



**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ Ti6AL4V ALAŞIM TOZU
TAKVİYELİ POLİÜRETAN ÇEKİRDEK MALZEMELİ
SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK VE DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Onur Ahmet AYDIN

Danışman: Prof. Dr. Hamit AKBULUT
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2022
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ Tİ6AL4V ALAŞIM TOZU TAKVİYELİ POLİÜRETAN
ÇEKİRDEK MALZEMELİ SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK VE DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

(Determination of Mechanical and Dynamic Properties of Recycled Ti6Al4V Alloy Powder
Reinforced Polyurethane Core Materials Sandwich Structures)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur Ahmet AYDIN

Danışman: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Erzurum
Ocak, 2022

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Onur Ahmet AYDIN tarafından hazırlanan “GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ Tİ6AL4V ALAŞIM TOZU TAKVİYELİ POLİÜRETAN ÇEKİRDEK MALZEMELİ SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK VE DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı çalışması 27 / 12 / 2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mekanik Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Hamit AKBULUT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Murat Demir AYDIN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma TÜBİTAK 1002 projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 218M236

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriŐ, çizelge, Şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Hamit AKBULUT danışmanlığında sunulan “GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ Tİ6AL4V ALAŞIM TOZU TAKVİYELİ POLİÜRETAN ÇEKİRDEK MALZEMELİ SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK VE DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Yöntem	1	35
Bulgular	0	20
Tartışma	0	20
Tezin Genel	1	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Onur Ahmet AYDIN	Prof. Dr. Hamit AKBULUT
27.12.2021	27.12.2021
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayımlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih vesayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmam kapsamında, bilgi ve tecrübelerini her zaman aktaran, yol gösteren değerli danıŐmanım Sayın Prof. Dr. Hamit AKBULUT'a teşekkür ederim.

Bu alıŐma sresinde üretim ve testler boyunca yardımlarını, bilgilerini ve tecrübelerini paylaŐan Sayın ArŐ. Gör. Volkan ACAR'a, dinamik testlerde yardımını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üye. Muhammed Raci AYDIN'a, yapılan analiz ve tasarımlarda tecrübelerini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın ArŐ. Gör. Burak HÜLAGÜ' ye, tez yazımında ve her anımda yardımlarını esirgemeyen Seyyide Sümeyye ÇETİNER'e teşekkür ederim.

Yapılan bu tez çalışmasında TÜBİTAK 218M236 nolu proje kapsamında sağladığı destekle TÜBİTAK'a ve çalıŐmam için laboratuvar ortamını sunan Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne teŐekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca her anımda yanımda olan, maddi manevi desteklerini esirgemeyen babam, annem ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Onur Ahmet AYDIN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ Ti6Al4V ALAŞIM TOZU TAKVİYELİ POLİÜRETAN ÇEKİRDEK MALZEMELİ SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK VE DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Onur Ahmet AYDIN

Danışman: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Amaç: Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V tozu katkılı poliüretan köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin deneysel mekanik ve dinamik özellikleri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, havacılık sektöründe yaygın şekilde kullanılan poliüretan köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin kullanım ömürlerini azaltan titreşim, eğilme, çekme ve basma yüklerine maruz bırakılmıştır. Bu problemin çözülmesi amacıyla poliüretan köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin Ti6Al4V tozu ile katkılanarak mekanik ve dinamik özelliklerini iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Ti6Al4V toz parçacık boyutları 20 µm ve 45 µm olarak iki farklı tipte üretilerek katkı oranı ağırlıkça %0, %1, %2, %3 oranında kullanılmıştır. Sandviç kompozitlerde yüzey tabakası olarak karbon elyaf (düzlem dokuma) takviyeli tabakalı kompozit plakalar ve arayüzey yapıştırıcısı olarak epoksi reçine sistemi kullanılmıştır. Poliüretan köpüğün mikro yapısındaki etkisinin incelenmesi için optik mikroskop kullanılmıştır.

Bulgular: Tez çalışmasında, ASTM standartlarına göre numuneler üretilmiş ve deneyler yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre, katkılı numunelerin katkısız numunelere göre özelliklerinde iyileşmeler meydana geldiği tespit edilmiştir.

Sonuç: Aynı oranda takviye edilmiş Ti6Al4V toz parçacık boyutlarına göre farklı artışla toz parçacık boyutunun etkisi de gözlemlenmiştir ve titreşim, basma, eğilme davranışlarında iyileşmeler elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ti6Al4V, Poliüretan, Sandviç Yapı, Titreşim, Basma

Ocak 2022, 55 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

DETERMINATION OF MECHANICAL AND DYNAMIC PROPERTIES OF RECYCLED Ti6Al4V ALLOY POWDER REINFORCED POLYURETHANE CORE MATERIALS SANDWICH STRUCTURES

Onur Ahmet AYDIN

Supervisor: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Purpose: In this study, experimental mechanical and dynamic properties of Ti6Al4V powder doped polyurethane foam core sandwich composites were investigated. Within the scope of the study, polyurethane foam core sandwich composites, which are widely used in the aviation industry, are exposed to vibration, bending, tensile and compression loads that reduce their service life. In order to solve this problem, it is aimed to improve the mechanical and dynamic properties of polyurethane foam core sandwich composites by doping with Ti6Al4V powder.

Method: Ti6Al4V powder particle sizes were produced in two different types as 20 μm and 45 μm , and the additive ratio was used as 0%, 1%, 2% and 3% by weight. In these sandwich composites, carbon fiber (plain weaving) reinforced laminated composite plates are used as surface layer and epoxy resin system is used as interface adhesive. An optical microscope was used to examine the effect of polyurethane foam on its microstructure.

Findings: All tests performed in the thesis study were produced in accordance with ASTM standards and studied under the same conditions. As a result of the tests, it was determined that the values of the samples with additives improved compared to the samples without additives.

Results: The effect of powder particle size was observed with a different increase compared to the powder particle sizes of Ti6Al4V reinforced at the same rate, and the vibration, compression, bending behaviors were improved.

Keywords: Ti6Al4V, Polyurethane, Sandwich structure, Vibration, compression

January 2022, 55 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	2
Sandviç Kompozitler.....	2
Yüzey Malzemeleri	2
Çekirdek Malzemeler	3
Poliüretan Köpük	6
Poliüretan Çekirdek Esaslı Sandviç Yapılar	7
Ti6Al4V Tozu ve Hazırlanması	8
MATERYAL ve YÖNTEM	10
Malzemeler.....	10
Yüzey tabakaları.....	10
Çekirdek malzemesi	10
Takviye malzemesi.....	10
Ara yüzey yapıştırıcısı.....	10
Yöntemler.....	10
Ti6Al4V tozunun hazırlanması	10
Yüzey plakaların üretimi.....	11
Poliüretan köpüğünün üretimi.....	16
Numuneleri sandviçleştirme işlemi.....	19
PU köpük numunelerin karakterizasyonları.....	22
Sandviç numunelerin dinamik analizleri.....	23
Sandviç numunelerinin basma testleri	24
Sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testleri	26
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	28

Karakterizasyon.....	28
Titreşim Testi Sonuçları.....	30
Basma Testi Sonuçları.....	32
Üç-Nokta Eğilme Deneyi Sonuçları.....	33
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR.....	38
ÖZGEÇMİŞ.....	42



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Yüzey Tabakalarının Numune Boyutları.....	16
Tablo 2. Kesilmiş PU Numunelerin Boyutları.....	19
Tablo 3. Sandviç Numunelerin Boyutları	22
Tablo 4. PU Köpüklerin FTIR Analiz Sonuçları	30
Tablo 5. Birinci Doğal Frekans ve Birinci Sönüm Oranı Değerleri	30
Tablo 6. Birinci Doğal Frekans ve Birinci Sönüm Oranı Değerleri	31



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Farklı çekirdek geometrileri ve sandviç yapıları.....	5
Şekil 2. Poliüretan köpük sentezinin kimyasal formülü.....	6
Şekil 3. PUF (a) poliöl ve izosiyanatın karıştırılması (b) mekanik karıştırma (c) köpük yükselmesi (d) PUF	7
Şekil 4. Poliüretan köpük çekirdek malzemeli sandviç yapı.....	8
Şekil 5. Ti6Al4V tozlarının hazırlanma prosesi.....	11
Şekil 6. Epoksi ve sertleştirici ağırlıklarının ölçülmesi (a) 550 gr epoksi ölçülmesi (b) 150 gr sertleştirici ölçülmesi.....	12
Şekil 7. Mekanik karıştırıcı ile epoksi reçine sisteminin karıştırılması	12
Şekil 8. Epoksi sisteminden gazının giderilmesi (a) Gaz giderme için kullanılan vakum haznesi (b) Gaz giderme işlemi sırasında epoksi yüzeyindeki hava boşlukları	13
Şekil 9. Epoksi reçine sistemi (a) Karıştırmadan önce (b) Mekanik karıştırmadan sonra (c) 45 dakika gaz giderme işleminden sonra	13
Şekil 10. VARTM tekniğinin aşamaları ve tabakaların istiflenmesi.....	14
Şekil 11. VARTM üretim adımları (a) Ayırıcı filminin yapıştırılması ve üzerine karbon elyafın koyulması, (b) Soyma kumaşın ve akış filesinin koyulması, (c) Hortumların ve vakum torbasının koyulması, (d) Vakum ortamının oluşturulması.	15
Şekil 12. Yüzey tabakaları numuneleri (a) CNC ile kesme işlemi (b) Kesilmiş numuneler	15
Şekil 13. PUF üretimi için kullanılan kalıp.....	16
Şekil 14. Köpüğün kalıptan çıkmış hali	17
Şekil 15. (a) Poliöl ve Ti6Al4V karışımdan önce (b) Karışımdan sonra.....	17
Şekil 16. Karışımın ultrasonic karıştırıcıda karıştırılması.....	18
Şekil 17. Sıcak tel kesme cihazı	18
Şekil 18. (a) Sıcak tel kesme cihazı (b) PUF numuneleri için kesim şablonu	19
Şekil 19. (a) Vakum çemberi (b) Gaz alma işlemindeki hava kabarcıkları	20
Şekil 20. Yüzey tabakalarına ara yüzey yapıştırma işlemi.....	20
Şekil 21. (a) Sandviçleştirilecek numuneler (b) Yapıştırma işlemi sonrası	21
Şekil 22. (a) Ahşap mdf altındaki sandviç numuneler (b) Ahşap ağırlığın üst görünümü.....	21
Şekil 23. Bazı sandviç kompozitlerin son hali	22
Şekil 24. Kompozit numune görselleri.....	22
Şekil 25. Titreşim analizleri için deney düzeneği	23

Şekil 26. Titreşim deney düzeneği (a) Serbest-serbest sınır şartı (b) Ankastre-serbest sınır şartı.....	24
Şekil 27. Çekme test cihazı	25
Şekil 28. Su terazisi ile yüzeyinin kontrolü.....	25
Şekil 29. Sandviç numune için basma deneyi	26
Şekil 30. Üç-nokta Eğilme deneyi şeması.....	27
Şekil 31. Eğilme testi altındaki sandviç numune	27
Şekil 32. SEM görüntüleri; (a) Saf, (b) P20-1, (c) P20-2, (d) P20-3, (e) P45-1, (f) P45-2, (g) P45-3	29
Şekil 33. PU köpüklerin FTIR spektrumları	30
Şekil 34. (a) A-S 1. Doğal frekans ortalamaları, (b) A-S 1. Sönüm oranı ortalamaları.....	31
Şekil 35. (a) S-S 1. Doğal frekans ortalamaları, (b) S-S 1. Sönüm oranı ortalamaları	31
Şekil 36. Ortalama basma kuvvetleri	32
Şekil 37. Basma testi aşamasında ki PU numunesi	33
Şekil 38. Ortalama eğilme kuvvetleri.....	34
Şekil 39. Üç-nokta eğilme yükü altındaki numune	35
Şekil 40. Üç-Nokta eğilme testi sonrası P20-1 numuneleri	35

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

CAM	: Bilgisayar Destekli Modelle
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
CNT	: Karbon Nanotüp
FD-KNT	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Karbon Nanotüp
FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GA	: Güven Aralığı
GGK	: Grafen Güçlendirilmiş Kompozitler
PMI	: Polimetakrilimid
PU	: Poliüretan
PUF	: Poliüretan Köpük
PVC	: Polivinilklorür
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopisi
SiK	: Silisyum Karbür
SLE	: Seçici Lazer Eritme
TMK	: Titanyum Matrisli Kompozit
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transferi ile Kalıplama
µm	: Mikronmetre

GİRİŞ

Ti6Al4V alaşımı, yüksek mekanik özellikleri sebebiyle havacılık, uzay ve sağlık sanayinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzeme, özellikle sağlık alanı uygulamalarındaki kullanımı dikkat çekmektedir. İmplant malzeme üretimi esnasında ortaya çıkan metal talaş atıkların ekonomik ve çevresel etkiler dikkate alınarak değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bu Ti6Al4V talaşları kendiliğinden tutuşma riskinden dolayı uzun süre saklanamamaktadır. Bundan dolayı bu talaşların değerlendirilmesi hem çevre hem de ekonomik açıdan oldukça önem arz etmektedir. Bundan dolayı, alaşım talaşlarının toz haline getirilerek değerlendirilmesi ve farklı mühendislik uygulama alanlarında kullanılma potansiyeli iyi bir gelişme olarak değerlendirilmektedir. Ti6Al4V alaşım tozunun poliüretan köpük (PUF) malzemesine katılanmasıyla üretilen poliüretan çekirdekli sandviç kompozitlerin önemli bir mühendislik uygulaması olacağı ve mekanik ve dinamik özelliklerinde iyileşmeler olacağı düşünülmektedir.

Bu sandviç yapılar; darbe, titreşim, eğilme gibi yüklemelere maruz kalmaktadırlar. Bu yapıların özellikle darbelere karşı özelliklerinin iyileşmesinin yanında titreşim davranışlarının ve sönüm oranlarının da iyileşmesi beklenmektedir. Bu çalışma kapsamında sandviç yapıların mekanik ve dinamik özelliklerinin iyileştirilmesi ve kullanım sürelerinin artırılması amaçlanmaktadır. Bununla ilgili olarak literatür taraması yapılmış ve Ti6Al4V alaşım tozunun kullanıldığı çalışmalar incelenmiş olup açık literatürde PU çekirdek malzeme içerisine Ti6Al4V alaşım tozu katkısının yapıldığı sandviç yapılarla ilgili bir çalışmaya rastlanmamış ve ayrıca çalışmanın amacına yönelik iyileştirmelerin yapılabileceği değerlendirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda Ti6Al4V/PUF yapısı için karakterizasyon testleri ile birlikte malzemenin yapısal özellikleri de belirlenmektedir.

