



**Makale / Research Paper**

**Sac Malzeme Yüzey Pürüzlülüğünün Fiber-Metal Tabakalı  
Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Olan Etkisi**

Alaattin KAÇAL<sup>a</sup>, Ferhat YILDIRIM<sup>b\*</sup>, Murat KOYUNBAKAN<sup>c</sup>

<sup>a,c</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fak., Makina Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

<sup>b</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Biga MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Çanakkale, Türkiye  
[ferhatyildirim@comu.edu.tr](mailto:ferhatyildirim@comu.edu.tr)

**Received/Geliş:** 29.03.2021

**Accepted/Kabul:** 14.06.2021

**Öz:** Fiber-metal tabakalı kompozitlerin kullanımının özellikle havacılık gibi endüstrilerde giderek yaygınlaşmasıyla bu tür malzemelerin mekanik performanslarının incelenmesi de oldukça önemli hale gelmiştir. Matris ve takviye malzemesinin özelliklerinin, operatör tecrübesinin ve üretim yönteminin nihai ürünün kullanım performansı üzerinde doğrudan etkisinin olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada yüzeyi 60, 220 ve 600 kum zımpara ile mekanik olarak farklı pürüzlülük değerlerinde işlenen 1050 serisi alüminyum sac malzeme, cam elyaflarla tabakalı kompozit olarak üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Buna göre numunelerin çekme, üç nokta eğilme ve tabakalar arası kayma gerilmesi değerleri ölçülmüş ve hasar durumları makro görüntüler üzerinden değerlendirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek çekme ve eğilme gerilmesi değerleri sırasıyla 301.272 MPa ve 760.200 MPa ile 220 kum zımparada elde edilmiştir. En yüksek tabakalar arası kayma gerilmesi ise 17.804 MPa ile 60 kum zımparada elde edilmiştir. En yüksek ve en düşük sonuçlar arasındaki fark çekme, eğilme ve tabakalar arası kayma gerilmesi değerleri için sırasıyla, %10, %4 ve %7 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma ile fiber-metal tabakalı kompozitlerin tasarım parametrelerine ilişkin önemli çıktılar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum, cam elyaf, fiber-metal tabakalı kompozit, mekanik özellik, yüzey pürüzlülüğü

**The Effect of Sheet Material Surface Roughness on Mechanical  
Properties of Fiber-Metal Laminated Composites**

**Abstract:** With the increasing use of fiber-metal laminated composites, especially in aerospace industries, it has become vital to examine the mechanical performance of these materials. It is known that the properties of the matrix and the reinforcement material, the experience of the operator, and the production method directly affect the usage performance of the final product. In this study, the 1050 series aluminum sheet materials, which are mechanically pre-treated with 60, 220, and 600 grits of sandpaper in different roughness values, were produced as a fiber-metal laminated composite with glass fibers, and its mechanical properties were investigated. Accordingly, the tensile, three-point bending, and interlaminar shear strength values of the samples were measured, and the damage conditions were evaluated by macro imaging. According to the results, the highest tensile and bending stress values were obtained in 220 grit sandpaper with 301.272 MPa and 608.160 MPa. The highest interlaminar shear strength value was obtained with 17.804 MPa in 60 grit sandpaper. The difference between the highest and lowest results was 10%, 4%, and 7% for tensile, bending, and interlaminar shear strength values. With this study, significant outcomes have been achieved regarding the fiber-metal laminate composites' design parameters.

**Keywords:** Aluminum, fiber-metal laminated composites, glass fiber, mechanical properties, surface roughness

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Kaçal, A., Yıldırım, F., Koyunbakan, M., "Sac Malzeme Yüzey Pürüzlülüğünün Fiber-Metal Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Olan Etkisi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8 (3); 1215-1228.

*How to cite this article*

Kaçal, A., Yıldırım, F., Koyunbakan, M., "The Effect of Sheet Material Surface Roughness on Mechanical Properties of Fiber-Metal Laminated Composites" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (3); 1215-1228.

ORCID ID: <sup>a</sup>0000-0002-9655-6737; <sup>b</sup>0000-0002-0524-4050; <sup>c</sup>0000-0003-2135-9648

## 1. Giriş

Kompozit malzemeler özellikleri birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin yeni özellikler kazandırılmak amacıyla, birbiri içinde çözünmeden ve makro ölçekte bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Buradaki amaç malzemelerin zayıf yönlerinin birbirlerinin güçlü yönleriyle kapatılmasıdır [1, 2]. Bu malzemeleri oluşturan ana bileşen matris ikinci bileşen ise takviye malzemesi olarak anılır [3]. Oluşan kompozite üçüncü bir bileşen eklenmesi ise mevcut yapının spesifik ve gelişmiş özelliklere sahip hibrit malzeme olarak anılmasını sağlamaktadır. Fiber-metal tabakalı (FMT) kompozitler, sac metallerin fiber takviyeli polimer kompozitler ile birleştirilmesinden türetilmiş hibrit olarak tanımlanan malzemelerdir [4, 5]. 1950'li yıllarda özellikle havacılık materyallerinde çatlak oluşumu ve çatlak büyümesi önemli bir yapısal sorun olarak tespit edilmiştir [6]. Fakat mevcut malzemelerle bu soruna herhangi bir çözüm bulunamamıştır. 1970'li yıllarda başlanan FMT kompozit malzeme uygulamaları çok tabakalı bu malzemelerdeki çatlak oluşum hızı ve çatlak büyümesi belirgin biçimde azalttığını ortaya koymuş, böylece FMT kompozitlerin gelişimi başlamıştır [7]. Bu malzemelerin temeli alüminyum gibi metallerde gözlenen düşük yorulma dayanımı ve karbon elyaflarda gözlenen zayıf darbe dayanımı ve kalıntı gerilme gibi olumsuz özellikleri bu iki malzemeyi birleştirerek gidermeye çalışma fikrine dayanmaktadır [8]. Örneğin metaller izotropiktir, yüksek bir taşıma mukavemetine ve darbe direncine sahiptirler. Ayrıca mekanik olarak onarımları kolaydır. Polimer matrisli kompozitler ise mükemmel yorulma özelliklerine, düşük ağırlığa karşın yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptir [9]. Metallerin yorulma ve korozyon özellikleri ile kompozitlerin düşük taşıma gücü, darbe direnci ve tamir edilebilirliği bu malzemelerin birleştirilme kombinasyonlarıyla aşılabilmektedir [10, 11]. Bu aşamadaki belirleyici parametre üretim prosesi ve birleştirme sistemlerinin seçimidir. Başvurulan her yöntem kendi içerisinde aşılması gereken kritik tasarım süreçleri ve bu süreçlerin optimizasyonunu içeren bilimsel yaklaşımlar gerektirmektedir.

