının ve numunenin daha az hasara uğradığının göstergesidir. Şekil 9b-c'de ise 12 tabakalı numunelerin çökme değerlerinin, 20 tabakalı numunelerin çökme değerlerine nazaran daha fazla olduğu ve 20 tabakalı numunenin yük taşıma kapasitesinin (maksimum kuvvet) daha fazla

olduğu görülmektedir. Tabaka sayısı arttıkça; plaka kalınlığı artmakta buna bağlı olarak da çökme değerleri azalmakta ve darbe dayanımı artmaktadır. Naik ve ark., (2000) yaptıkları çalışma da plaka kalınlığı artması sonucu çökmelerin azalması ve yük taşıma kapasitelerinin artması sonucu ile uyumlu bir sonuç göstermiştir.



Şekil 9. 20J darbe uygulanan %5 nanokil oranına sahip 12 ve 20 tabakalı kompozitlerin (a) kuvvet-çökme, (b) darbe enerjisi- maksimum kuvvet, (c) darbe enerjisi-maksimum çökme grafikleri

SONUÇ

Fonksiyonelleştirilmiş nanokil (silan ve amine gruplu) ilaveli cam/aramid elyaf-epoksi (hibrit) kompozit plakalar 10J ve 20J darbe enerjilerinde darbe testlerine tabi tutulmuşlardır. Yapılan darbe testleri sonucunda hibrit kompozit plakaların darbe davranışları hakkında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Hibrit kompozit plakalarda, tüm nanokil oranlarında düşük darbe enerjileri için darbe uygulanan yüzeylerde ilk önce ezilme izi ve delaminasyon ile başlayan hasar modu, darbe enerjisinin artmasıyla birlikte fiber kırılmalarının olduğu hasar moduna dönüşmektedir.
- Tüm nanokil oranları için darbe enerjisi arttıkça maksimum kuvvet ve çökme miktarı artmaktadır.
- Tüm nanokil oranları için kompozit plakaların darbe uygulanan üst yüzeyindeki hasar alanı darbe uygulanmayan alt yüzeyin hasar alanından daha küçüktür.
- Tüm nanokil oranları için hem darbe uygulanan üst yüzeyde hem de arka yüzeyde darbe alanı artan darbe enerjisi ile artmıştır.
- Kompozit plakalara sırası ile 10J ve 20J darbe enerjisinde yapılan deneyler sonucunda %1 ağ. nanokil ilaveli numunelerin çökme değerleri %14 ve %14, %5 ağ. nanokil ilaveli numunelerin çökme değeri de %9 azaltırken diğerinde %13 oranında artmıştır.
- Kompozit plakalara sırası ile 10J ve 20J darbe enerjisi uygulandığında %1 ağ. nanokil ilavesinde yük taşıma kapasitesini %19 ve %13 oranında; %5 ağ. nanokil ilavesi de plakaların yük taşıma kapasitesini %16 ve %5 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.

- %1 ağırlık oranında nanokil ilave edilen hibrit kompozitlerin sertliği nanokil ilavesiz kompozite göre %9 oranında artış sağlarken %5 ağırlık nanokil ilave edilen hibrit kompozitin sertliği de nanokil ilavesiz kompozite göre %4 oranında azalmıştır.
- Nanokilin tabakalar arası kayma dayanımının artırarak delaminasyonu azalttığı görülmüştür. Bu azalma en belirgin olarak %1 ağırlık nanokile sahip hibrit kompozitte görülmüştür.
- 20 tabakalı kompozit plakaların çökme değeri 12 tabakalı numunelere göre 10J darbe enerjisi için yaklaşık % 59.84; 20J darbe enerjisi için ise %50.76 daha küçüktür. Plaka kalınlığı azaldıkça yük taşıma kapasitesi düşmekte ve çökme değerleri artmakta dolayısıyla darbe dayanımı azalmaktadır.
- Darbe enerjisi azaldıkça maksimum kuvvet (12 tabakalı plakalar için yaklaşık %92.24 ve 20 tabakalı plakalar için %89.3) ve çökme miktarı (12 tabakalı plakalar için yaklaşık % 63.7; 20 tabakalı plakalar için %54) azalmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alomari A, Aldajah S, Hayek S, Moustafa K, Haik Y, 2013. Experimental investigation of the low speed impact characteristics of nanocomposites, *Materials Design*, 47, 836-841.
- Bahari-Sambran F, Eslami-Farsani R, Chirani SA, 2018. The flexural and impact behavior of the laminated aluminum-epoxy/basalt fibers composites containing nanoclay: An experimental investigation, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 1-21.
- Ferreira JAM, Reis P, Costa JDM, Richardson MOW, 2012. Fatigue behaviour of kevlar composites with nanoclay-filled epoxy resin. *Journal of Composite Materials*, 47 (15), 1885-1895.
- Fidan S, Sımmazçelik T, Bora MÖ, Çoban O, 2010. Düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu kompozit malzemelerde ortaya çıkan hasar mekanizmaları, *Mühendis ve Makine*, 51 (611), 1-8.
- Fidan S, Avcu E, Sımmazçelik T, 2011. Cam fiber takviyeli polyester kompozitte tekrarlı darbe yüklemeleriyle oluşan hasar mekanizmaları, I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 17-19 Kasım 2011.
- Kaştan A, Yalçın Y, Ünal H, Talaş Ş, 2015. PA 6/ YYPE / Nanokil kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15 (1), 9-20.
- Kaştan A, Yalçın Y, Talaş Ş, 2016. Nano katkıların polimerlerin sürtünme katsayısına etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 231-243.
- Kaştan A, Yalçın Y, Ünal H, Talaş Ş, 2017. Nanokil katkılı poliamid 6 / yüksek yoğunluklu polietilen kompozitlerin termal özelliklerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32:1, 89-99
- Mahdi TH, Islam ME, Hosur MV, Jeelani S, 2017. Low-velocity impact performance of carbon fiber-reinforced plastics modified with carbon nanotube, nanoclay and hybrid nanoparticles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(9), 696-713.
- Naik NK, Meduri S, Sekher YC, 2000. Polymer matrix woven fabric composites subjected to low velocity impact: Part II- Effect of plate thickness, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19 (13), 1031-1055.
- Rahman AS, Mathur V, Asmatulu R, 2018. Effect of nanoclay and graphene inclusions on the low-velocity impact resistance of Kevlar-epoxy laminated composites, *Composite Structures*, 187, 481-488.
- Rafiq A, Merah N, Boukhili R, Al-Qadhi M, 2017. Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay, *Polymer Testing*, 57, 1-11.
- Sayer M, 2009. Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışının İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 134s, Denizli.
- Singh K, Nanda T, Mehta R, 2017. Addition of nanoclay and compatibilized EPDM rubber for improved impact strength of epoxy glass fiber composites, *Composites Part A.*, 103, 263-271.
- Şimşek R, 2019. Cam-Kevlar Elyaf /Epoksi Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışları Üzerine Fonksiyonellendirilmiş Nanokil İlavesinin Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, Isparta.
- Usal MR, Taşlıdere M, Saraç MF, 2020. Titanyum Karbür (TiC) Takviyeli Epoksi ile Güçlendirilmiş Hibrit Kompozitlerin Çarpma Davranışının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 18-32.
- Uyaner M, Kara M, Ataberk N, 2007. E Cami/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışına numune boyutlarının etkisi, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler, Kitabı, , 7-9 Kasım, İstanbul, 361-368.