Çalışmada, çekirdek malzemesi Ti6Al4V alaşımı tozu katılarak elde edilmiştir ki bu, çalışmanın özgün yönü olarak değerlendirilmektedir. Ti6Al4V alaşımı tozunun PUF içinde kütlece farklı oranlarda katılarak Ti6Al4V/PUF köpük malzemesinin yapısal karakterizasyonları araştırılmıştır. Karakterizasyon işlemlerinden sonra farklı katkı oranlarında Ti6Al4V/PU köpük çekirdekli sandviç kompozitler üretilmiştir. Yüzey malzemeleri VARTM (vakum destekli reçine transferi ile kalıplama) tekniğiyle üretilmiştir. Sandviç kompozitlerin üretimlerine müteakiben ilgili standartlara göre eğilme, basma ve titreşim testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Sandviç Kompozitler

Sandviç kompozitler, genellikle bir çekirdek ve iki yüzey tabakası olmak üzere üç tabakadan oluşan kompozit malzemelerdir. Yüksek mukavemete sahip olan yüzey tabakaları; basınç kalıplama, vakum kalıplama veya in-situ köpürtme gibi yöntemlerle üretilirler. Çekirdek malzemeler, yüzey tabakalarına göre daha düşük mukavemete ve yoğunluğa sahiptirler ve sandviç yapıda yüksek oranda hafiflik sağlarlar (Grünwald *et al.* 2016). Çekirdek yüzey tabakalarının arasına yerleştirilerek ve yapıştırılarak kompozit yapı elde edilir. Sandviç kompozitler düzleme dik yüklere maruz kaldıklarında eğilme etkisi yüzey tabakaları tarafından karşılanırken, kesme etkisi çekirdek malzemesi tarafından karşılanmaktadır (Grünwald *et al.* 2016).

Sandviç yapıdaki hasar, yüzey tabakaları ile çekirdek malzeme arasındaki yapıştırıcı malzemesinin mukavemetine bağlıdır. Sandviç yapı yüzeye dik yüklere maruz kaldığında, arayüzeyde bulunan yapıştırıcı tabakasında kesme kuvvetinin etkisiyle ayrılma hasarı meydana gelebilmektedir.

Sandviç yapıların mukavemeti, yüzey malzemelerinin özelliklerinin dışında birçok farklı parametreye de bağlıdır. Bu parametrelerden en önemli ikisi, çekirdek malzemenin özelliklerini ve arayüzey mukavemetidir.

Sandviç kompozitler, yüklemeye maruz kaldıklarında, çeşitli hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu hasarlar genellikle yüzey tabakalarında çeki-bası hasarı, çekirdek ve yüzey tabakaları arasında ayrılma (deleminasyon), çekirdek deformasyonu ve sıkışan yüzeyin tabakasının burkulması şeklinde meydana gelebilir. Bu hasarlar standartlara göre deneyler yapılarak ve sonuçlar analiz edilerek değerlendirilmektedir.

Sandviç kompozitler darbe sönümleyici yapılar, şantiye panelleri, binaların yalıtımı, bina dışı kaplamaları, hafiflik gerektiren havacılık teknolojisi gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Nasirzadeh and Sabet 2014).

Yüzey Malzemeleri

Sandviç kompozitlerde, eğilme yüklemesi durumunda yüzey tabakalarının mukavemetli olmaları gerektiği için, yüksek mukavemetli alüminyum ve çelik gibi malzemeler veya elyaf takviyeli kompozit tabakalar tercih edilmektedir. Ayrıca ahşap esaslı yüzey malzemeler de

yüksek termal ve akustik yalıtım özellikleri sebebiyle sandviç kompozitlerde yüzey malzemesi olarak kullanılmaktadır (Fernandez-Cabo *et al.* 2010).

Bununla beraber, hibrit malzemelerdeki gelişmelerle birlikte fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) geleneksel malzemeleri geride bırakmıştır. Günümüzde, fonksiyonel derecelendirilmiş seramik metallere, grafen (GGK'ler) ve karbon nanotüp ile güçlendirilmiş kompozitler (FD-KNT) birçok alanda kullanılmaktadır. Grafen ve nanotüplere esaslı bu kompozitler farklı mekanik, elektrik ve termal özellikler göstermekte olup sandviç kompozitlerde yüzey malzemesi olarak kullanılmaktadırlar (Li *et al.* 2018; Wang *et al.* 2018).

Genel olarak, yüzey tabakaları çekirdek malzemeye yapıştırılarak, yüksek dayanımlı ve düşük ağırlık oranına sahip bir sandviç yapı elde edilir. Yüzey tabakaları ve çekirdek malzemenin arasındaki yapışma önemli bir parametredir. Çünkü yükleme şartlarında yüzey tabakası ile çekirdek malzemesi arasında en önemli problem delaminasyondur. (Osei-Antwi *et al.* 2014; Höwer *et al.* 2018).

Metal yüzey malzemeleri, polimerik çekirdek malzemeleri ile zayıf arayüzey oluştururlar. Bu zayıf arayüzey, malzemelerin farklı elektriksel ve termal özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Harhash *et al.* 2017). Bu olumsuz durumu engellemek için çekirdeği metalik alaşımlarla takviye etmek gibi farklı teknikler üzerinde çalışılmaktadır. (Harhash *et al.* 2017; Mousa *et al.* 2018). Yaygın olarak kullanılan başka bir çözüm ise, FDM'lerin yüzey malzemeleri olarak kullanılması ve daha iyi bir yapışma durumunun sağlanmasıdır (Li *et al.* 2018).

Çekirdek Malzemeler

Sandviç yapılarda farklı çekirdek malzemeleri kullanılmaktadır. Çekirdek malzemelerin farklı mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri bulunmaktadır (Lee *et al.* 2018). Çekirdek malzemeleri, uygulama alanı ve hedef parametrelere göre seçilmektedir. Sandviç yapıyı elde etmede hafiflik ve maliyetin yanı sıra mukavemet, sertlik ve enerji emilimi oldukça önemli parametrelerdir (Shams *et al.* 2015).

Çekirdek malzemeler; bal peteği, oluklu göbekler, kafes göbekler gibi farklı formlarda olabilmektedir. Bal petek çekirdek malzemeli sandviç kompozitler, yüksek darbe direnci özelliği ve neme dayanıklı içi boş yapılar olması nedeniyle otomotiv ve uzay sanayisinde sıklıkla kullanılmaktadır (Reyno *et al.* 2018). Yumurta ve piramit şeklindeki petek çekirdek malzemeleri, diğer çekirdek malzemelere göre düşük yoğunluklu ve özgül enerji emilimine sahiptirler (Xiong *et al.* 2016).

Son yıllarda araştırmacıların, havacılık uygulamalarında petek çekirdek malzeme yerine tercih edilen kafes çekirdek malzemelerini üretmek için seçici lazer eritme (SLE) yöntemini kullandıkları görülmektedir. Bu yöntem, kafes çekirdekleri gibi karmaşık yapıların üretilmesinde kullanılan bir yöntemdir ve düşük nem oranında istenilen havacılık ve uzay sanayinde kullanılan karmaşık kafes yapıların üretilmesinde önde gelen bir uygulamadır.

Benzer şekilde, Y şekilli çekirdek malzemeler geleneksel çekirdek malzemelere kıyasla daha iyi bir enerji emilimi göstermiştir (Liu *et al.* 2018).

Sandviç kompozitlerde kullanılan çekirdek malzemeler, polimerik köpükler, ahşap çekirdekler, metalik köpükler, mantar olarak sınıflandırılır. Örnek olarak, ahşap çekirdekli sandviç kompozitler, hafiflikleri sebebiyle rüzgar türbin kanatları ve havacılık sanayisinde kullanılır (Osei-Antwi *et al.* 2014; Mohammadi and Nairn 2017). Mikro kafes çekirdekleri, alüminyum petek ve alüminyum köpük çekirdekleri ile rekabette bulunurlar (Mines *et al.* 2013; Y. Shen *et al.* 2014). Metalik köpük çekirdekli sandviç kompozitler, özellikle alüminyum köpük çekirdekli kompozitler havacılık, deniz ve otomotiv sanayisinde kullanılmaktadır (Yan *et al.* 2017). Alüminyum çekirdekli kompozitler özellikle darbe yükünün ön plana çıktığı otomotiv ve havacılık sanayisinde kullanılmaktadır (Liu *et al.* 2017).


Alüminyum köpük çekirdek malzemeli sandviç kompozitlerle ilgili çalışmalar devam etmektedir. Örnek olarak; bir araştırma grubu, alüminyum köpük çekirdek malzemeli sandviç kompozitlere alüminyum bacaklar ekleyerek, kompozitlerin enerji absorpsiyon kapasitesinde iyileşme sağlamışlardır. Diğer bazı çalışmalarda alüminyum köpük esaslı sandviç kompozitlerin, farklı yüklemelere karşı tepkileri sayısal metotlar kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmalarda kayma gerilmesi ve girinti boyu arasındaki ilişki geliştirilmiştir (Xu *et al.* 2014).

Bir başka çalışmada, seramik çekirdekler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmış ve silisyum karbür bazlı çekirdeklerin, 1000 °C'lik sıcaklığa kadar kullanılabileceği görülmüştür (Gianchandani *et al.* 2018). Sandviç kompozitlerde kullanılan bir diğer çekirdek malzemesi mantar topraklarıdır. Bu tür çekirdek malzemelerinin titreşim yüklerine karşı, iyi bir sönümlenme özelliğine sahip olmasının yanında darbe yüklerine karşı yüksek direnç gösterdiği ayrıca yüksek akustik ve ısı yalıtım özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir (Castro *et al.* 2010).

Bir diğer çekirdek malzemesi, hafiflik, düşük maliyet ve akustik özellikleri ile sandviç yapılarda ve çeşitli sanayi uygulamalarında kullanılan polimer köpüklerdir. Sandviç kompozitlerde yaygın şekilde kullanılan polimetakrilimid (PMI) köpükler, polivinilklorür (PVC) ve poliüretan köpükler bu tür çekirdek malzemelerine örnek olarak verilebilir. Polimer köpük çekirdek malzemeli sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri yüzey plakalarına ve

çekirdek malzemenin özelliklerine bağlıdır. PMI köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin çentik üzerine yapılan bir çalışmada, çekirdek yoğunluğunun ve çentik şeklinin sandviç kompozitlerde büyük bir etkiye sahip olduğunu gözlemlenmiştir (Flores-Johnson and Li 2011).

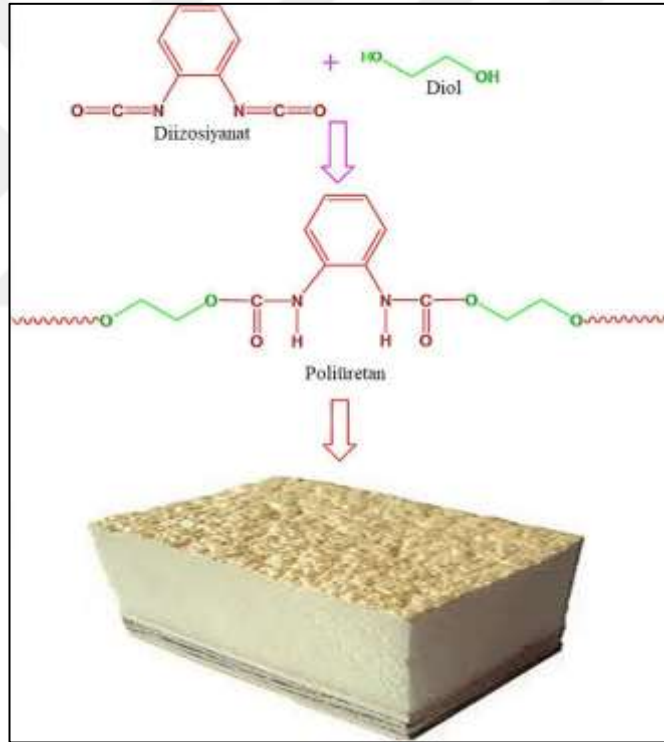
Polimer çekirdek malzemeleri, en kapsamlı şekilde araştırılmış çekirdek malzemesidir. PUF ile ilgili yapılan bir çalışmada, çekirdek malzemeli sandviç kompozitlerde, darbe yüklerinden sonra ortaya çıkan darbe enerjisinin, çekirdek kalınlığına ve yüzey tabakaların kalınlıklarına bağlı olduğu görülmüştür (Wang *et al.* 2015). Farklı çekirdek geometrileri ve sandviç yapıları Şekil 1’de gösterilmiştir.

Malzeme	Çekirdek	Sandviç Yapı
Köpük		
Mantar		
Bal Peteği		
Oluklu		
Piramit		
Y Şekilli		

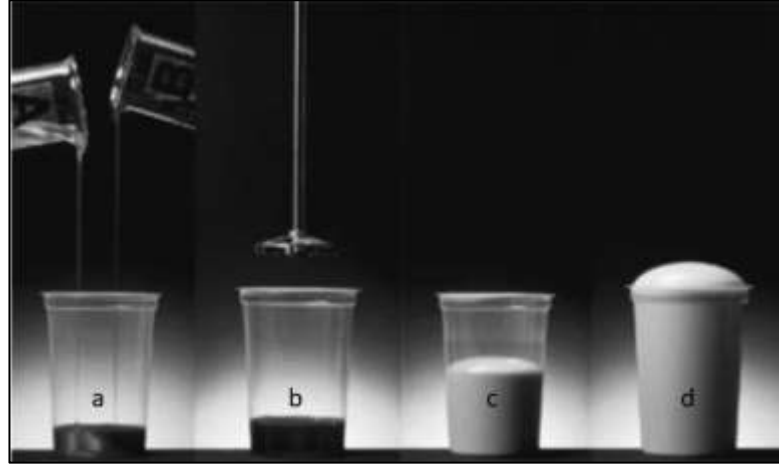
Şekil 1. Farklı çekirdek geometrileri ve sandviç yapıları (Khan 2019)

Poliüretan Köpük

Poliüretan köpükler (PUF), polimerik köpükler arasında en yaygın kullanılan köpük gruplarındandır. Mekanik özelliklerine göre; poliüretan köpükler esnek köpükler, yarı sert köpükler ve sert (rijit) köpükler olarak sınıflandırılırlar (Xu *et al.* 2007). Bu üç sınıf arasında PUF hafiflik ve yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı en yaygın olarak kullanılan çeşittir. Ayrıca yüksek nem direnci, iyi ses yalıtımı, darbe dayanımı ve yüksek kayma direnci gibi özelliklere de sahiptirler. Poliüretan köpükler; sentez yöntemleri, kullanılan reaktanların tipleri ve konsantrasyonları değiştirilerek ihtiyaca göre modifiye edilebilme özelliklerine sahiptirler (Sachse *et al.* 2014). Rijit PUF'lar; havacılık, otomotiv endüstrisi, inşaat sektörü, ses yalıtımı, zemin kaplama, yalıtım panelleri imalatı, deniz endüstrisi uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Shawkat *et al.* 2008; Blasco *et al.* 2011). Şekil 2'de poliüretanın kimyasal yapısı ve Şekil 3'te poliüretanın elde edilmesi görülmektedir.