## 2. Literatür Özeti

Fiber-metal esaslı kompozitlerin yüksek mekanik dayanımı, yüksek korozyon direnci ve düşük ağırlık gibi özellikleri bu malzemelerin uzay, havacılık ve savunma alanlarındaki kullanımını giderek arttırmakta, hatta bu kompozitlere ihtiyaç duyulmaktadır [12-14]. Pek çok farklı metal türü FMT kompozitlerin üretilmesinde kullanılmakla beraber hem hafif olmaları hem de yüksek mukavemete sahip olmaları nedeniyle alüminyum ve titanyum gibi metaller özellikle tercih edilmektedir. Alüminyum bulunabilirliği ve işleme kolaylığı sebebiyle daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra cam, karbon veya aramid gibi hemen her tür fiber malzeme FMT kompozit üretiminde kullanılmaktadır. Sıklıkla kullanılan kombinasyonlar ise cam fiber-alüminyum tabakalı kompozit (GLARE), aramid fiber-alüminyum tabakalı kompozit (ARALL) ve karbon fiber-alüminyum tabakalı (CARALL) kompozitlerdir. Malzemelerin çeşitlenmesi ise farklı sorunların oluşmasına yol açmaktadır. Bunlardan başlıcaları termal genleşme katsayısı farkı sebebiyle değişken sıcaklıklardaki performans kaybı sorunlarıdır [15]. FMT malzemenin uzay ve havacılık araçlarında kullanılmak için tasarlandığı düşünüldüğünde örneğin kriyojenik seviyeleri bulan düşük sıcaklıklar metalin tokluğunu artırırken reçine sistemini daha kırılğan yapabilmektedir [16, 17]. Bir diğer sorun fiber ve metal oryantasyonunun malzemeyi kalınlık yönünde destekleyememesinden kaynaklanan tabakalar arası kaymadır [18]. Tabakalar arası yapışma sorunları sebebiyle oluşan delaminasyon ve hem termal hem de mekanik yorulma diğer önemli sorunlardandır [19, 20].

Özellikle tabakalar arası kayma ve ayrışma sorunlarının altında metal ile fiber malzeme arasındaki yapışma kuvvetinin zayıflığı yatmaktadır. Katmanlar arası zayıf yapışma, farklı imalat uygulamalarının kullanıldığı polimer ve kompozit endüstrilerinde en çok karşılaşılan problemlerdendir [21]. Bu sebeple bileşenler arası temas yüzeylerindeki yapışma bağının güçlendirilmesi ve böylece tabakalar arası kayma gerilmesinin arttırılarak ayrışmanın önüne

geçilmesi pek çok çalışmanın ana amacı olmuştur [22]. Üretim yöntemlerinin optimizasyonu ise bu sorunun çözümünde önemli yer tutmaktadır. Metalik malzemenin yüzeyinin mekanik, kimyasal ya da elektrokimyasal gibi çeşitli yöntemlerle ön işlemden geçirilmesi fiber malzemenin tutunmasını ve her iki malzeme temas yüzeyindeki yapışma kuvvetinin daha yüksek olmasını sağlamaktadır [12]. Ayrıca tabakalar arasında ilave bir malzeme olarak yapışkan film uygulanması son dönemlerde uygulanan yeni bir yaklaşım olarak literatüre girmiştir [23, 24].

Yöntemlerin birbirlerine karşı olan üstünlük ya da olumsuzlukları ise uygulama sahası, amaç, maliyet, tasarım kısıtlamaları vb. öğelere göre değişebilmektedir. Buna göre birçok üretici yüzey işleme yöntemi olarak aşındırma tekniğini tavsiye etmektedir [25]. Metalik malzeme yüzeyinin mekanik olarak hazırlanması zımpara vb. aşındırıcılar kullanarak kaba pürüzlendirme, ince pürüzlendirme ve ardından oksit tabakasının uzaklaştırıldığı temizleme adımları izlenerek gerçekleştirilir [26]. Uygulanan mekanik pürüzlendirme işlemi, ıslatılabilir bir yüzey elde edilmesini sağlayan ve yüzey topografyasını, yani makro pürüzlendirilmiş bir yüzeyi hazırlayan fiziko-kimyasal değişiklikleri ortaya çıkarmaktadır [25]. Yüzeylerin alümina, silisyum karbür veya cam boncuk esaslı zımpara kullanılarak yapılan ön işleme ile, yüzeye "tepe ve vadi" tipi bir morfolojinin kazandırılması alüminyumun yapışma durumunu ve kimyasal etkileşimi iyileştirir [27]. İşlemden önce yağ giderme uygulanmaktadır. Böylece metalik malzemenin üretiminden gelen istenmeyen yağ ve kir tabakası uzaklaştırılırken zımparalama işleminin verimliliği artırılmaktadır [27]. Yüzeyi mekanik olarak işlenen metaller ile polimerler arasındaki bağlanma temelde 3 ana mekanizma ile gerçekleşir. Bunlar; metal ve termoplastik arasındaki mekanik kenetlenme, termoplastik ve metal arasındaki fiziksel çekimle (örneğin Van der Waals kuvvetleri ya da hidrojen bağları) ve son olarak termoplastik ile metal arasındaki kimyasal bağ (örneğin kovalent bağlar) yoluyla [28-33].

Mekanik kenetlenme, polimerin metal yüzeyindeki gözenek, boşluk, yarık ve deliklerine akarak doldurması ile meydana gelir. Polimer, katılma sürecinden sonra mekanik olarak metale kilitlenmiş olur. Polimer ve metalin bağlanmasının etkisi mekanik olarak kilitlenmiş polimeri deforme etmek veya kırmak için gereken enerji tarafından yönetilir [28-33]. Mekanik kilitlemenin etkinliği, öncelikle metalin yüzey topografyası tarafından belirlenir. Pürüzlü yüzey profili, mekanik bağlantıyı kırmak için gereken enerjiyi artırırken, pürüzsüz bir yüzey ise kenetlenmeyi en aza indirir ve temas yüzeyinin yapışma mukavemetini azaltır [33]. Bir başka deyişle sistemin mukavemet performansı bu mekanik kilidin gücüyle ilintilidir. Ayrıca polimerin viskozitesi ve yüzey yayılım enerjisi ile emprenye olabilme yeteneği bu pürüzlerin sağlıklı biçimde dolması açısından çok önemlidir. Bunun için yapılan uygulamalardan biri de tabakaların arasına polimer film takviyesi yapılan hibrit yapılarıdır [34, 35].

Yapılan çalışma FMT malzemelerin hem tabakalama aşamasında hem de birbirleri ile farklı birleştirme proseslerini içeren araştırmaların ilk bölümü olup hibrit birleştirme unsurları için referans teşkil edecek veriler elde edilmeye çalışılmıştır. Yapısal birleştirmelerde yüzeylerin kimyasal olarak bozulmaması önem arz ettiği, makro ölçekte hızlı ve minimum maliyetle uygulanabilir olduğu için çalışmada zımparalama ile yüzey hazırlama yöntemi tercih edilmiştir. Buna göre farklı yüzey pürüzlülüğü değerlerinde ön işleme tabii tutulmuş alüminyum saclar, cam elyaflarla birleştirilerek tabakalı kompozit malzeme olarak üretilmiştir. Yapılan sistemli deneyler ile üretilen kompozitlerin çekme, üç nokta eğilme ve tabakalar arası kayma gerilmesi değerleri bulunmuştur. Hasarlı numunelerin makro görüntüleri üzerinden tabakalı kompozitlerin hasar mekanizmaları incelenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile FMT kompozitlerin tasarım parametreleri ve hibrit birleştirme alt yapısı hakkında önemli sonuçlar elde edilmiştir.

### 3. Materyal ve Metot

#### 3.1. Materyal

Çalışmada kullanılan elyaflar 300 gr twill, epoksi ve kürleştirici ise MOMENTIVE-MGS L-160 ve H-160 ticari isimli olup Dost Kimya, Türkiye; alüminyum ise 0.3 mm kalınlıkta 1050 serisi olup Pınar Metal, Türkiye firmasından temin edilmiştir. Alüminyumun kimyasal bileşimi Tablo 1’de, mekanik özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Al-1050 kimyasal bileşimi [36].