Şekil 2. Poliüretan köpük sentezinin kimyasal formülü (Kausar 2017)

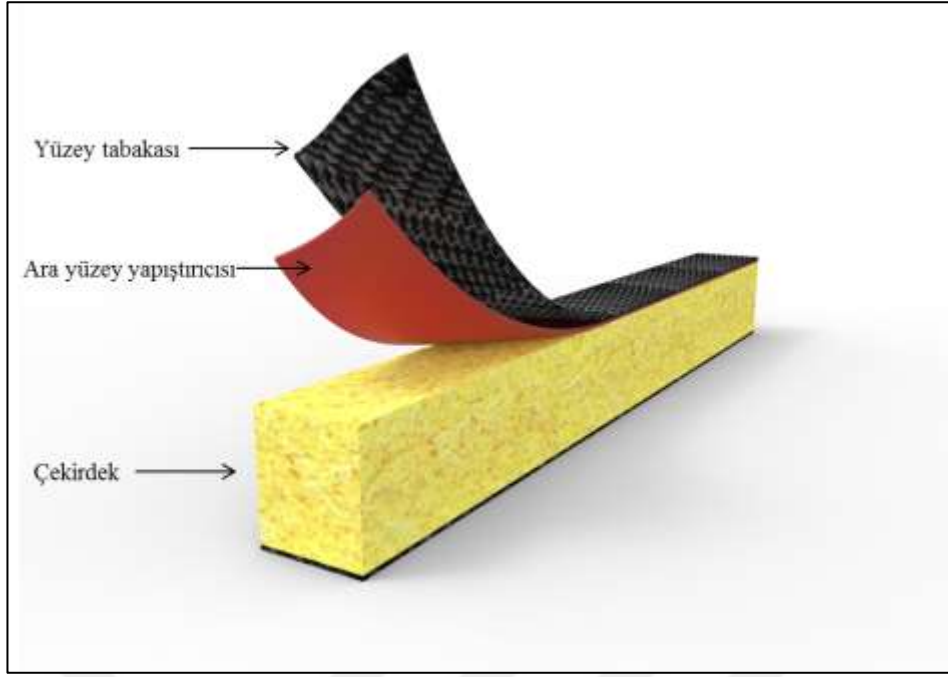


Şekil 3. PUF (a) poliöl ve izosiyanatın karıştırılması (b) mekanik karıştırma (c) köpük yükselmesi (d) PUF (Shams *et al.* 2015).

Poliüretan Çekirdek Esaslı Sandviç Yapılar

Sandviç kompozit yapılarda, çekirdek malzemesi ve yüzey tabaka malzemeleri için çok çeşitli seçenekler bulunmaktadır. Metal plakalar, elyaf (karbon, cam, vs.) takviyeli tabakalı kompozitler yaygın olarak yüzey tabakası olarak kullanılırlar. Yüzey tabakaları, yüksek çeki ve bası mukavemeti olan malzemelerdir ve eğilme yüklerine maruz kalan sandviç kompozitlerde eğilme yüklerini çok büyük oranda karşılarlar. Çekirdek malzemeler ise, yüzey tabakalarına göre hafiftirler ve düşük mukavemetlidirler. Çekirdek malzemenin yoğunluğu ve kalınlığı, sandviç kompozit yapının mekanik (dinamik) özelliklerine etkileyen önemli parametrelerdir. Yapılan bir çalışmada, çekirdek kalınlığı sabit tutulurken çekirdek yoğunluğu artırıldığında doğal frekansın arttığı görülmüştür (Sharma and Raghupathy 2010).

Poliüretan köpük, hafiflik, düşük fiyat ve üretim kolaylığı gibi sebeplerden dolayı çekirdek malzeme için en uygun seçeneklerden biridir. Poliüretan köpüğün tercih edilmesinin bir diğer önemli nedeni ise, kullanım alanına göre köpüğün kullanıldığı sandviç kompozitlerin kolaylıkla üretilebilmesidir (Szatkowski *et al.* 2017). Poliüretan çekirdek malzemedan oluşan sandviç kompozitler farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu yapılar, ısı ve ses yalıtım özelliği nedeniyle bina yalıtımlarında yaygın kullanım alanı bulmuşlardır. Bununla beraber, PU köpükler düşük hızlı darbe yüküne maruz kaldıklarında, düşük mukavemet özelliği göstermektedirler. Bundan dolayı yüksek mukavemetli PU köpüklerin üretilmesi kritik önem arz etmektedir (Sandia 2018). PU çekirdek malzemeli sandviç yapı, Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Poliüretan köpük çekirdek malzemeli sandviç yapı

Ti6Al4V Tozu ve Hazırlanması

Yüksek mukavemet, düşük ağırlık oranı ve yüksek korozyon direnci gibi belirgin mekanik özelliklere sahip metal olan titanyum havacılık, otomotiv, sağlık, savunma gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metaller arasında en yüksek özgül mukavemet değerine sahip olması nedeniyle mukavemet, sıcaklık direnci ve hafiflik gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir (Tang *et al.* 2013; Mahamood and Akinlabi 2015). Bununla birlikte titanyum malzemesinin korozyon direncini ve mukavemetini daha da yükseltmek amacıyla düşük oranlarda alüminyum ve vanadyum ile alaşım (Ti6Al4V) yapılabilir. Ti6Al4V alaşımı genellikle havacılık ve protez imalat sektörü gibi hassas uygulamalarda kullanılan yüksek kaliteli malzeme olup, simetrik bir yapıya sahip olmasından dolayı diğer malzeme tozları ile karıştırıldığında homojen bir karışım elde edilebilir.

Titanyum matrisli kompozitleri (TMK) ve titanyum alaşımları; cerrahi implantlar ve protezlerde, uçakların iniş takımları ve motor türbin kanatçıklarında, deniz suyunda yüksek korozyon direnci gerektiren denizaltı uygulamalarında, ayrıca tank paletleri, füze kanatçıkları, gaz türbini gibi özel uygulama alanlarında da kullanılmaktadır (Tang *et al.* 2013; Anandajothi *et al.* 2016; Zhang *et al.* 2017; Sandia 2018; Arcam 2018). Ti6Al4V tozu çok yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık performansı gibi üstün özelliklere sahip olmasına rağmen, çok düşük aşınma direncine sahip olması makine elemanı olarak kullanımını kısıtlamaktadır (Mahamood and Akinlabi 2015). Bu dezavantajı gidermek amacıyla genellikle seramik malzemelerle birlikte TMK malzemeler üretilmektedir.

Elde edilen hibrit kompozitler yüksek sıcaklıklarda aşınma direnci ve yüksek mukavemet gibi üstün özelliklere sahip olabilmektedirler (Tang *et al.* 2013; Anandajothi *et al.* 2016). Bu hibrit kompozitler, havacılık ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Anandajothi *et al.* 2016).

Yüksek mekanik özellikler elde etmek için en önemli parametrelerden biri takviye oranıdır. Yapılan bir çalışmada, Ti6Al4V alaşımına düşük oranlarda ilave edilen takviye malzemeleri ile mikro sertlikte önemli bir artışın olduğu görülmüştür (Wei *et al.* 2011). Ancak takviye oranının artırılmasıyla birlikte ara yüzeyin zayıflamasına sebep olduğu görülmüştür (Arifin *et al.* 2015; Arifin *et al.* 2017).



MATERYAL ve YÖNTEM

Malzemeler

Bu çalışma kapsamındaki sandviç kompozit malzemeleri üretmek için kullanılan malzemeler hakkında kısa bilgiler aşağıda verilmiştir.

Yüzey tabakaları

Bu tez çalışmasında, sandviç malzemelerin yüzey plakaları, karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit tabakalardan üretilmiştir. Kullanılan karbon elyafı 200 gr/m² düzlem (plain) dokuma olup Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. firmasından tedarik edilmiştir. Yüzey malzemelerin üretiminde kullanılan epoksi reçine sistemi, (DTE 1200 epoksi reçine / DTS 1151 sertleştirici) Duratek Koruyucu Malzemeler San. ve Tic. A.Ş. firması tarafından temin edilmiştir.

Çekirdek malzemesi

Çekirdek malzemesi ise 1122-28 PU sistemi (Poliol ve MDI) Ravago Petrokimya A.Ş.'den tedarik edilmiştir. Sandviç kompozitlerin üretiminde çekirdek malzemesi olarak Ti6Al4V alaşım tozu katkılı ve katkısız PU köpükler kullanılmıştır.

Takviye malzemesi

PU çekirdek malzemesi, ağırlıkça % 0-3 arasındaki oranlarda Ti6Al4V alaşım tozu ile takviye edilmiştir. Toz parçacık boyutu 20 µm ve 45 µm olmak üzere iki farklı tipte kullanılmıştır.

Ara yüzey yapıştırıcısı

Sandviç kompozitlerin üretiminde, yüzey tabakasını çekirdek malzemesi ile yapıştırmak için epoksi reçine kullanılmıştır. (DTE 1200 epoksi reçine / DTS 1151 sertleştirici) Duratek Koruyucu Malzemeler San. ve Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir.

Yöntemler

Ti6Al4V tozunun hazırlanması

Takviye malzemesi Ti6Al4V tozu İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarlarında Retsch RS200 vibratory disc mill kullanılarak üretilmiştir. Toz

Üretim prosesi yıkama, gtme ve partikül (toz) boyut sınıflandırması olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Ti6Al4V talaşlar sıcak su kullanılarak deterjan ile yıkanmış ve n gtlmeden geçirilmiştir (şekil 5.a). İkinci aşamada ultrasonic banyoda yüksek saflıkta etil alkol ve aseton ile yıkanarak talaşlı imalat sırasında kullanılan soğutucu yağların yüzeyden giderilmesi sağlanmıştır (şekil 5.c). Yıkama prosesinden sonra talaşlar vakum etüvde 5 saat 80°C’de kurumaya bırakılmıştır. nc aşama halkalı gtme işlemidir. Talaşların gtme işlemi 150 ml’lik elik hazne içerisinde gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise elde edilen tozlar şekil 5.e’de görülen elek analizi ile <20 ve 20-45 µm partikül boyut aralığına göre sınıflandırılmıştır. şekil 5.d’ de gtme sonrasında elde edilen ürünler görülmektedir.



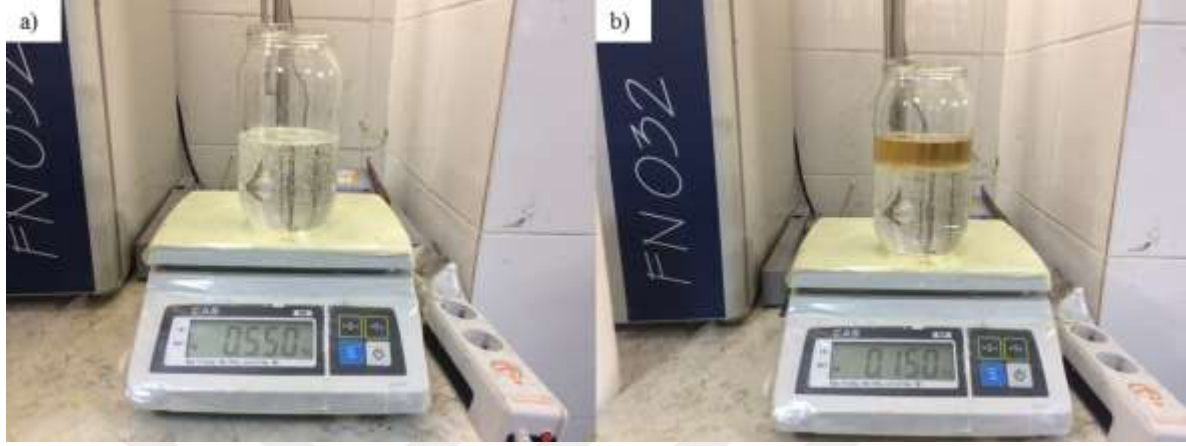
şekil 5. Ti6Al4V tozlarının hazırlanma prosesi

Yüzey plakaların retimi

Bu çalışmada, sandviç kompozitlerin yüzey plakaları karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitten üretilmiş ve plakaların retimi, Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı bünyesinde mevcut bulunan VARTM cihazı ile üretilmiştir. Çalışmada kullanılan karbon elyaf, Dost Kimya şirketinden, epoksi reçine sistemi (DTE 1200 epoksi reçinesi ve DTS 1151 sertleştiricisi) ise DURATEK firmasından tedarik edilmiştir.

Çalışma kapsamında, 500×550 mm ebatlarında 13 adet her biri 1,03 mm kalınlığında, 4 adet karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozit plakalar üretilmiş ve standartlara göre farklı boyutlarda (eğilme, titreşim, basma) numuneler kesilmiştir.

VARTM üretimi için epoksi reçine sistemi hazırlandıktan sonra plakaların üretimi için 465 gr elyaf ölçülmüş ancak emniyetli olması için elyaf ağırlığı 1.5 katsayısı ile çarpıldıktan sonra toplam kütle 700 gr olarak belirlenmiştir. Epoksi reçine sisteminin 550 gramı epoksi ve 150 gramı sertleştirici olacak şekilde ayarlanmıştır (DURATEK tarafından önerilen kütle karışım oranı, 100:27). Epoksi ve sertleştirici ağırlıklarının ölçülmesi Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Epoksi ve sertleştirici ağırlıklarının ölçülmesi (a) 550 gr epoksi ölçülmesi (b) 150 gr sertleştirici ölçülmesi

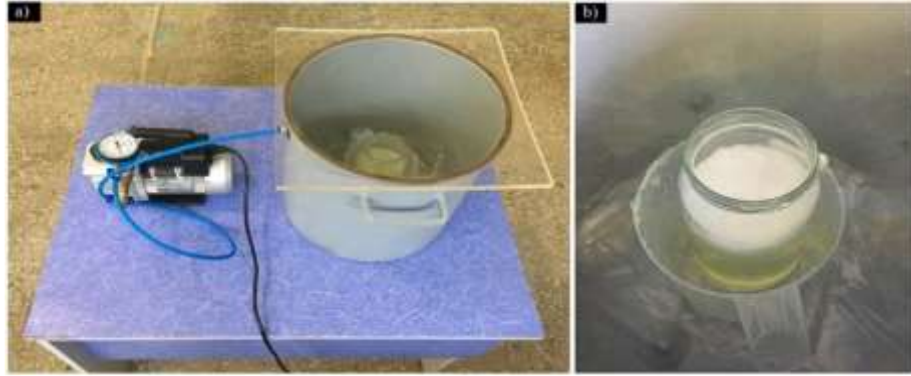
Epoksi ve sertleştirici bir cam kavanozda 1 dakika elle karıştırıldıktan sonra, mekanik karıştırıcıda 500 dev/dak'da 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Epoksi reçine sisteminin mekanik karıştırıcı ile karıştırılması Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Mekanik karıştırıcı ile epoksi reçine sisteminin karıştırılması

Mekanik karıştırma işlemi, epoksi reçine sisteminde homojen bir karışım sağlamıştır. Fakat bu karıştırma işlemi ile epoksi reçine sisteminin içerisinde kompozitin mekanik

özellikleri etkileyen hava boşluklarının tamamen giderilmesi için vakum haznesinde 45 dakika boyunca gaz giderme işlemi uygulanmıştır (Şekil 8).



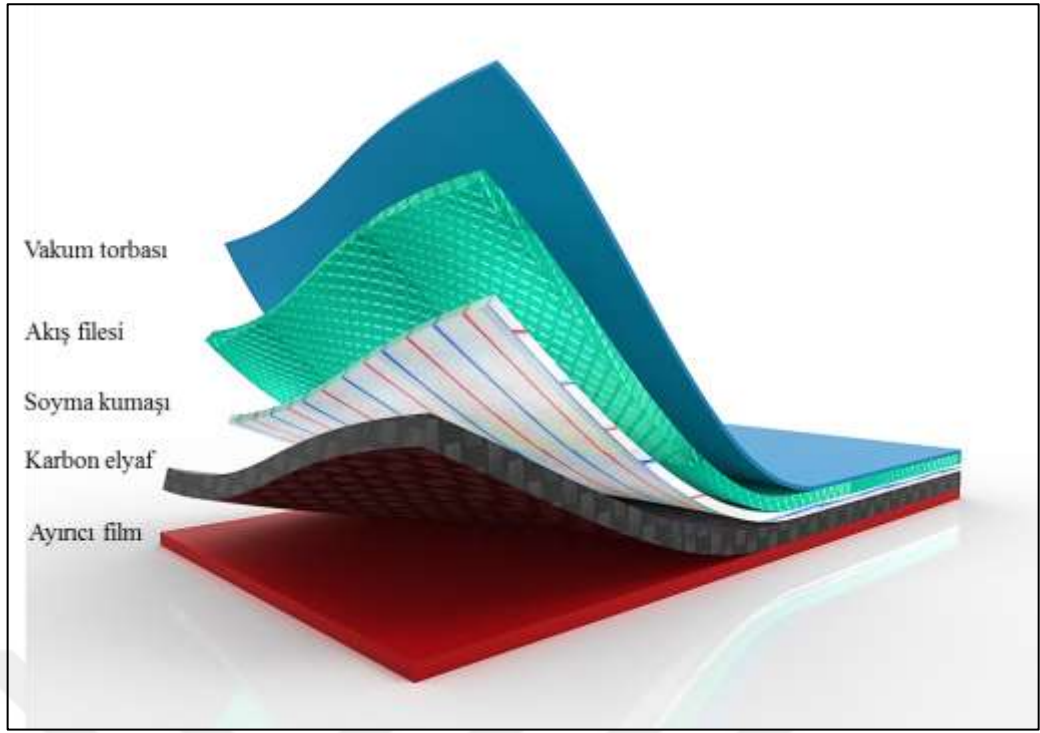
Şekil 8. Epoksi sisteminden gazın giderilmesi (a) Gaz giderme için kullanılan vakum haznesi (b) Gaz giderme işlemi sırasında epoksi yüzeyindeki hava boşlukları

Şekil 8’de görüldüğü gibi, epoksi reçine sisteminin hava boşluğu alınmış ve tüm üretimlerde 45 dakika standartlaştırılmıştır. Epoksi reçine sisteminin gaz boşluklarını içeren resimler Şekil 9’da görülmektedir.



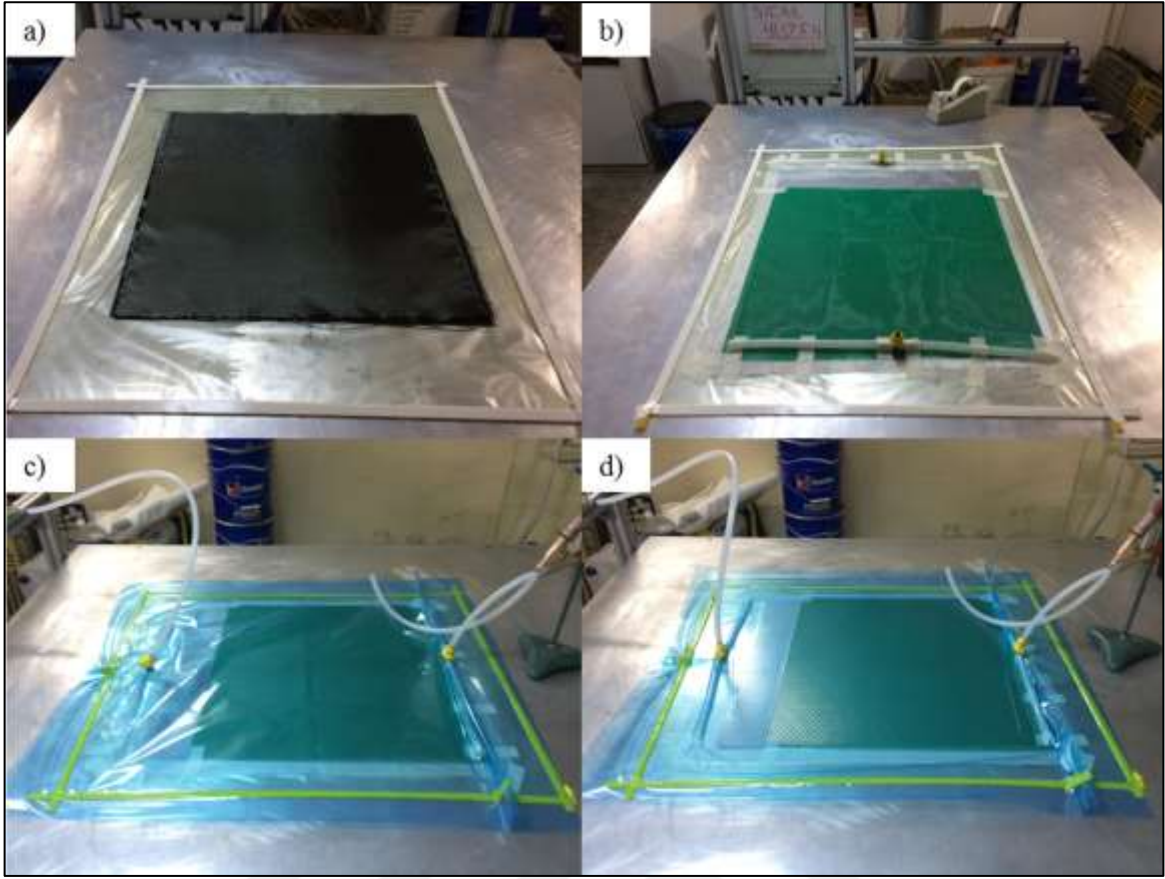
Şekil 9. Epoksi reçine sistemi (a) Karıştırmadan önce (b) Mekanik karıştırmadan sonra (c) 45 dakika gaz giderme işleminden sonra

VARTM tekniğinde, elyaf takviyeli tabakalı kompozitin üretimi epoksi reçine sisteminin VARTM tablası üzerine yapışmaması ve kolayca ayrılması için ayırıcı film kullanılmıştır. Film üzerine 4 adet karbon elyaf serilerek bunların üzerine üretimden sonra ayrılmasını kolaylaştırmak için ayırıcı kumaş serilmiştir. Bu kumaş gözenekli olduğu için epoksi reçine sisteminin infüzyon sırasında yüzeyden emerek karbon elyafa geçmesini sağlamaktadır. Vakum esnasında kumaş yüzeyinde belirli bir arayüzey kalınlığı oluşması ve epoksi reçinenin uygun dağılımının sağlanması için akış filesi serilmiştir. Akış filesinin giriş ve çıkış tarafına epoksi reçine sisteminin taşınması için spiral hortumlar yerleştirilmiş ve bu spiral hortumların, “t” şeklindeki bağlantı elemanı ile bir uçları vakum pompasına bağlanarak diğer uçları kapatılmıştır. Son olarak vakum ortamının oluşması için vakum torbası sızdırmazlık bandı ile yapıştırılmıştır. VARTM tekniğinin aşamaları sırasıyla Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 10. VARTM tekniğinin aşamaları ve tabakaların istiflenmesi

Tablanın yüzey sıcaklığı 100°C'ye getirildikten sonra vakum ve sıcaklık şartlarının sağladığı kontrol edilerek ucu kapalı olan hortum kontrollü bir şekilde epoksi reçine sisteminin bulunduğu kavanoz içerisine konularak infüzyon işlemi başlatılmıştır. Kalıp ortalama 80 saniye kapandıktan sonra 10 dakika reçine akışı sağlanarak besleme yapılmıştır. Reçine hortumu kapandıktan sonra 40 dakika vakum devam ettirilmiş ve hava boşluklarının minimize edilmiştir. VARTM ile yüzey plakaların üretim aşamaları Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. VARTM üretim adımları (a) Ayrırıcı filminin yapıştırılması ve üzerine karbon elyafın koyulması, (b) Soyma kumaşın ve akış filesinin koyulması, (c) Hortumların ve vakum torbasının koyulması, (d) Vakum ortamının oluşturulması.

Kalıp, 100°C’de 4 saat tutulup kürlenmeye bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında 6 saat soğutulmuş ve kalıp sökülerek karbon elyaf takviyeli plakalar elde edilmiştir. Bu plakalar CNC Router freze ile ilgili standartlara göre kesilerek titreşim, basma ve eğilme numuneleri elde edilmiştir. CNC Router ile kesilen numune boyutları Tablo 1’de verilmiş, Şekil 12’de ise kesilen numuneler görülmektedir.



Şekil 12. Yüzey tabakaları numuneleri (a) CNC ile kesme işlemi (b) Kesilmiş numuneler

Tablo 1. Yüzey Tabakalarının Numune Boyutları

Numune Tipi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
Titreşim	250	25	1.03
Basma	30	30	1.03
Eğilme	250	25	1.03

Poliüretan köpüğünün üretimi

Katkısız ve Ti6Al4V alaşım tozu katkılı PUF numuneler 400×450×50 mm ebatlarında kapalı tek bir kalıp kullanılarak üretilmiştir. Her bir orandan iki adet numune olmak üzere ikiz üretimler yapılmıştır. PUF numunelerin üretiminde kullanılan kalıp Şekil 13’de görülmektedir.



Şekil 13. PUF üretimi için kullanılan kalıp

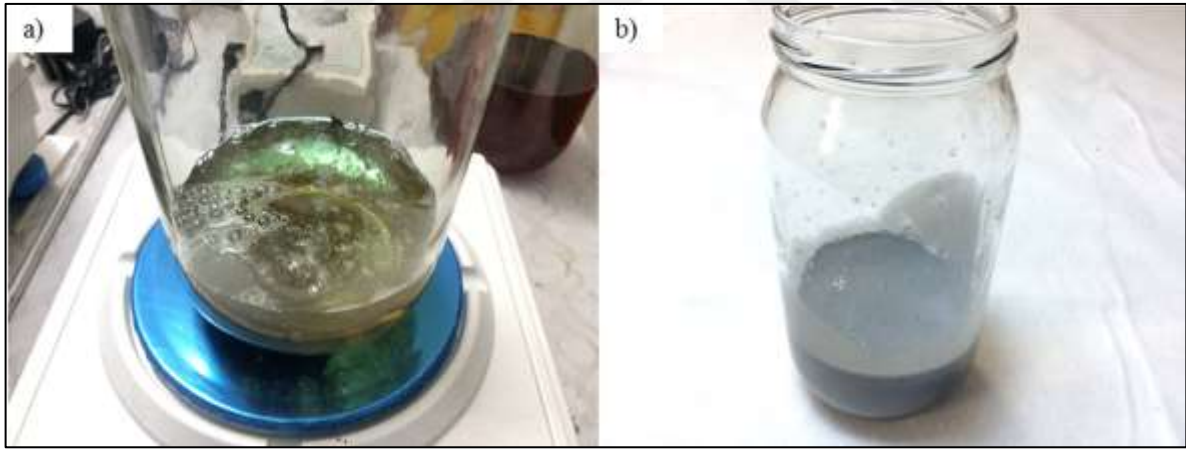
PUF numunelerin üretimi, katkısız PUF numuneleri kalıp için toplam karışım kütlesi sabit kalacak şekilde 450 gr tutulmuş olup, karışımda poliöl % 54,5 ve MDI % 45,5 oranındadır. Karışım oranları dikkate alınarak 450 gr MDI ve poliöl karışımı 10 saniye 2000 dev/dak’da mekanik karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra, karışım kalıba dökülmüş ve kalıp kapağı kapatılarak 20 dakika kabarmaya bırakılmıştır. Kalıp açıldıktan sonra numune 10 dakika kürlenmeye bırakılmıştır. Köpüğün kalıptan çıkmış hali Şekil 14’de gösterilmiştir.



Şekil 14. Köpüğün kalıptan çıkmış hali

Ti6Al4V alaşım tozu, 20 μm ve 45 μm boyutlarında olmak üzere iki farklı türde toplam ağırlık sabit olacak şekilde %1, 2, 3 oranlarında poliöl ile karıştırılmıştır.

Toplam ağırlık sabit tutularak Poliöl ve Ti6Al4V alaşım tozu 10 dakika 2000 dev/dak'da mekanik karıştırıcıda karıştırılmış olup, karıştırılmadan önce ve karıştırıldıktan sonra Şekil 15'de görülmektedir.



Şekil 15. (a) Poliöl ve Ti6Al4V karışımdan önce (b) Karışımdan sonra

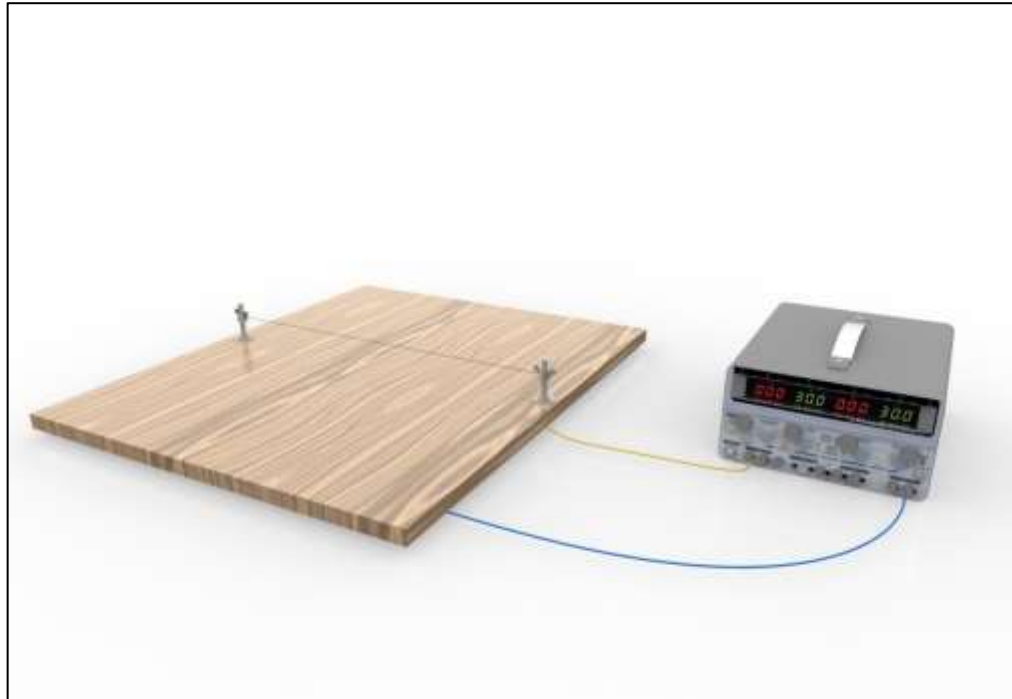
Karışımı mekanik karıştırıcıda 10 dakika karıştırdıktan sonra homojen bir karışım olması için ultrasonik karıştırıcı ile 15 dakika 50 W'da karıştırılmıştır. Bu süre boyunca karışım, ultrasonik karıştırıcıda oluşan sıcaklıkla birlikte kimyasal yapıda bir olumsuz durum oluşmaması için buzlu suda tutulmuştur. Ultrasonik karıştırma işlemi Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Karışımın ultrasonic karıştırıcıda karıştırılması

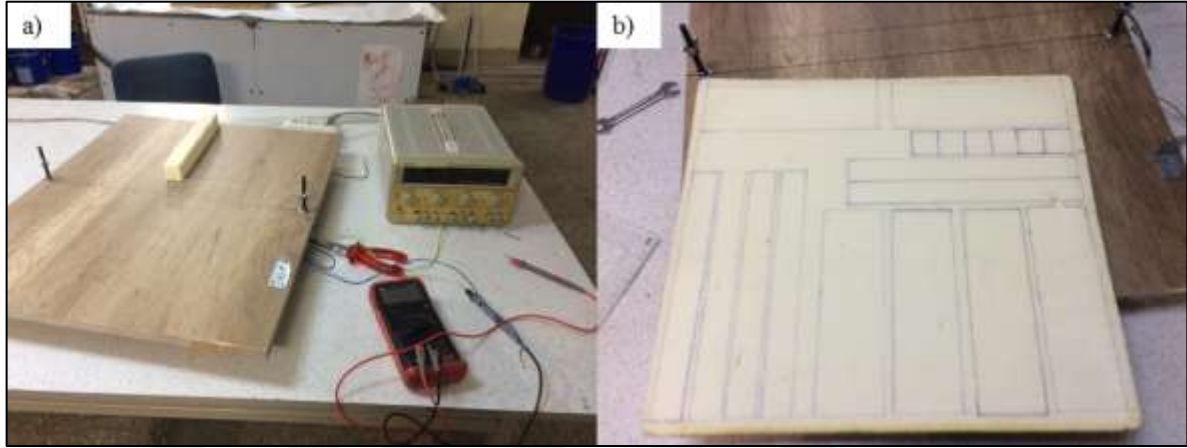
Bu işlemden sonra 10 dakika buzlu suda bekletildikten sonra karışıma belirli miktarda MDI eklenerek 10 saniye 2500 dev/dak' da mekanik karıştırıcıda karıştırılarak kalıp içine döküldükten sonra kalıbın kapağı kapatılarak 20 dakika köpüğün yükselmesi beklenmiştir.