Fe	Si	Zn	Ti	Mg	Mn	Cu	Al
0.4	0.25	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	99.5

**Tablo 2.** Al-1050 mekanik özellikleri [36].

Temper	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Akma Mukavemeti (MPa) min-maks.	Çekme Mukavemeti (MPa) min-maks.	Elastiklik Modülü (GPa)	Sertlik (Brinel) min-maks.
0-H111	2.7	20-35	65-80	69	20-21

Çalışmada sac malzeme ile cam elyafı birleştirecek matris malzemesi olarak kullanılan epoksi sistemin teknik özellikleri Tablo 3 ve elyafların teknik özellikleri Tablo 4’te sunulmuştur. Yüzey hazırlamada kullanılan zımparalar ise sırasıyla P60C, P220C ve P600C ticari kodlu silisyum karbür parçacıklı olup Atlas Zımpara firmasından temin edilmiştir. Yüzey temizleme işlemleri ise etil alkol kullanılarak yapılmıştır.

**Tablo 3.** Epoksi sistemin teknik özellikleri [37].

Reçine Sistemi	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Viskozite (mPa)	Kırılma indisi	Amin değeri (mgr KOH/gr)	Karışım oranı (% ağırlıkça)
L160-MGS Reçine	1.13-1.17	700-900	1.548-1.553	---	80
H160-MGS Sertleştirici	0.96-1.00	10-50	1.520-1.521	550-650	20

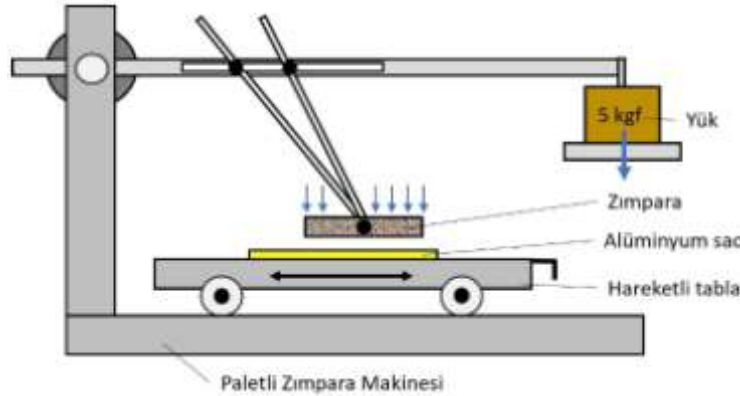
**Tablo 4.** Cam elyaf teknik özellikleri [38].

Elyaf	Malzeme	Yoğunluk (gr/m <sup>2</sup> )	Dokuma	Kalınlık (mm)	Çözü ve Atkı Dokuması
300 gr twill	E-Cam	290	Twill	0.23	EC9 68×3

#### 3.2. Metot

FMT kompozitlerin üretiminde geleneksel el yatırma yöntemi kullanılmış ve bu amaçla ilk olarak alüminyumlara yüzey hazırlama işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için giyotin makas ile 250×250 mm ölçülerinde kesilen alüminyumlar alkol ile temizlenerek paletli zımpara makinesi tablasına sabitlenmiştir. Sırasıyla 60, 220 ve 600 kum zımpara kağıtları baskı plakasına konumlandırılmış ve her numunede eşit baskı kuvveti uygulayabilmek için destek koluna 5 kgf sabit ağırlık uygulanmıştır. Daha sonra tablanın ileri-geri hareket ettirilmesiyle alüminyumların yüzeyi ile zımparanın temas etmesi sağlanmıştır. Bu işlem sırasıyla her iki yüzeye 10 tekrarlı uygulanmış ve alüminyumların her değişiminde zımpara kağıtları da değiştirilmiştir. Alüminyumlara uygulanan yüzey işleme süreci şematik olarak Şekil 1’de sunulmuştur.

Zımparalama işleminden sonra alkolle bir kez daha temizlenen alüminyum sacların yüzey pürüzlülüğü değerleri (mikron- $\mu\text{m}$ ) Time TR200 marka pürüzlülük cihazı ile tek seferde 0.8 mm olmak üzere toplam 5 mm'nin üzerinde örnekleme uzunluğunda ölçülmüştür [39]. Hesaplanan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 1. Alüminyumların zımpara ile yüzeylerinin hazırlanması.

Tüm malzemeler 4 kat alüminyum ve aralarında ikişer kat olmak üzere 6 kat cam elyaf ile toplamda 10 kat olacak şekilde hazırlanmıştır. Sacların üretiminden kaynaklanan hadde yönü etkisini ve elyaflardaki dokuma yönü etkisini eşit kılabilme ve oryantasyon kaynaklı performans kayıplarını en aza indirmek için hem alüminyum hem de cam elyaf tabakalar  $0-90-0-90^\circ$  değişen açılarla konumlandırılmıştır [40].

Tablo 5. Zımparalanan alüminyumların ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

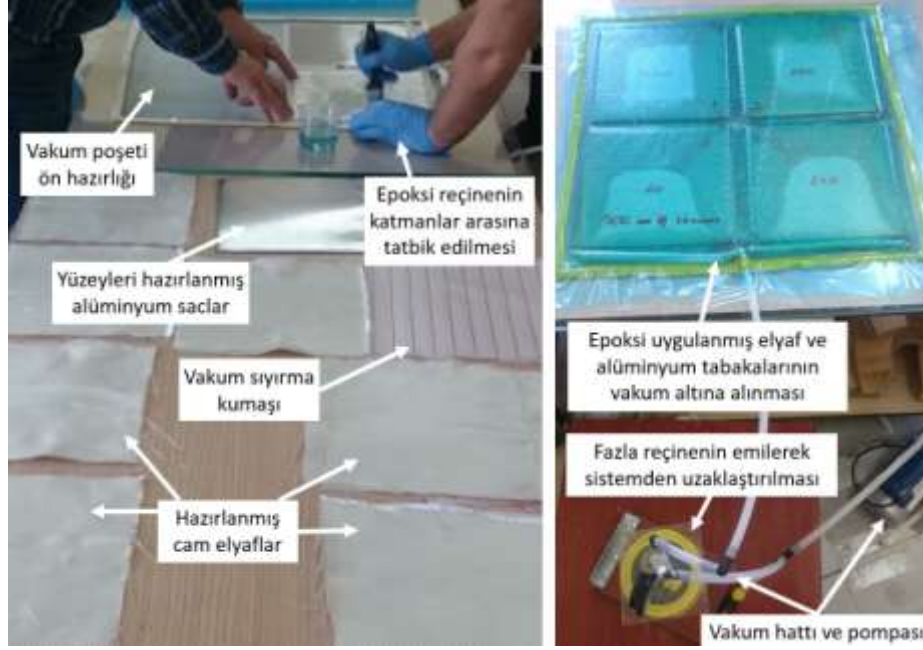
Zımparalama	60 kum	220 kum	600 kum	Zımparalama öncesi
Yüzey pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )	1.80	1.33	0.79	0.19

Reçine seti ağırlıkça %80 epoksi ve %20 sertleştirici olacak şekilde her zımpara grubu için ayrı ayrı hazırlanmış ve kimyasal farklılık oluşmaması için uygulamadan hemen önce mekanik olarak 3 dakika karıştırılmıştır. Reçine, her katman arasına fırça ile tatbik edilmiş ve tüm katmanlar tamamlandığında kapatılan vakum naylonu ile tabakalar 0.86 MPa vakum altına alınmıştır [41]. Vakum işlemi ile tabakalar arasında kalan hava boşaltılmış, tüm kompozitler eşit basınç altında preslenmiş ve fazla reçinenin emilerek sistemden uzaklaştırılması sağlanmıştır. Üretim süreci Şekil 2'de verilmiştir. Oda sıcaklığında 24 saat kürlenmiş kompozitlere daha sonra 2 saat boyunca  $80^\circ\text{C}$  sıcaklıkla ikincil kürlenme işlemi uygulanmıştır [37, 42].