PUF numuneler, üretilen PU köpükler yüzey plakalarının boyutlarına göre sıcak tel kesme makinasında standartlarına göre kesilmiştir. Sıcak tel kesme makinası Şekil 17'de görülmektedir.



Şekil 17. Sıcak tel kesme cihazı

Sıcak tel kesme cihazı, düz bir mdf parçası üzerine yerleştirilen iki civataya biri artı uç diğeri eksi uç olarak DC güç kaynağına kablo ile bağlanmıştır. DC güç kaynağından 1.8 Amper değerinde elektrik akımı geçirilerek tel ısıtılmış ve PUF numuneleri standart ölçülerde kesilmiştir. Sıcak tel kesme cihazı ile PUF numunelerine şablon oluşturularak kesilmesi Şekil 18’de görülmektedir.



Şekil 18. (a) Sıcak tel kesme cihazı (b) PUF numuneleri için kesim şablonu

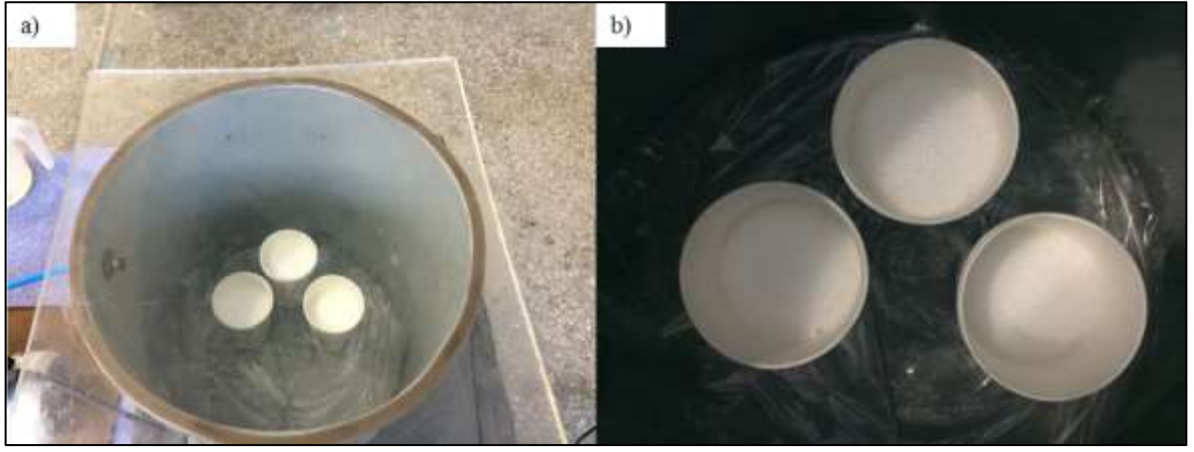
Bu çalışmada, basma, eğilme ve titreşim numuneleri tel kesme cihazı ile yüzey tabaka numunelerine göre standart ölçülerde kesilmiştir. Tablo 2’ de PU numune boyutları verilmiştir.

Tablo 2. Kesilmiş PU Numunelerin Boyutları

Numune Tipi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
Titreşim	250	25	28
Basma	30	30	28
Eğilme	250	25	28

Numuneleri sandviçleştirme işlemi

Numuneleri sandviçleştirme işleminde, ara yüzey yapıştırıcı olarak DTE 1200 epoksi/DTS 1151 sertleştirici epoksi reçine sistemi kullanılmıştır. Her numune için 500 g epoksi reçine sistemi, bir kavanoz içinde hazırlanarak mekanik karıştırıcıda 500 dev/dk’da 5 dakika karıştırılmıştır. Epoksi reçine sistemi, kürlenme süresinden dolayı daha hızlı işlem yapmak için üç karton bardağa alınmıştır. Karıştırmada oluşan hava kabarcıkları ara yüzeyde bir hasara sebep olmaması için vakum çemberi içerisinde -0.8 atm basınçta 15 dakika bekletilmiştir. Vakum çemberi Şekil 19’da görülmektedir.



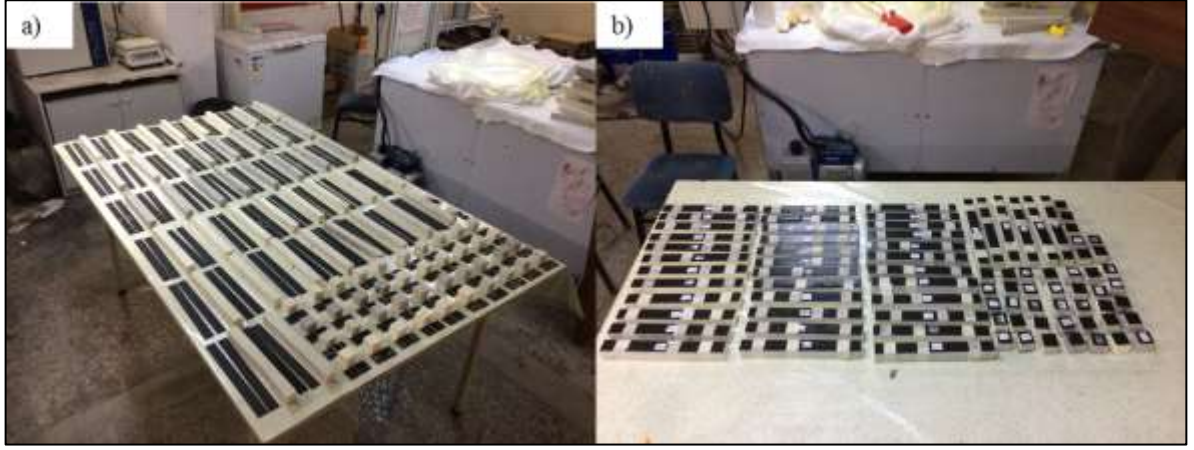
Şekil 19. (a) Vakum çemberi (b) Gaz alma işlemindeki hava kabarcıkları

Epoksi reçine sistemi, hazırlanmış olan yüzey tabaka numunelerine fırça ile aynı miktarda ve aynı yönde olacak şekilde sürülerek uygulanmıştır. Şekil 20’de yüzey tabakalarına ara yüzey yapıştırma işleminin yapılışı görülmektedir.



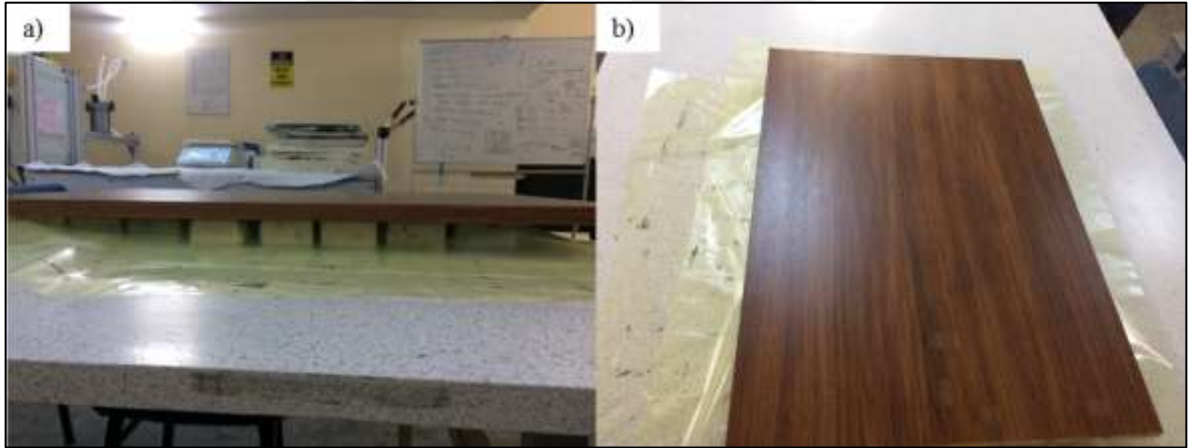
Şekil 20. Yüzey tabakalarına ara yüzey yapıştırma işlemi

Her bir tipteki çekirdek malzemesi için 6 adet numune hazırlanmıştır. Ara yüzey yapıştırıcısı alt ve üst yüzey plakalarına sürüldükten sonra çekirdek malzemesi dikkatli şekilde yerleştirilmiştir. Çekirdek malzemenin kaymaması için kağıt bant ile sarılmıştır. Bu işlem Şekil 21’de gösterilmektedir.



Şekil 21. (a) Sandviçleştirilecek numuneler (b) Yapıştırma işlemi sonrası

Yapışmayı artırmak için, Şekil 22’de görüldüğü gibi, sandviç numunelerin üzerine 50×75 cm boyutlarında bir mdf ağırlık konulmuştur. Sandviç numunelerin kürlenmesi için oda sıcaklığında 48 saat bekletilmiştir. Ahşap mdf ile numuneler arasında yapışma olmaması için iki malzeme arasına ayırıcı film konulmuştur.



Şekil 22. (a) Ahşap mdf altındaki sandviç numuneler (b) Ahşap ağırlığın üst görünümü

Sandviç yapı külendikten sonra üzerindeki fazla yapıştırıcılar temizlenmiştir. Numune kodları düzenlenerek üzerlerine yazılmıştır. Bazı sandviç kompozitlerin testten önceki son halleri Şekil 23’de görülmektedir.

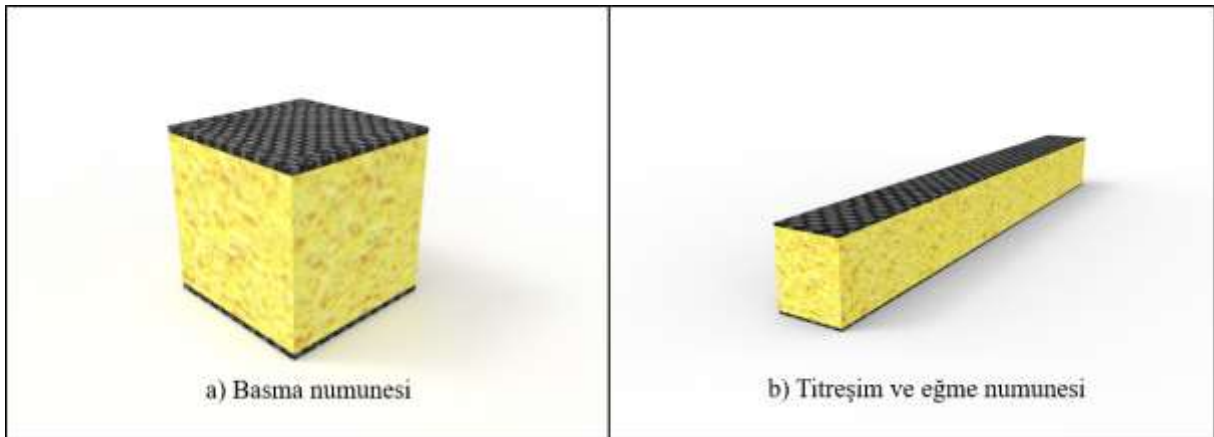


Şekil 23. Bazı sandviç kompozitlerin son hali

ASTM standartlarına göre üretilen sandviç kompozitlerden elde edilen eğilme, basma, titreşim numunelerinin boyutları Tablo 3'te verilmiştir. Sandviç kompozit numune görselleri de Şekil 24'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Sandviç Numunelerin Boyutları

Numune Tipi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
Eğilme	250	25	30
Titreşim	250	25	30
Basma	30	30	30



Şekil 24. Kompozit numune görselleri

PU köpük numunelerin karakterizasyonları

PU köpüklerin mikroyapı analizleri İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkez Laboratuvarındaki Carl Zeiss 300VP model SEM kullanılarak yapılmıştır. Şekil 32'de verilmiş

olan SEM görüntüleri PU köpük ürünlerin hücre yapısını ve Ti6Al4V alaşım partiküllerinin yapı içerisinde dağılımını göstermektedir. FTIR analizleri ise Şekil 33’de verilmiştir.

Sandviç numunelerin dinamik analizleri

Bu çalışmada sandviç kompozitlerin dinamik testleri, Atatürk Üniversitesi Makine Dinamiği ve Teorisi laboratuvarında yer alan lazer vibrometre, PULSE titreşim ölçü cihazı ME'scope VES® Modal Analiz Programı kullanılarak ASTM E756 standardına göre yapılmıştır. Bu deneylerde sandviç kompozitlerin birinci, ikinci ve üçüncü doğal frekanslar ve sönüm oranları elde edilmiştir. Sandviç kompozitlerin dinamik testi için kullanılan sistem Şekil 25’de görülmektedir.



Şekil 25. Titreşim analizleri için deney düzeneği

Bu deneyler, farklı oranlardaki 6’şar numunenin her birine 3 test uygulanarak yapılmış ve her numune tipi için ortalama değer hesaplanmıştır. Dinamik deneyler; ankastre-serbest ve serbest-serbest sınır şartlarında yapılmış olup deney adımları aşağıdaki gibidir;

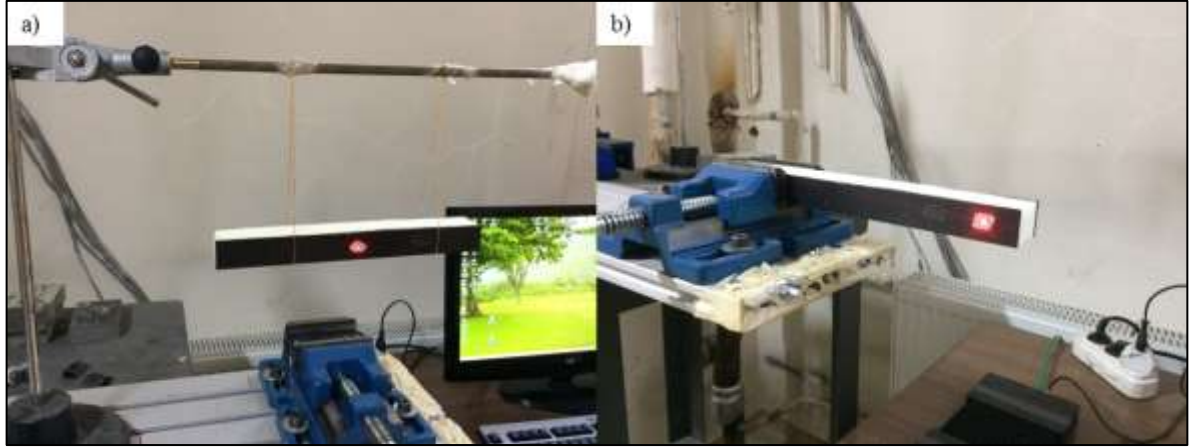
Testler, ankastre- serbest ve serbest- serbest koşulu kullanılarak yapılmıştır.

- Ankastre-serbest sınır şartı için, test standartına göre her bir numunenin bir ucu 40 mm mengenede kalacak şekilde Torkmetre yardımıyla 4 Nm’lik tork ile mengeneye sabitlenmiştir. ASTM standardına göre PU çekirdek malzemesinin ezilmesini önlemek için mengene ağızları arasında sandviç kompozitlerin kalınlığında metal plaka yerleştirilmiştir.

- Ölçümlerin standart olması için bütün numuneler üzerindeki aynı noktalara alüminyum folya yapıştırılmıştır ve lazer bu noktaya hedeflenmiştir.
- Numunelerdeki bu noktalara sabit hızla, çekiç ile vurulmuştur.
- Çizilen grafiklerle numunelerin doğal frekans ve sönüm oranları elde edilmiştir.

Serbest-serbest sınır şartları için yapılan deneyler;

- Deney numuneleri Şekil 26'da görüldüğü gibi iki ucu iplerle bağlanarak asılmıştır.
- Numunenin tam orta noktasına alüminyum folyo yapıştırılarak lazer ışığı odaklanmıştır.
- Çekiç ile numunenin ortasına gönderilen lazer ışığının arkasına sabit hızda vurulmuştur.
- Tüm numuneler için doğal frekans ve sönüm oranları bulunmuş ve grafikleri çizilmiştir.



Şekil 26. Titreşim deney düzeneği (a) Serbest-serbest sınır şartı (b) Ankastre-serbest sınır şartı

Ölçülen değerler excel dosyasında tablolatırıldıktan sonra Denklemden verilen güven aralığı formülü ile grafikler çizilmiş ve hata çubukları bu denkleme göre hesaplanmıştır ve basma, eğilme, burkulma ve darbe testlerinde de aynı denklem kullanılmıştır.

$$GA = \frac{1,96 \times SDS}{\sqrt{n}}$$

Sandviç numunelerinin basma testleri

Bu çalışmada basma testleri ASTM C365 standardına göre, Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü mekanik laboratuvarında yer alan çekme test cihazı (Shimadzu AGIS100, Shimadzu Corporation/Japan) ile yapılmıştır. Her basma numune tipi için 6 sandviç kompozit numune test edilmiştir. Basma testinin yapıldığı test cihazı Şekil 27'de görülmektedir.



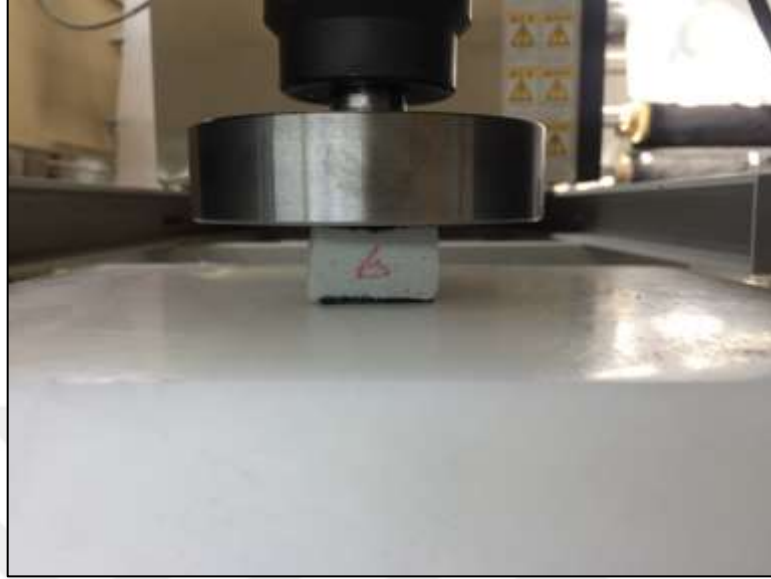
Şekil 27. Çekme test cihazı

Basma testine başlamadan önce, alt ve üst yüzeylerin düzgün ve paralel olmasına dikkat edilmiştir. Alt zemin termoplastik malzeme ile desteklenmiştir. Alt zemindeki termoplastik parçanın yüzeye paralel olması su terazisi ile kontrol edilmiştir. ASTM standartlarına göre basma yükü numune üzerine sabit olarak uygulanması gerekmektedir. Termoplastik malzemenin yüzey paralellığı su terazisi ile yüzey kontrolü Şekil 28’de görülmektedir.



Şekil 28. Su terazisi ile yüzeyinin kontrolü

Numunelere aynı şartlarda test uygulamak için basma yükünün uygulandığı hızda, alt yüzeyde bulunan termoplastik malzeme üzerine yuva çizilmiştir. Basma testi, tüm numuneler için standart olarak, basma hızı 0.5 mm/dak ve 8 mm deformasyona (yer değiştirmeye) kadar uygulanmıştır. Basma yüklemesi altındaki sandviç numunesi Şekil 29'da görülmektedir.

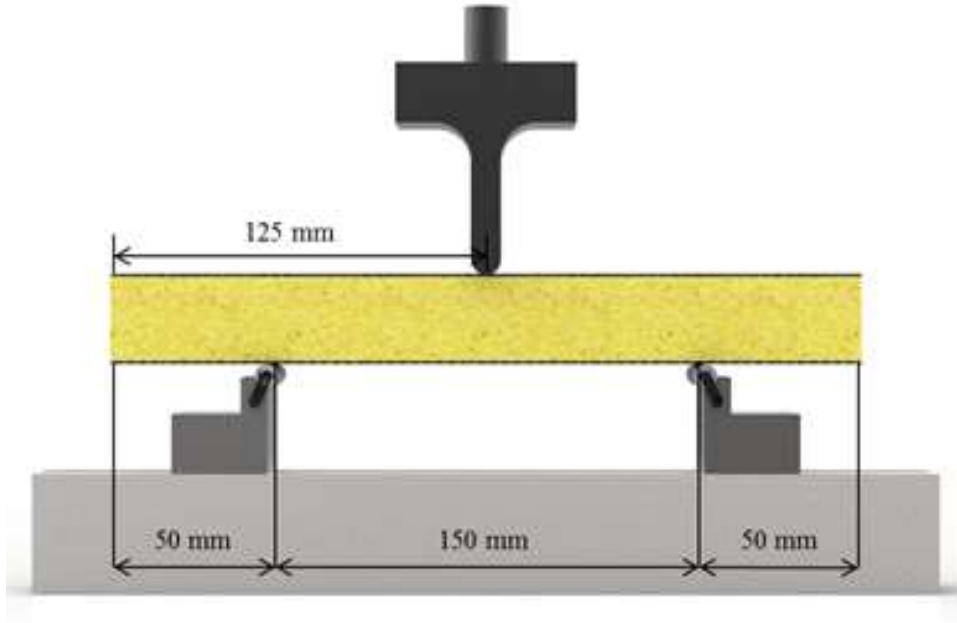


Şekil 29. Sandviç numune için basma deneyi

Her tip numuneden, 6 adet numuneye uygulanan basma testinde, numunelerin maksimum yükleri hesaplanmış Excel tablosu oluşturulmuştur. Elde edilen bu yük değerlerine göre grafikler çizilmiş ve denklem ile güven aralıkları bulunarak hata çubukları grafiklerine eklenmiştir.

Sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testleri

Sandviç numunelerin üç nokta eğilme deneyleri de, çekme test cihazında yapılmıştır. Şekil 30'da görülen standart üç-nokta eğilme aparatı test cihazının yükleme hücreğine yerleştirildikten sonra, eğilme numunesi simetrik olarak mesnetler üzerine yerleştirilmiştir. Deney standartına göre mesnetler arası mesafe 150 mm'dir ve numunelerin her iki ucunda 50 mm'lik çıkma bırakılmıştır. Numunelerde burulma oluşmasını engellemek ve iki mesnetin birbirine paralel olması amacıyla alt zemine çizilen düz çizgi ile paralellik sağlanmıştır. Üç-nokta eğilme deneylerinde de her tip numune için 6 adet test yapılmıştır.



Şekil 30. Üç-nokta Eğilme deneyi şeması

Üç-nokta eğilme deneylerinde oluşan kırılmalar (hasarlar); yüzey plaka kırılması (mod I), ara yüzey ayrılması (mod II) ve çekirdek kırılması (mod III) şeklinde üç modda incelenmiştir. Deneylerde ölçülen maksimum yüklerin ortalamaları alınarak excel dosyasına kaydedilip grafikler çizilmiştir. Ayrıca, Denklem 3.1 ile güven aralığı değerleri hesaplanarak grafiklere eklenmiştir. Şekil 31’de üç-nokta eğilme testi altındaki sandviç numunesi görülmektedir.



Şekil 31. Eğilme testi altındaki sandviç numune

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Karakterizasyon

PU köpüklerin mikroyapıları, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkez Laboratuvarında mevcut bulunan Carl Zeiss 300VP model SEM kullanılarak incelenmiştir. Şekil 32'deki SEM görüntülerinde, PU köpüklerin hücre yapıları ve Ti6Al4V alaşım tozu partiküllerinin yapı içerisindeki dağılımları görülmektedir.

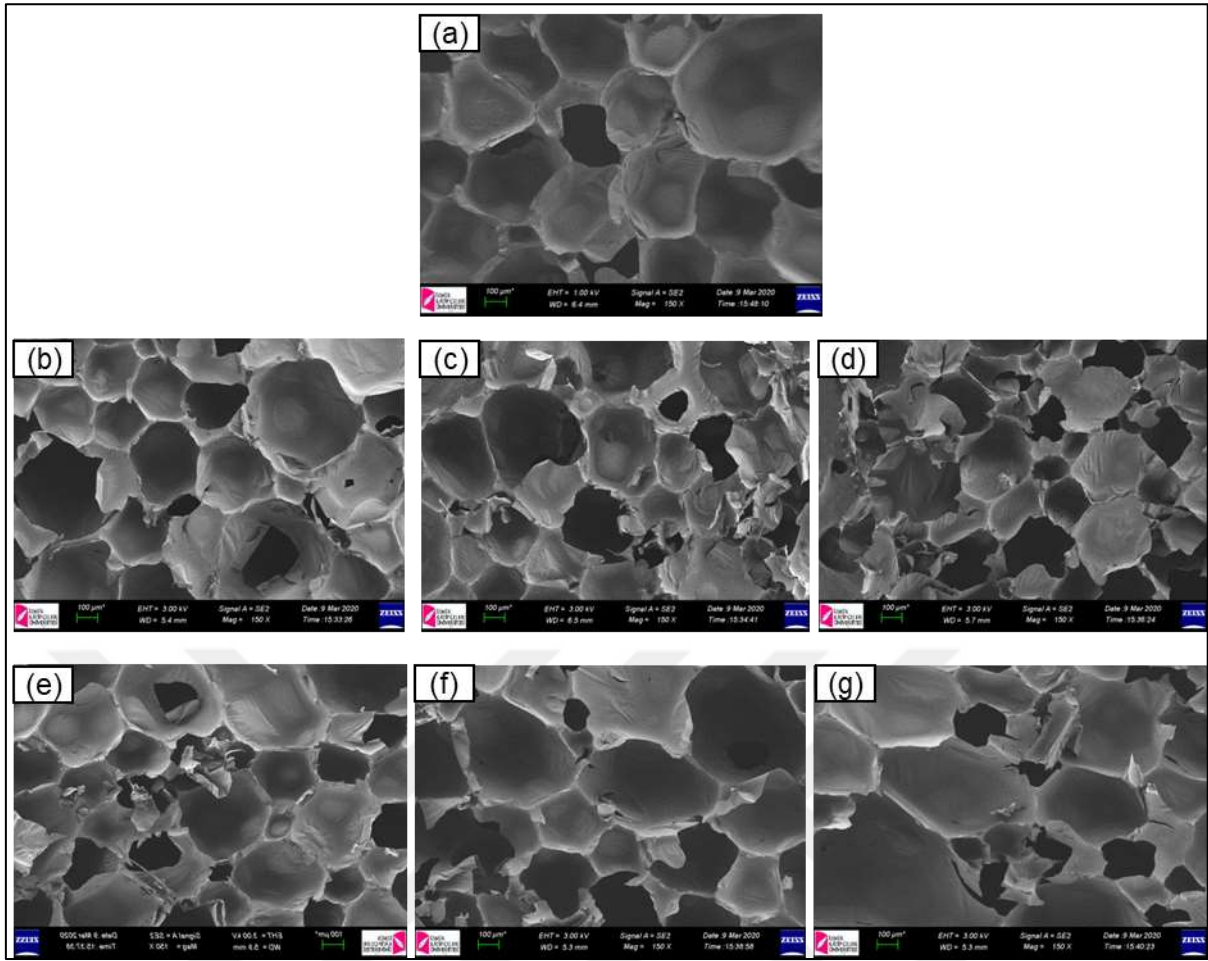
Şekil 32-a'ya göre saf (neat) PU numunelerin hücre yapısının daha düzenli olduğu görülmekte olup, takviye malzemesinin oranının ve boyutunun, PU köpüklerde hücre boyutunun ve şeklinin belirlenmesinde etkili olduğu düşünülmektedir.

P20 kodlu numunelerde takviye oranı arttıkça hücre boyutlarında azalma olmakla birlikte, P45 serisi numunelerde takviye oranı arttıkça partikül boyutunun da etkisiyle hücre yapısında yığılma ve saf PU'dan daha yoğun bir hücre morfolojisinin meydana geldiği görülmüştür.

Ti6Al4V alaşım toz oranının artırılması, viskozitede artışa yol açarak hücre büyümesini engellediği ve saf PU köpüğe nazaran daha küçük hücre yapısının meydana geldiği anlamına gelmektedir (Silva *et al.* 2013; Pauzi *et al.* 2014).

Saf PU numunelere kıyasla P45 kodlu numunelerde hücre boyutu küçülmekle birlikte takviye oranı arttıkça daha büyük boyutlu bir hücre yapısının teşekkül ettiği gözlenmiştir. Bu durum P45 kodlu numunelerde Ti6Al4V alaşım toz boyutunun PU köpük hücre yapısını bozacak büyüklükte olduğunu göstermekte olup partikül boyutunun önemli bir parametre olduğu değerlendirilmesi yapılabilir. (Silva *et al.* 2013). Ayrıca katkı malzemesi olarak kullanılan Ti6Al4V alaşım tozunun homojen bir şekilde yapıda dağılmadığı dolayısıyla topaklanma meydana geldiği gözlenmiştir. Hava kabarcıkları ve mikro gözenek oluşumlarının engellenmesi, katkı malzemesinin matris içerisinde homojen dağılmaması ve düşük yüzey gerilmeleri karıştırma işlemlerinden kaynaklanmış olacağı değerlendirilebilir.