### 3.3. Deneysel Çalışmalar

Üretimi tamamlanan FMT kompozitlerin kalınlıkları 2 mm olup; çekme, üç nokta eğilme ve tabakalar arası kayma gerilmesi deneyleri için gerekli ölçülerde numune hazırlanmasına geçilmiştir. Numunelerin kompozit plakalardan kesilmesi Ermaksan MR2600X4 marka giyotin preste yapılmıştır. Çekme deneyleri ASTM D-3039 standardına göre  $240 \times 25 \times 2$  mm ölçülerinde hazırlanmış numuneler ile Zwick Roell Z100 marka deney cihazında 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğilme deneyleri ASTM D-7264 standardına göre,  $140 \times 30 \times 2$  mm ölçülerinde hazırlanmış numuneler ile UTEST-100 marka deney cihazında 100 mm destek mesafesinde ve 3 mm/dk eğme hızında gerçekleştirilmiştir. Tabakalar arası kayma gerilmesi ölçüm deneyleri EN ISO 14130 standardına göre  $10 \times 20 \times 2$  mm ölçülerinde hazırlanmış numuneler ile yine UTEST-100 marka deney cihazında 17 mm destek mesafesinde ve 1 mm/dk hızda

gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler 3'er tekrarlı yapılmış, bulunan sonuçların ortalaması alınarak nihai sonuçlara ulaşılmıştır.

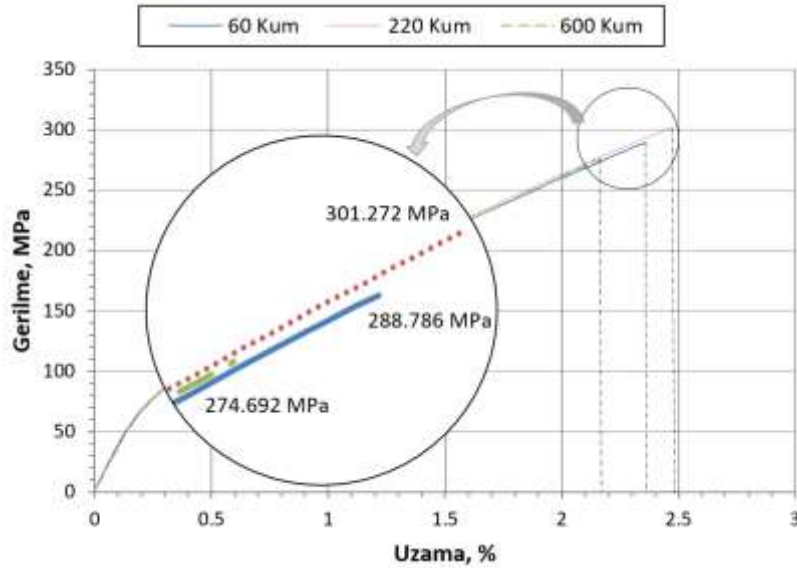


Şekil 2. FMT kompozitlerin üretilmesi.

## 4. Bulgular ve Tartışma

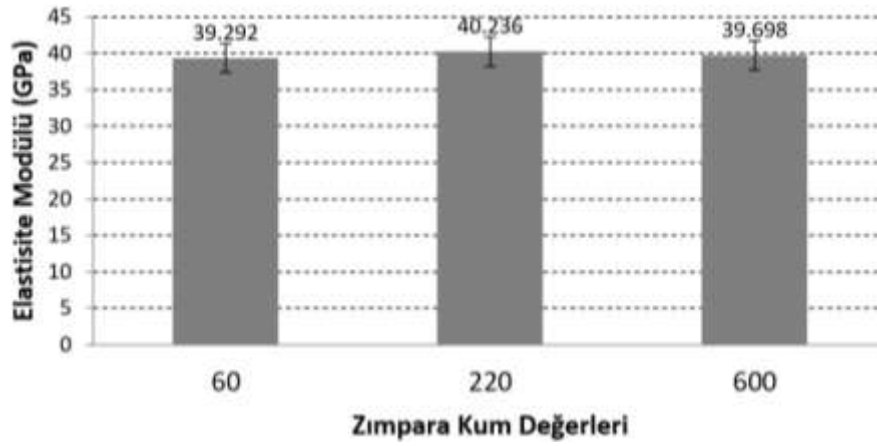
### 4.1. Çekme Deneyi:

Üç farklı kum değerinde zımpara ile yüzeyleri hazırlanan alüminyum saclardan üretilen FMT kompozitlerin çekme deneylerinden elde edilen gerilme-uzama grafiği Şekil 3'te sunulmuştur. Sonuçlar dikkatle incelendiğinde 220 kum zımpara ile ön hazırlama işlemi uygulanan saclardan üretilen kompozitlerin en yüksek çekme gerilmesi değerini verdiği görülmektedir. 220 kum zımpara için bulunan maksimum çekme gerilmesi değeri 301.272 MPa'dır. En düşük çekme gerilmesi değeri ise 600 kum zımpara ile hazırlanan numuneler için 274.692 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Çekme deneyi gerilme-uzama değişimi grafiği.

En yüksek çekme gerilmesi değeri en düşük değere göre yaklaşık %10 fazla bulunmuştur. Sonuçlar açıkça göstermiştir ki 220 kum zımpara ile elde edilen ortalama 1.33  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğünde ön yüzey hazırlığı yapılan alüminyumdan üretilen kompozitler daha yüksek dayanım sunmaktadır. Bunun sebebinin 1.33  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğünün, saclar ile cam elyaflar arasındaki en ideal bağ kuvvetinin oluşmasına imkân sağlaması olduğu düşünülmektedir. Buradan, yüzey pürüzlülüğünün FMT kompozitlerin üretiminde kritik bir görev üstlendiği anlaşılmaktadır. Pek çok farklı yüzey hazırlama yönteminden biri olan zımpara ile mekanik olarak yüzey hazırlama sürecinde elde edilen pürüzlülük değerinin elyaflar ile metal sacları arasında reçinenin ideal biçimde tutunmasını sağlayacak değerlerde tutulması önemlidir [12, 26, 33]. Zira elde edilen sonuçlar da bu gerçeği işaret etmekte, yüksek pürüzlülük ile düşük pürüzlülük arasında ideal bir tutunma dengesi kurulması gerektiği anlaşılmaktadır. Çekme gerilmesi açısından bu ideal değer 1.33  $\mu\text{m}$  olduğu deneyler tarafından ortaya konulmuştur. Çekme elastisite modülü değerleri incelendiğinde yine 220 kum zımpara ile ön işlem yapılan sacların 40.236 GPa ile en yüksek değeri verdiği görülmektedir. Bu durumun gerilme ile benzer şekilde saclar ile elyaflar arasında oluşan ideal yapışma kuvvetinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.



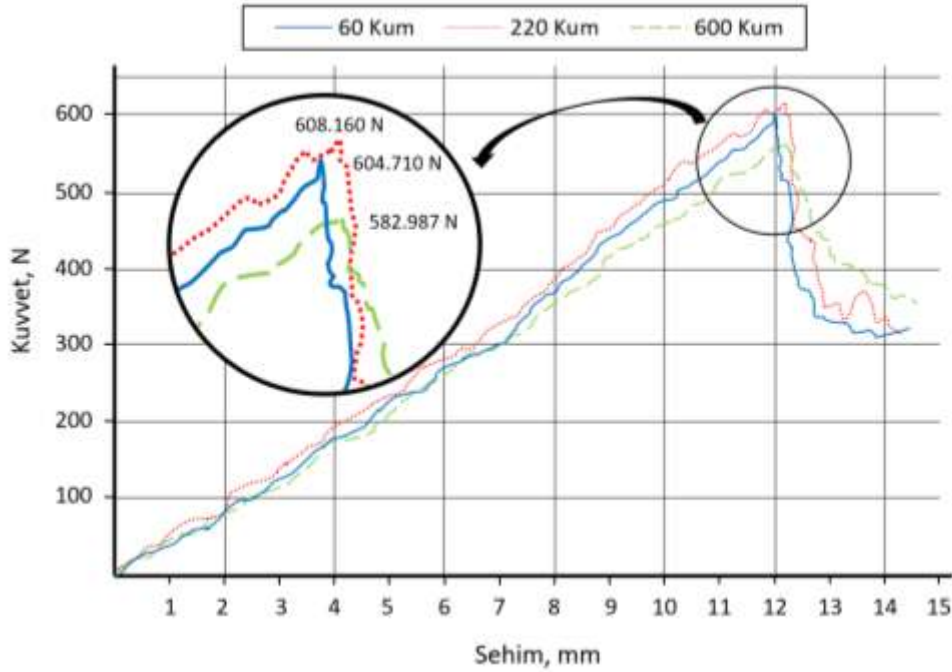
Şekil 4. Çekme elastisite modülü sonuçları.