Köpüklerin morfolojisindeki değişim ve katkı malzemesinin matris içerisindeki dağılımı mekanik özelliklerinin belirlenmesinde büyük önem arz etmektedir. Partiküllerin topaklanması, matris ile takviye arasında zayıf arayüzey oluşturmakta ve bu arayüzey PU köpüğün mukavemetini azaltmaktadır (Cao *et al.* 2005; Pauzi *et al.* 2014).



Şekil 32. SEM görüntüleri; (a) Saf, (b) P20-1, (c) P20-2, (d) P20-3, (e) P45-1, (f) P45-2, (g) P45-3

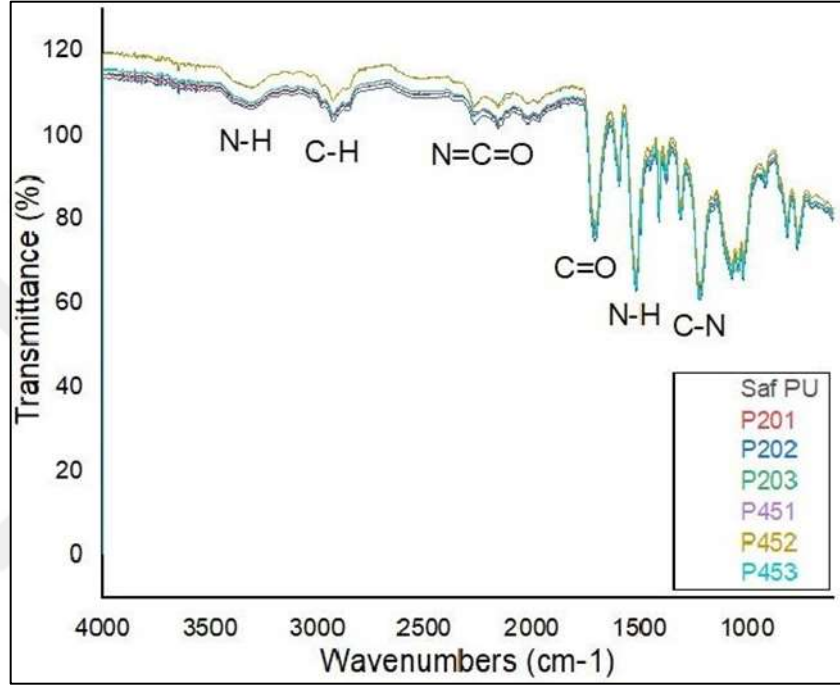
Yapılan FTIR analizlerinde, $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ 'de karakteristik N-H gerilme titreşimleri gözlenmiştir. Bu polimerizasyonun uygun bir şekilde oluştuğunu gösterirken $1500-1550\text{ cm}^{-1}$ 'deki pik değeri bu grupların eğilme titreşimlerini temsil etmektedir.

İzosiyanat ve üretan grupları arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanan N-H pikleri, sistem içerisinde kalan OH gruplarının olduğuna işaret etmektedir (Sormana and Meredith 2004; Corcuera *et al.* 2010). $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ 'de C-H bağı simetrik ve asimetric gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. $2200-2500\text{ cm}^{-1}$ 'deki düşük yoğunluklu pik, köpük üretimi sırasında kullanılan izosiyanatın miktarına bağlı olarak reaksiyona girmemiş $\text{N}=\text{C}=\text{O}$ gruplarının varlığından kaynaklanmaktadır (Dzulkifli *et al.* 2014). Ayrıca, $1700-1800\text{ cm}^{-1}$, $1000-1250\text{ cm}^{-1}$ 'deki maksimum absorpsiyon sırasıyla C=O karbonil gruplarına, C-N gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir (Thirumal *et al.* 2008).

Saf PU köpük ile Ti6Al4V alaşım tozu katkılı PU köpükler karşılaştırıldığında FTIR spektrumlarının benzerlik gösterdiği ve tüm numunelerin PU'nun karakteristik özelliklerine sahip olduğu görülmektedir. Tablo 4'de PU köpüklerin FTIR analiz sonuçları ve Şekil 33'de ise PU köpüklerin FTIR spektrumları verilmiştir.

Tablo 4. PU Köpüklerin FTIR Analiz Sonuçları

Bant Aralığı (cm ⁻¹)	Bağ Yapıları
3300-3500	N-H Stretching vibrations
2800-3000	C-H Stretching vibrations
2200-2500	N=C=O Stretching vibrations
1700-1800	C=O Stretching vibrations
1500-1550	N-H Stretching vibrations
1000-1250	C-N Stretching vibrations

**Şekil 33.** PU köpüklerin FTIR spektrumları

Titreşim Testi Sonuçları

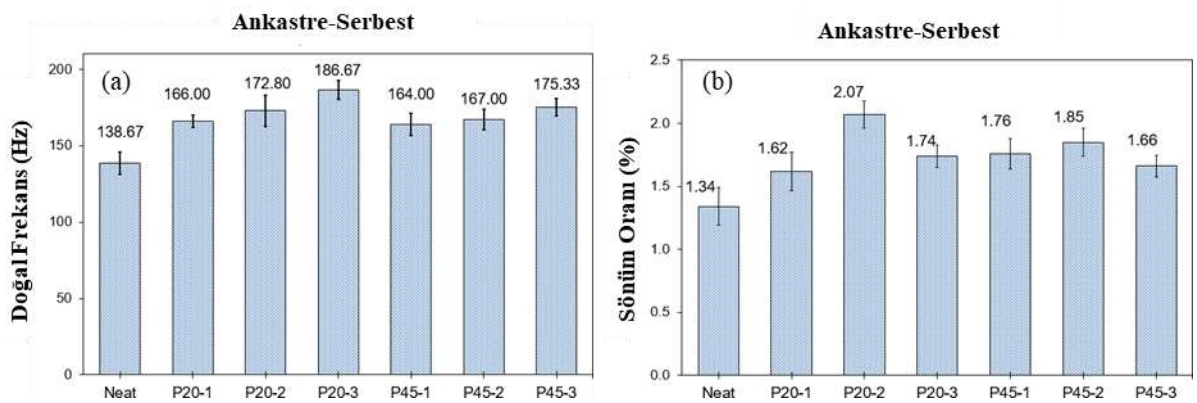
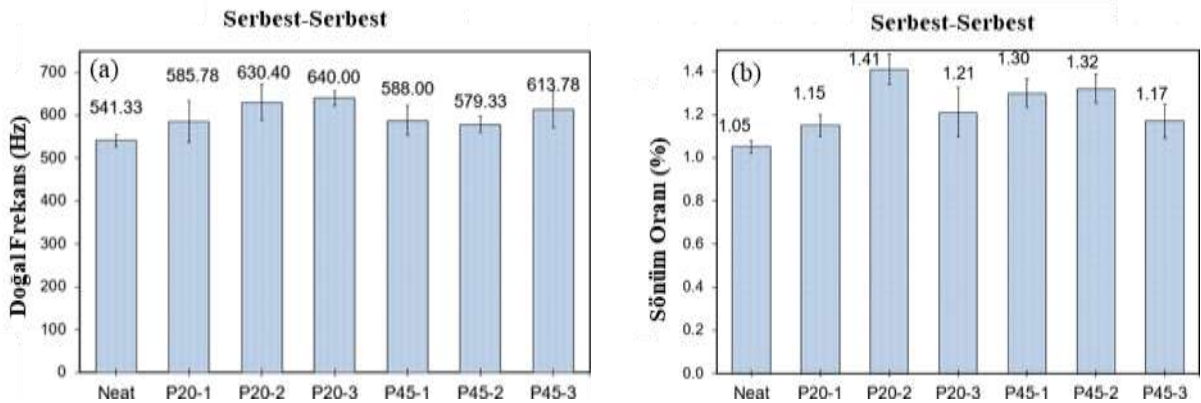
Ankastre-serbest ve serbest-serbest sınır şartları için deneysel modal analizleri yapılarak sandviç numuneler için ilk doğal frekans ve sönüm oranı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5 ve 6'da, çizilen grafikler ise Şekil 34 ve 35'de verilmiştir.

Tablo 5. Birinci Doğal Frekans ve Birinci Sönüm Oranı Değerleri (Ankastre-serbest sınır şartı)

Numune	1. Doğal Frekans (Hz)	Standart Sapma (Hz) (±)	1. Sönüm Oranı	Standart Sapma (%) (±)
Saf	138.67	7.20	1.34	0.15
P20-1	166.00	3.83	1.62	0.15
P20-2	172.80	10.11	2.07	0.11
P20-3	186.67	6.24	1.74	0.09
P45-1	164.00	7.13	1.76	0.12
P45-2	167.00	6.87	1.85	0.11
P45-3	175.33	5.55	1.66	0.08

Tablo 6. Birinci Doğal Frekans ve Birinci Sönüm Oranı Değerleri (Serbest-serbest sınır şartı)

Numune	1. Doğal Frekans (Hz)	Standart Sapma (Hz) (\pm)	1. Sönüm Oranı	Standart Sapma (%) (\pm)
Saf	541.33	14.05	1.05	0.03
P20-1	585.78	48.15	1.15	0.05
P20-2	630.40	41.34	1.41	0.07
P20-3	640.00	17.44	1.21	0.11
P45-1	588.00	34.87	1.30	0.07
P45-2	579.33	19.18	1.32	0.07
P45-3	613.78	42.20	1.17	0.08

**Şekil 34.** (a) A-S 1. Doğal frekans ortalamaları, (b) A-S 1. Sönüm oranı ortalamaları**Şekil 35.** (a) S-S 1. Doğal frekans ortalamaları, (b) S-S 1. Sönüm oranı ortalamaları

Her iki takviye numunesinin bütün katkı oranlarında, katkısız numunelere nazaran daha yüksek doğal frekans ve sönüm oranı değerleri elde edilmiş olup bu değerler Şekil 34 ve 35’de gösterilmiştir. Burada sınır şartlarının, doğal frekans ve sönüm oranı değerleri üzerinde etkilerinin olmadığı görülmüş olup P20-2 takviyeli sandviç numuneler için en yüksek sönüm oranı değerleri elde edilmiştir.

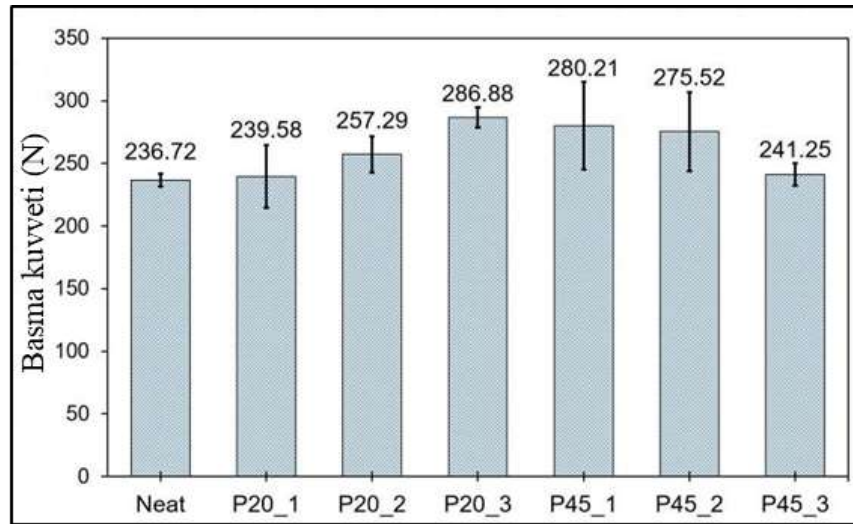
Genel olarak, sönümlenme oranı %2’ye kadar takviye oranında artışa sebep olurken, katkı oranının artması ile sönüm oranında azalma görülmüştür. Bu sonuç, %2 takviye oranının,

takviye-matris, takviye-takviye iç sürtünmeleri, ara yüzey yapışması gibi sönüm oranı için en uygun takviye miktarı olduğunu göstermektedir (Alva and Raja 2011; Chary and Ahmed 2018). Topaklanmadan sebebiyle, parçacıklar ile PUF matrisi arasında sürtünmenin azalmasından dolayı daha yüksek takviye oranlarına sahip numunelerin sönüm oranlarında düşüş eğilimi gözlemlenmiştir (Wang *et al.* 2010; Zhang *et al.* 2016). Her iki katkı grubu için Ti6Al4V alaşım tozu oranı arttıkça 1. doğal frekanslarda artış olmuştur. Bir sistemin doğal frekansları, rijitliğin ve kütesinin fonksiyonu olarak bilinmektedir. Mod şekli ise daha çok sınır şartarı ile ilgilidir.

Çalışmada doğal frekansa etkileyen iki ana parametreden biri olan kütle sabit tutulmuş olup, numunelerin ritlikleri katkı oranlarının artması ile artmıştır. Katkılı numunelerin eğilme dayanımlarında görülen artış bu varsayımı desteklemektedir. Bu durumun yapılan katkıyla ilgili numunelerin sertlik ve mukavemetinde oluşan artışla ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu artış doğal frekansta da meydana gelmiştir.

Basma Testi Sonuçları

Basma deneylerinden elde edilen ortalama basma yükleri Şekil 36'da verilmiştir. Ortalama basma yükleri katkısız (saf), P20-1, P20-2, P20-3, P45-1, P45-2 ve P45-3 numuneleri içinde en yüksek değer P20-3 serisi numunelerinde meydana geldiği ve ortalama basma yükünün katkısız numuneye göre %21,18 daha fazla olduğu görülmüştür. Diğer artış oranları P20- 1, P20-2, P45-1, P45-2 ve P45-3 numuneleri için sırasıyla %1,20, %8,68, %18,37, %16,39 ve %1,91 şeklinde belirlenmiştir.



Şekil 36. Ortalama basma kuvvetleri

Basma testi aşamasında ki PU çekirdek malzemeli kompozit malzeme Şekil 37'de görülmektedir.



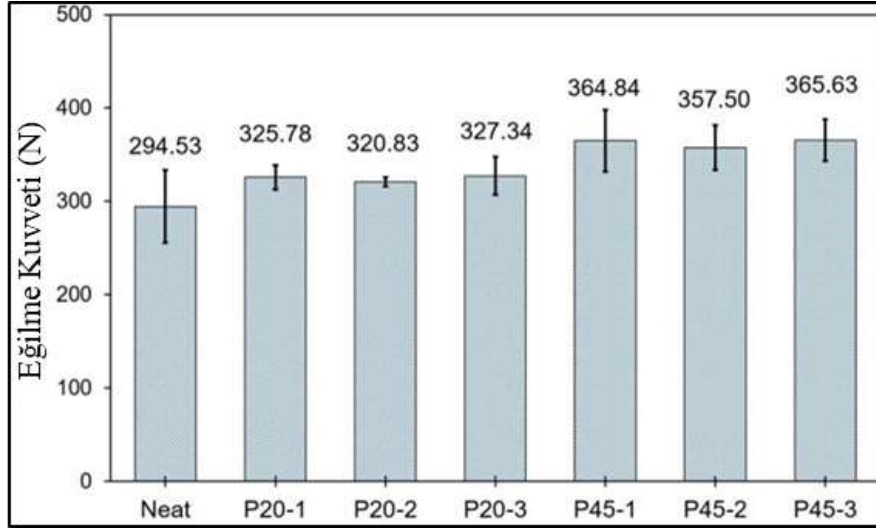
Şekil 37. Basma testi aşamasında ki PU numunesi

P20 numunelerinde artan katkı oranıyla birlikte basma kuvvetinin arttığı görülmüştür. P45 numunelerinde ise bu durum tam tersi olarak azalmıştır. PU içerisindeki Ti6Al4V alaşım tozlarının artan partikül boyutlarıyla homojen olmayan bir karışım oluşturarak topaklanmaya neden olmuş ve katkı oranı arttıkça basma kuvvetinde azalma olduğu görülmüştür.