#### 4.2. Üç Nokta Eğilme Deneyi:

Farklı kum değerlerinde zımparalar kullanılarak yüzey ön hazırlığı yapılan saclarla üretilen FMT kompozitlerin üç nokta eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Şekildeki grafikte de görüldüğü üzere en yüksek eğilme kuvveti değeri 608.160 N ile yine 220 kum zımparanın kullanıldığı saclarla üretilen FMT kompozitlerden elde edilmiştir. İlave 60 kum zımpara ile ön yüzey işlemi uygulanan saclardan üretilen kompozitler 604.710 N ile en yüksek değere oldukça yakın bir sonuç ortaya koymuştur. 600 kum zımpara ise çekme deneylerinde olduğu gibi 582.987 N ile en düşük sonucu vermiştir. Bulunan en yüksek değer en düşük değerden yaklaşık %5 daha iyidir. Malzemenin sehim ya da deplasman değerleri birbirine oldukça yakındır. En yüksek kuvvetin elde edildiği 220 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin deplasman miktarı 12.066 mm, 60 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin deplasman miktarı 12.018 mm ve 600 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin deplasman miktarı ise 12.196 mm olarak hesaplanmıştır. En büyük deplasman miktarının en düşük kuvvetin ölçüldüğü 600 kum zımpara ile hazırlanan numunede tespit edilmesi, tabakalar arası tutunmada zayıflığının olduğunu ispatlamaktadır.

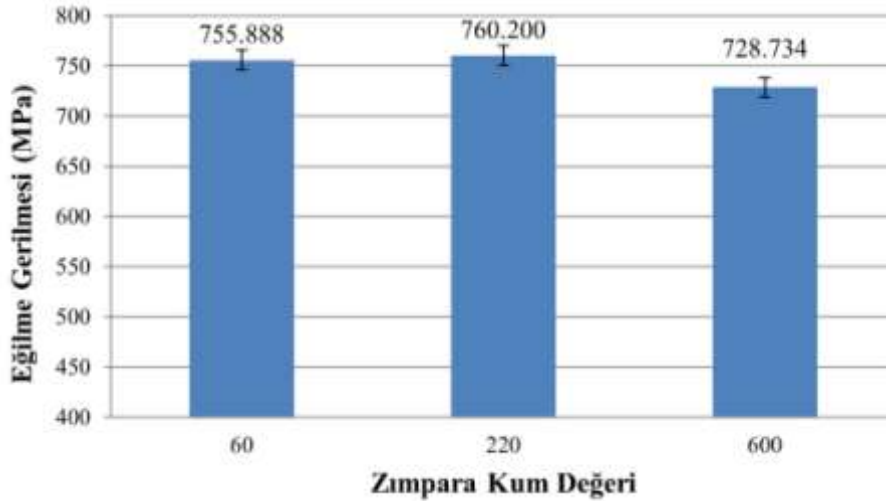
Bulunan değerler çekme deneylerinden elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Düşük kum değerleri daha yüksek yüzey pürüzlülüğü verdiği için 60 ve 220 kum zımparalarla yapılan yüzey işlemi matris malzemesi, elyaf ve saclar arasındaki ara yüzey yapışma kuvvetini arttırmaktadır. 600 kum zımpara verdiği düşük yüzey pürüzlülüğü ile sacların sahip olduğu işlemsiz yüzey pürüzlülüğü

değerlerine yaklaşmakta ve bu da katmanlar arası tutunma gücünün azalmasıyla sonuçlanmaktadır [12, 26, 33].



Şekil 5. Üç nokta eğilme deneyi kuvvet-sehim değişimi grafiği.

Şekil 6'daki grafikte eğilme gerilmesi değerleri sunulmuştur. Buna göre 220 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin eğilme gerilmesi değeri 760.200 MPa, 60 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin eğilme gerilmesi değeri 755.888 MPa ve 600 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin eğilme gerilmesi değeri 728.734 MPa olarak hesaplanmıştır.



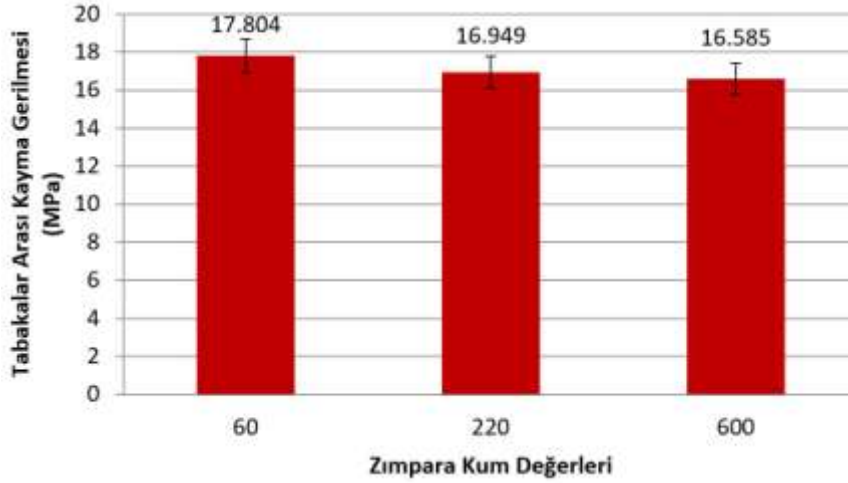
Şekil 6. Üç nokta eğilme gerilmesi sonuçları.

### 4.3. Tabakalar Arası Kayma Gerilmesi Ölçümü:

Üretilen FMT kompozitlerin tabakalar arası kayma gerilmesi deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmektedir. Sonuçlar birbirine yakın olmakla beraber daha yüksek pürüzlülük veren zımparaların daha yüksek gerilme değeri sunduğu görülmüştür. En yüksek kayma gerilmesi değeri 17.804 MPa ile 60 kum zımpara ile hazırlanmış, en düşük değer ise 16.585 MPa ile 600 kum zımpara ile hazırlanmış saclardan üretilmiş FMT kompozitlerde tespit edilmiştir. Plakalar arası ara



yüzey bağ kuvvetinin yüksekliği ile ilişkilendirebilecek bu durum, FMT kompozitlerdeki metal sacların yüzey pürüzlülüğünün mekanik performans üzerindeki önemini ortaya koymaktadır [12, 26, 33]. Elyaf ve saclar arasındaki tutunma gücünün belirlendiği pürüzlülük kavramı tabakaların birbirinden ayrılmasının zorlaşmasını sağlamaktadır. Reçinenin yüzeydeki girinti ve çıkıntıları doldurması, benzer şekilde elyaflarında bu pürüzlü yüzeye tutunması ile birleşince hiç zımparalanmamış ya da yüzeyi 600 kum zımparada olduğu gibi düşük pürüzlülüğe sahip numunelere kıyasla sonuçların daha iyi olmasını sağlamaktadır. Bununla beraber reçine viskozitesi, yüzey basıncı, yüzeydeki kir ve yağ gibi iticiler ve üretim kalitesinin de sonuçlar üzerinde önemli etkiye sahip unsurlar olduğu düşünülmektedir.



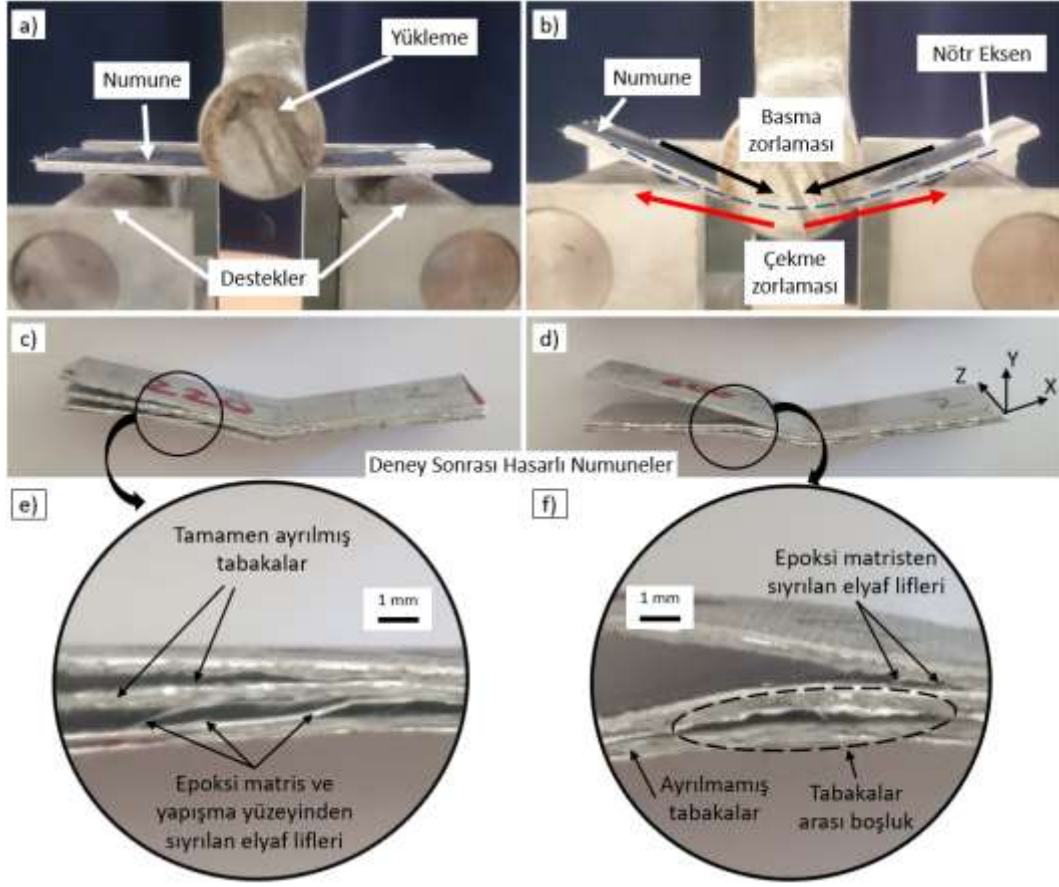
Şekil 7. Tabakalar arası kayma gerilmesi sonuçları.

#### 4.4. Hasar Mekanizmasının İncelenmesi

Deneylerden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki 60 ve 220 kum zımpara ile ön işlem uygulanan numuneler daha yüksek mukavemet değerleri sunmuştur. Yüklemenin türü ise 60 kum ve 220 kum zımparalar arasındaki farkın azalmasını sağlamıştır. 600 kum zımpara ile hazırlanan numuneler tüm deneylerde en düşük dayanım değerini vermiştir. Deney türleri ve oluşan hasar mekanizmaları incelendiğinde yükleme türünün kompozitlerin dayanım değerleri üzerinde önemli etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Çekme deneylerinde 220 kum zımpara önemli bir farkla en yüksek dayanımı verirken üç nokta eğilme ve tabakalar arası kayma gerilmesinin ölçüldüğü deneylerde dayanım sonuçları arasındaki fark azalmaktadır. Yapısal olarak üç nokta eğilme ve tabakalar arası kayma gerilmesi deneyleri birbirine çok benzemektedir. Bu deneylerde destek noktaları ve yükün konumları düşünüldüğünde numunenin nötr ekseninin altında kalan bölgede çekme zorlaması oluşurken üstünde kalan bölgede basma zorlaması oluşmaktadır. Bu yükleme ise alüminyum ve epoksi-elyaf çiftinin mekanik dayanımından ziyade tabakaların birbirine yapışma gücünü daha fazla sınamaktadır. Nötr eksenden kesit kalınlığı boyunca artan zıt yönlü zorlama tabakalar arasındaki yapışma kuvveti tarafından karşılanmaktadır.

Üç nokta eğilme deneylerinde basma etkisiyle nötr eksenden +X ve -X doğrultusuna aktarılan zıt yönlü kuvvet matris malzemesinin maksimum dayanım sınırına ulaşmasıyla tabakaların ayrışması hasarına yol açmıştır. Bu durum Şekil 8.e'de ve Şekil 8.f'deki hasarlı numune makro görüntülerindeki sıyrılan elyaflardan anlaşılmaktadır. Şekil 8.f'de tabakaları tamamen ayrılmamış fakat ara bölgelerde kapalı boşluk şeklinde hasara uğramış numuneler görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere alüminyum ile epoksi-elyaf çiftinin elastisite modüllerinin farklılığı hasarın oluşmasındaki en büyük etkendir [4, 19, 20, 22].

Malzeme anizotropik yapısı sebebiyle etki eden kuvvete kısmi olarak cevap verebilmekte ve daha düşük şekil değiştirme oranına sahip epoksinin parçalanması ile kırılma uğramaktadır.



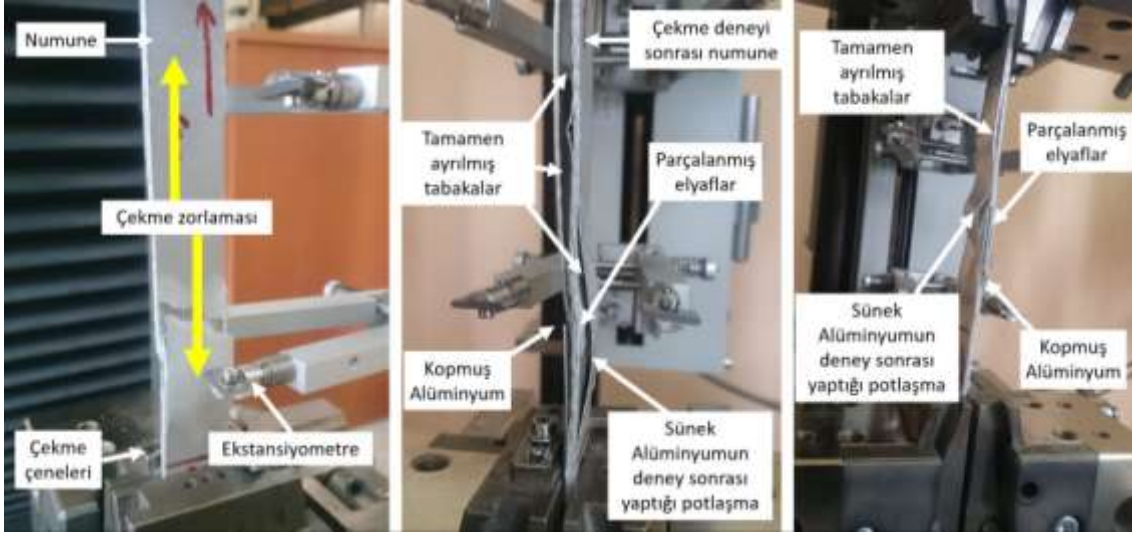
Şekil 8. Üç nokta eğilme deneyleri sonrası numunelerde oluşan hasar durumu.



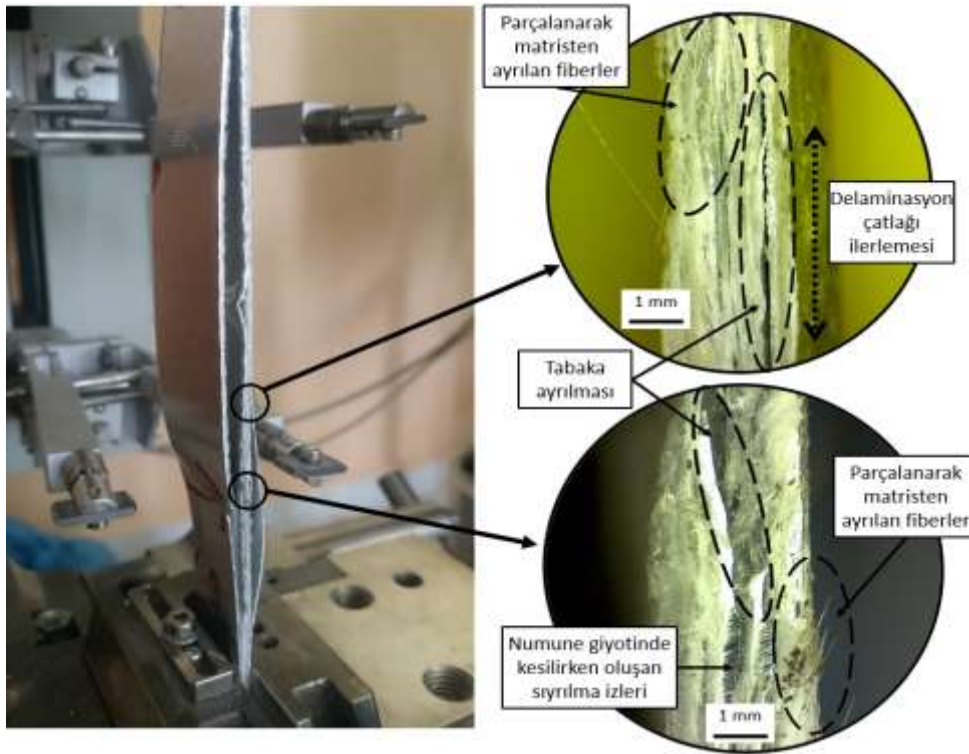
Şekil 9. 600 ve 220 kum zımpara ile hazırlanan numunelerdeki eğilme hasarı karşılaştırması.

Şekil 9'da 600 kum zımpara ile hazırlanan numunelerde 220 kum zımpara ile hazırlanan numunelere kıyasla X yönlü ayrışma hasarı derinliği oldukça fazla olduğu görülmektedir. Numune üst yüzeylerinden ölçüm alınarak bulunan hasar derinliğinin ortalaması  $L_1$  için 62.6 mm ve  $L_2$  için 47.3 mm'dir. Benzer şekilde ayrışma açılarının ortalaması 600 kum zımpara ile hazırlanan numunelerde  $\alpha_1$  için  $19.6^\circ$  ve 220 kum zımpara ile hazırlanan numunelerde  $\alpha_2$  için  $8^\circ$  olarak hesaplanmıştır. En düşük eğilme dayanımının elde edildiği 600 kum zımpara ile hazırlanan numunelerin daha fazla ölçülebilir hasar aldığını ispatlayan bu durumun düşük yüzey

pürüzlülüğünün tabakalar arası X ve Y yönlü kuvvet aktarımını zayıflatmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bir başka deyişle bu durum daha yüksek yüzey pürüzlülüğünün alüminyum ve elyaflar arası yapışmayı iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Çekme eğilme deneyleri esnasında numunede oluşan zorlama türleri ve hasar durumu.



Şekil 11. Çekme deneyi sonrası numunelerde hasar oluşumu.

Şekil 10'da da görüldüğü gibi çekme deneylerinde ise durum etki eden zorlama açısından üç nokta eğilme deneylerine kıyasla daha farklıdır. Hasarlı numuneler incelendiğinde numunenin tamamı zıt yönlü çekme kuvveti etkisi ile gerilmekte ve katmanlar arasındaki yapışma yüzeyi tüm numune boyunca zorlanmaktadır. Alüminyum ve elyaflar arasında elastikiyet farkı olmasından dolayı numune tam boyda patlama şeklinde ayrılmış, tüm tabakalar birbirinden kopmuştur. Deney alüminyumların sünmesi ve elyafların ise parçalanarak tabakalardan ayrılması ile son bulmaktadır. Hasar oluşurken ki ayrılma tipi, eğilme deneylerindeki gibi sıyrılma şeklinde değil parçalanma şeklindedir. Şekil 11'de fiberlerin kuvvetin maksimum dayanım sınırına erişmesiyle tamamen

parçalanarak matrinden ayrıldığı görülmektedir. Tabaka ayrışması sonucu oluşan çatlaklar tüm numune boyunca uzanmaktadır. Bununla birlikte alüminyum ile epoksi-elyaf çiftinin elastisite modüllerinin farklılığının hasarın oluşmasındaki en büyük etken olduğu düşünülmektedir [4, 19, 20, 22].

## 5. Sonuç ve Öneriler

Yapılan bu çalışmada, farklı pürüzlülük değerlerinde yüzeye sahip alüminyum saclar cam elyaflarla birleştirilerek fiber-metal tabakalı kompozit olarak üretilmiştir. Yapılan deneyler ile yüzey pürüzlülüğünün malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Eşit süre ve basınç altında yapılan yüzey işlemlerinde en yüksek yüzey pürüzlülüğünün, en düşük kum değerine sahip zımpara ile elde edildiği tespit edilmiştir.
- Yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip saclarla üretilen kompozit numuneler daha yüksek dayanım vermiştir. Buna göre yüksek yüzey pürüzlülüğünün tabakalar arası ara yüzey yapışma kuvvetini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Deneyler sonrası makro görüntüler üzerinden yapılan hasar mekanizması incelemelerinde çekme deneylerindeki zorlama türünün numuneyi tamamen parçalayarak tabakaları ayırdığı, üç nokta eğilme deneyi numunelerinde ise sıyrıma ve tabaka ayrışması olduğu görülmüştür.
- Oluşan hasarın altında yatan ana etkenin ise alüminyum, epoksi ve cam elyafların farklı özgül elastisite modüllerine sahip olmaları sebebiyle uygulanan yüklemeye homojen biçimde reaksiyon gösterememeleri olduğu anlaşılmıştır. Bu durumun tabakalar arasındaki yapışma gücünün daha da artırılmasıyla iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma ile, yüzeylerin mekanik ön hazırlığı açısından fiber takviyeli metal kompozitlerin kullanım alanları ve tasarım parametreleri ile ilgili önemli bilgiler elde edildiği düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda farklı yüzey işleme yöntemlerinin polimer film gibi hibrit uygulamalarla kullanılarak malzeme performansının daha fazla geliştirilebileceği ön görülmektedir.

## Yazar Katkıları

*Alaattin KAÇAL*: Literatür taraması yaparak çalışma içeriğini hazırlamış, deneysel çalışmaları planlamış ve deney numunelerini üretmiştir, katkı oranı %30. *Ferhat YILDIRIM*: Deney numunelerini üretmiş, deneysel çalışmaları tamamlamış, veri toplamış ve makaleyi yazmıştır, katkı oranı %45. *Murat KOYUNBAKAN*: Literatür taraması yapmış, veri toplamış, yorumlamış ve makaleyi yazmıştır, katkı oranı %25.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

## Kaynaklar

- [1]. Yanen C., Solmaz M.Y., “Tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak üretimi ve balistik performanslarının incelenmesi”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2016, 3(2): 351–362.
- [2]. İlhan R., Feyzullahoğlu E., “Cam elyaf takviyeli polyester (ctp) kompozit malzemelerde kullanılan doğal elyaflar ve dolgu maddeleri”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2019, 6(2): 355–381.

- [3]. Çakır M., Berberoğlu B., “E-cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin elyaf oranındaki artış ile mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2018, 5(3): 734–740.
- [4]. Cortes P., Cantwell W.J., “The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre–metal laminates”, *Composite Science and Technology*, 2006, 66: 2306–2316.
- [5]. Mamalis D., Obande W., Koutsos V., Blackford J.R., Brádaigh C.M.O., Ray D., “Novel thermoplastic fibre-metal laminates manufactured by vacuum resin infusion: The effect of surface treatments on interfacial bonding”, *Materials & Design*, 2019, 162: 331-344.
- [6]. Asundi A., Choi A.Y.N., “Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft”, *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63: 384–394.
- [7]. Villanueva G.R., Cantwell W.J., “The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures”, *Composite Science and Technology*, 2004, 64: 35–54.
- [8]. Vogelesang L.B., Vlot A., “Development of fibre metal laminates for advanced”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103: 1–5.
- [9]. Pekbey Y., Aslantaş K., Yumak N., “The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of nanostructured hybrid composite plates”, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2020, 7(1): 124-134.
- [10]. Alderliesten R.C., Benedictus R., “Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures”, 48th Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc structures, structural dynamics, and materials conference, Honolulu, Hawaii, 1-12, (2007).
- [11]. Chang P.Y., Yeh P.C., Yang J.M., “Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/ aluminum fiber metal laminates”, *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 496: 273–280.
- [12]. Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M.Ö., Çoban O., “A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods”, *Materials and Design*, 2011, 32: 3671–3685.
- [13]. Jakubczak P., Bienias J., Surowska B., “Interlaminar shear strength of fibre metal laminates after thermal cycles”, *Composite Structures*, 2018, 206: 876–887.
- [14]. Çevik Ü., Kam M., “A Review Study on Mechanical Properties of Obtained Products by FDM Method and Metal/Polymer Composite Filament Production”, *Journal of Nanomaterials*, 2020, 1-9.
- [15]. Da Costa A.A., Da Silva D.F.N.R., Travessa D.N., Botelho E.C., “The effect of thermal cycles on the mechanical properties of fiber–metal laminates”, *Material and Design*, 2012, 42: 434–440.
- [16]. Kam M., Saruhan H., “Derin Kriyojenik İşlemin Farklı Bekletme Sürelerinin AISI 4140 (42CrMo4) Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2018, 6: 553-564
- [17]. Kara M., Kırıcı M., Tatar A.C., Avcı A., “Impact behavior of carbon fiber/epoxy composite tubes reinforced with multi-walled carbon nanotubes at cryogenic environment”, *Composites Part B*, 2018, 145: 145–154.
- [18]. Rosselli F., Santare M.H., “Comparison of the short beam shear (SBS) and interlaminar shear device (ISD) tests”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(6): 587–594.
- [19]. Bosbach B., Gerngross M.B., Heyden E., Gerngross M.D., Carstensen J., Adlung R., Fiedler B., “Reaching maximum inter-laminar properties in GFRP/nanoscale sculptured aluminium ply laminates”, *Composites Science and Technology*, 2018, 167: 32–41.
- [20]. Dadej K., Bienias J., Surowska B., “Residual fatigue life of carbon fibre aluminium laminates”, *International Journal of Fatigue*, 2017, 100: 94–104.
- [21]. Kam M, İpekçi A., Şengül Ö., “Investigation of the effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D printed PA12 samples using Taguchi method”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2021, 1-19.

- [22]. Fan Z., Santare M.H., Advani S.G., “Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes”, *Composites: Part A*, 2008, 39: 540–554.
- [23]. Sasso Mi, Mancini E., Dhaliwal G.S., Newaz G.M., Amodio D., “Investigation of the mechanical behavior of CARALL FML at high strain rate”, *Composite Structures*, 2019, 222: 110922.
- [24]. Trzepiecinski T., Kubit A., Kudelski R., Kwolek P., Obłój A., “Strength properties of aluminium/glass-fiber-reinforced laminate with additional epoxy adhesive film interlayer”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 85: 29-36,
- [25]. Harris A.F., Beevers A., “The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999, 19: 445–452.
- [26]. Park S.Y., Choi W.J., Choi H.S., Kwon H., Kim S.H., “Recent trends in surface treatment technologies for airframe adhesive bonding processing: a review (1995–2008)”, *The Journal of Adhesion*, 2010, 86: 192–221.
- [27]. Critchlow G.W., Yendall K.A., Bahrani D., Quinn A., Andrews F., “Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2006, 26: 419–453.
- [28]. Kinloch A.J., “Adhesion and adhesives”, Chapman & Hall, London, (1987).
- [29]. Baldan A., “Review adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment”, *Journal of Materials Science*, 2004, 39: 1-49.
- [30]. Chawla K.K., “Composite materials: science and engineering”, Springer Science Business Media, New York, (2012).
- [31]. Kim J.K., Mai Y.W., “Engineered interfaces in fiber reinforced composites”, Elsevier Science, Oxford, (1998).
- [32]. Flinn R.A., Trojan P.K., “Engineering materials and their applications”, Jaico Publishing House, (2006).
- [33]. Su Y., De Rooij M., Grouve W., Akkerman R., “The effect of titanium surface treatment on the interfacial strength of titanium – Thermoplastic composite joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017, 72: 98-108.
- [34]. Skhabovskiy I., Batista N.L., Damato C.A., Reis R.P., Botelho E.C., Scotti A., “Appraisal of fiber-metal laminate panels reinforced with metal pins deposited by CMT welding”, *Composite Structures*, 2017, 180: 263-275.
- [35]. Jahn J., Weeber M., Boehner J., Steinhilper R., “Assessment Strategies for Composite-metal Joining Technologies – A Review”, *Procedia CIRP*, 2016, 50: 689-694.
- [36]. <https://www.pinarmetal.com/aluminyum.html> (Erişim Tarihi:25-02-2021)
- [37]. <https://www.kompozit.net/mgs-laminasyon-epoksi-seti-l160-h160-set-a-b> (Erişim Tarihi:12-01-2021)
- [38]. <https://www.kompozit.net/cam-fiber-kumas-300-gr-m2-twill-1m2> (Erişim Tarihi:12-01-2021)
- [39]. Kam M., Saruhan H., İpekçi A., “Investigation the Effect of 3d Printer System Vibrations on Surface Roughness of the Printed Products”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2019, 7: 147-157.
- [40]. Kam M., Saruhan H., İpekçi A., “Investigation The Effects Of 3d Printer System Vibrations On Mechanical Properties Of The Printed Products”, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2018, 36 (3): 655-666.
- [41]. Yıldırım F., Aydın M., Avcı A., “Mechanical properties of nano-SiO<sub>2</sub> reinforced 3D glass fiber/epoxy composites”, *International Journal of Material Research*, 2017, 4: 308-321.
- [42]. Yıldırım F., Aydın M., Avcı A., “Improved Mechanical Performance of 3D Woven Glass/Epoxy Spacer Composites With Carbon Nanotubes”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2021, 40: 533-549.