Yapılan bir çalışmada Adnan *et al.* (2013), PU çekirdek malzemeli sandviç kompozitlere, katkı malzemesi olarak CNT ekleyerek basma testi sonuçlarını incelemiştir. %1-3 katkı oranlarında ki artışla basma kuvvetinin azaldığını gözlemlemiştir. En düşük basma kuvvetini %3 CNT katkı oranına sahip olan numune göstermiştir. Ayrıca %0,5 CNT katkılılarda basma kuvvetinde artış gözlemiştir.

Üç-Nokta Eğilme Deneyi Sonuçları

Katkısız, P20-1, P20-2, P20-3, P45-1, P45-2 ve P45-3 numuneleri için yapılan üç-nokta eğilme deneylerinden elde edilen ortalama eğilme yükleri Şekil 38'de verilmiştir. Bu numuneler içinde en yüksek ortalama eğilme yükleri P45-1 ve P45-3 numunelerinde elde edilmiş olup katkısız numuneye göre sırasıyla, %23,87 ve %24,14 daha fazla olduğu belirlenmiştir. P20-1, P20-2, P20-3 ve P45-2 numuneleri için artış oranları %10,61, %8,92, %11,13 ve %21,37 şeklinde belirlenmiştir.

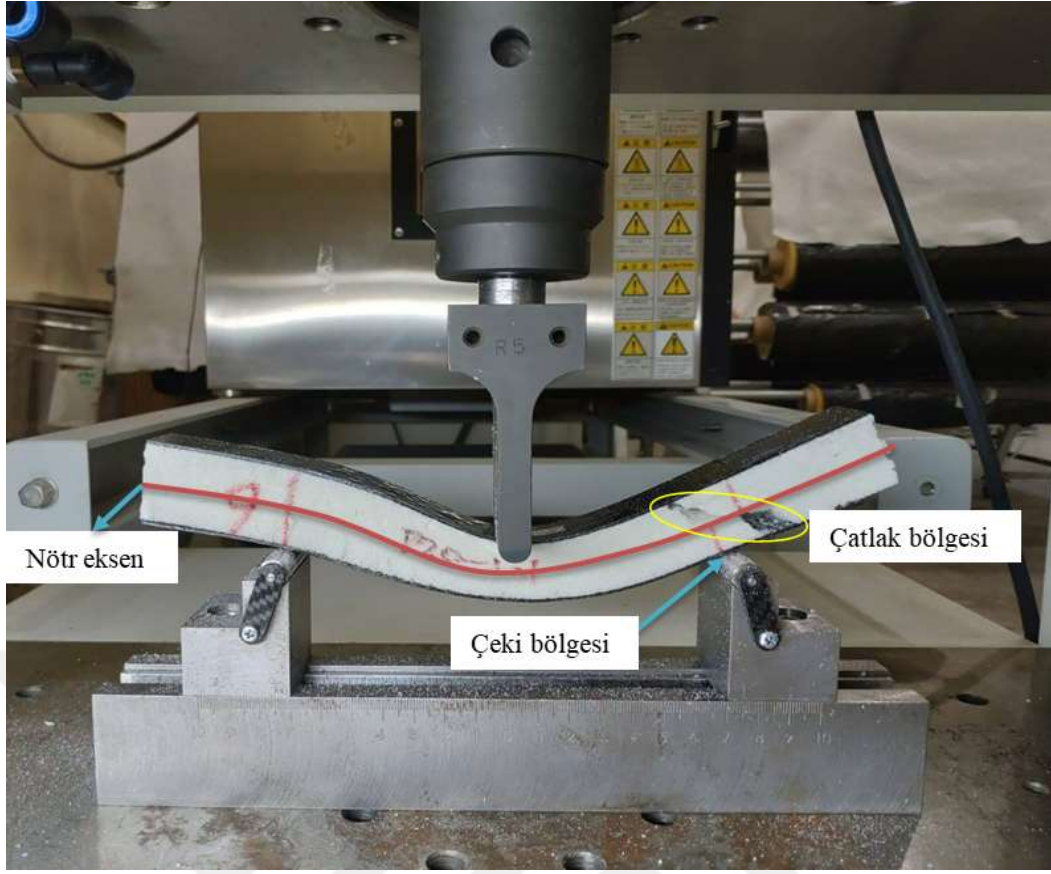


Şekil 38. Ortalama eğilme kuvvetleri

Katkı malzemesinin tanecik boyutu büyüdükçe (P45 numunelerinde), yük taşıma kapasitesinin arttırdığı görülmüştür.

Yapılan bir çalışmada, Woldensenbet and Sankella (2009) poliüretan köpük çekirdekli kompozit malzemelere katkı malzemesi olarak farklı yarıçaplarda nanokil ekleyip üç nokta eğilme testlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, yüksek yarıçap oranına sahip nanokil katkılı malzemelerde, küçük yarıçapa sahip olan malzemelere göre daha yüksek eğilme kuvveti taşıdığını gözlemlemişlerdir.

Test sırasında, eğilme yükü arttıkça PU çekirdek malzemesinin kuvvet temas noktasında çatlak oluşmaya başlayıp, nötr eksen altında kalan çeki bölgesine doğru ilerlemiştir. Numuneye aktarılan yük, çekirdek malzemesinin eğilme mukavemetinden fazla olduğundan çatlak ilerlemesi hızlı gerçekleşmiştir. Eğilme yükü altındaki P20-1 numunesinin çekirdek kırılması Şekil 39’da gösterilmiştir.



Şekil 39. Üç-nokta eğilme yükü altındaki numune

Yapılan üç-nokta eğilme testlerinde, P20 ve P45 numunelerinde Mod I (ara yüzey ayrılması), Mod II (çekirdek hasarı) ve Mod III (yüzey plaka hasarı) olarak incelenmiştir. Şekil 40' da görüldüğü gibi P20-1 numunelerinde Mod I ve Mod II deformasyonu görülmüş ve zayıf arayüzey özelliğini göstermiştir.



Şekil 40. Üç-Nokta eğilme testi sonrası P20-1 numuneleri

P45 numunelerinde artan katkı oranıyla sadece Mod II hasarı görülmüş ve arayüzey yapışmasında ayrılma görülmemiştir. Sonuç olarak, artan katkı oranıyla ve tane boyutunun büyümesiyle birlikte arayüzey yapışma özelliğinin arttığı belirlenmiştir.

Yapılan bir çalışmada, Saha *et al.* (2016) katkılı PU çekirdekli sandviç kompozitlerde nanopartikül katkısının ara yüzey yapışmasının iyileşmesine neden olduğunu belirtmiştir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Ti6Al4V alaşım tozu katkılı poliüretan çekirdekli sandviç kompozitlerinin üretimleri gerçekleştirilmiş ve bu malzemelerle ilgili titreşim, eğilme, basma, deneyleri yapılarak bu deneylerle ilgili mekanik özellikler araştırılmıştır. Katkılı sandviç kompozitlerden elde edilen değerler katkısız olanlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

- P20 kodlu numunelerde, takviye oranı arttıkça hücre yapısında değişiklik meydana gelmekle birlikte, P45 kodlu numunelerde katkı oranı arttıkça partikül boyutunun da etkisiyle hücre yapısında yığılma olmaktadır.
- P45 kodlu numunelerde, saf PUF numuneye nazaran hücre boyutu küçülürken katkı oranı arttıkça daha büyük boyutlu bir hücre oluşumu gözlenmiştir. Bu durum, P45 kodlu numunelerde Ti6Al4V alaşım tozu boyutunun, PUF hücre yapısını bozacak büyüklükte olduğunu göstermiştir.
- Saf PU köpük ile karşılaştırıldığında Ti6Al4V alaşım tozu takviyeli PU köpüklerin FTIR spektrumları benzemekte ve tüm numuneler PU köpüğün karakteristik özelliklerini göstermiştir.
- %2 katkılı P20 sandviç kompozit numuneleri için en yüksek sönüm oranı elde edilmiştir.
- Genel olarak, sönümlenme oranı %2' ye kadar katkı oranında artışa sebep olurken katkı oranının artması ile sönüm oranı değerlerinde de azalma görülmüştür. Her iki katkı oranında P20 ve P45 grupları için Ti6Al4V alaşım tozu katkısı arttıkça 1. doğal frekanslarda artış gözlemlenmiştir.
- Basma yükü en yüksek olarak P20-3 numunelerinde gözlenmiş ve katkısız numuneye kıyasla %21,18 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Katkı malzemesinin, artan tanecik boyutuyla birlikte (P45 numunelerinde), PU çekirdek içerisinde homojen olmayan dağılmaya neden olarak basma kuvvetinde azalma meydana gelmiştir.
- Eğilme yüklerinde ise, P45-1 ve P45-3 numunelerinde en iyi performanslar elde edilmiştir. Bu numunelerde katkısız numuneye kıyasla sırasıyla, %23,87 ve %24,14 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.
- Katkı malzemelerinin tanecik boyutu büyük olan P45 numunelerini, eğilme yükü taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Adnan, S.A., Samsudin, S.N., Zainuddin, F., Azizan, N.A., Akil, H., and Ahmad, S., 2014. Effect of carbon nanotubes on the compression test and energy absorption of aluminium/polyurethane-carbon nanotubes foam sandwich. *Key Engineering Materials*, 594-595, 686-690.
- Alva, A., Raja, S., 2011. Dynamic characteristics of epoxy hybrid nanocomposite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 30 (22),1857–1867.
- Anandajothi, M., Ramanathan, S., Ananthi, V., Narayanasamy, P., 2016. Fabrication and characterization of Ti6Al4V/TiB2–TiC composites by powder metallurgy method. *Rare Metals*, 36, 806-811.
- Arcam, EBM. S., 2018. Ti6Al4V Titanium Alloy. <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf> (09 Agustus 2018).
- Arifin, A., Sulong, A. B., 2017. Effect of mixing parameters on the mixing time and density of composite HA/Ti6Al4V feedstock for powder injection molding. *MATEC Web of Conferences*, 101(03003), 1-5.
- Arifin, A., Sulong, A. B., Muhamad, N., Syarif, J., Ramli, M. I., 2015. Powder injection molding of HA/Ti6Al4V composite using palm stearin as based binder for implant material. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 1028-1034.
- Blasco, M., Belis, J., Bleecker, H. D., 2011. Acoustic failure analysis of windows in buildings. *Engineering Failure Analysis*, 18, 1761-1774.
- Cao, X., Lee, L. J., Widya, T., Macosko, C., 2005. Polyurethane/clay nanocomposites foams: processing, structure and properties. *Polymer*, 46 (3), 775–783.
- Castro, O., Silva, J. M., Devezas, T., Silva, A., Gil, L., 2010. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials & Design*, 31, 425-432.
- Chary, G. H. M., Ahmed, K. S., 2018. Evaluation of natural frequencies and damping ratios of coconut shell particles reinforced epoxy composites. *Materialstoday: Proceedings*, 5 (8), 16199–16205.
- Corcuera, M.A., Rueda, L., d’Arlas, B. F., Arbelaiz, A., Marieta, C., Mondragon, I., Eceiza, A., 2010. Microstructure and properties of polyurethanes derived from castor oil. *Polymer Degradation and Stability*, 95, (11), 2175-2184.
- Dzulkifli, M. H., Yahya, M. Y., Akhir, F. S. M., Majid, R. A., 2014. Development of rigid biocomposite polyurethane foam for load bearing application. *Jurnal Teknologi*, 68 (3),53–56.
- Fernandez-Cabo, J. L., Majano-Majano, A., L. S.-S. Ageo, L. S.-S., Avila-Nieto, M., 2010. Development of a novel façade sandwich panel with low-density wood fibres core and wood-based panels as faces. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(3), 459-470.
- Flores-Johnson, E. A., Li, Q. M., 2011. Experimental study of the indentation of sandwich panels with carbon fibre-reinforced polymer face sheets and polymeric foam core. *Composites Part B: Engineering*, 42, 1212-1219.

- Gianchandani, P. K., Casalegno, V., Salvo, M., Bianchi, G., Ortona, A., Ferraris, M., 2018. SiC foam sandwich structures obtained by Mo-wrap joining. *Materials Letters*, 221, 240-243.
- Grünewald, J., Parlevliet, P., Altstädt, V., 2016. Manufacturing of thermoplastic composite sandwich structures. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30, 437-464.
- Harhash, M., Carradò, A., Palkowski, H., 2017. Mechanical properties and forming behaviour of laminated steel/polymer sandwich systems with local inlays – Part 2: Stretching and deep drawing. *Composite Structures*, 160, 1084-1094.
- Höwer, D., Lerch, B. A., Bednarczyk, B. A., Pineda, E. J., Reese, S., Simon, J.-W., 2018. Cohesive zone modeling for mode I facesheet to core delamination of sandwich panels accounting for fiber bridging. *Composite Structures*, 183, 568-581.
- Kausar, A., 2018. Polyurethane composite foams in high-performance applications: A review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(4), 346-369.
- Khan, T., 2019. AL2O3 Seramik Tozu Katkılı Poliüretan Köpük Çekirdekli Sandviç Plakların Titreşim ve Burkulma Davranışları, (Yüksek Lisans Tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Lee, J.-H., Kang, S.-H., Ha, Y.-J., Hong, S.-G., 2018. Structural Behavior of Durable Composite Sandwich Panels with High Performance Expanded Polystyrene Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12, 21.
- Li, D., Deng, Z., Xiao, H., Jin, P., 2018. Bending analysis of sandwich plates with different face sheet materials and functionally graded soft core. *Thin-Walled Structures*, 122, 8-16.
- Liu, C., Zhang, Y., Li, J., 2017. Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminium foam core, *Composite Structures*, 182, 183-190.
- Liu, J., Liu, J., Mei, J., Huang, W., 2018. Investigation on manufacturing and mechanical behavior of all-composite sandwich structure with Y-shaped cores. *Composites Science and Technology*, 159, 87-102.
- Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., 2015. Effect of laser power and powder flow rate on the wear resistance behaviour of laser metal deposited TiC/Ti6Al4V composites. *Materials today: Proceedings*, 2, 2679–2686.
- Mines, R. A. W., Tsopanos, S., Shen, Y., Hasan, R., McKown, S. T., 2013. Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores. *International Journal of Impact Engineering*, 60, 120-132.
- Mohammadi, M. S., Nairn, J. A., 2017. Balsa sandwich composite fracture study: Comparison of laminated to solid balsa core materials and debonding from thick balsa core materials. *Composites Part B: Engineering*, 122, 165-172.
- Mousa, S., Scheirer, N., Kim, G.-Y., 2018. Roll-bonding of metal-polymer-metal sandwich composites reinforced by glass whiskers at the interface. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 463-469.
- Nasirzadeh, R., Sabet, A. R., 2014. Influence of nanoclay reinforced polyurethane foam toward composite sandwich structure behavior under high velocity impact. *Journal of Cellular Plastics*, 52, 253-275.
- Osei-Antwi, M., Castro, J. D., Vassilopoulos, A. P., Keller, T., 2014. Fracture in complex balsa cores of fiber-reinforced polymer sandwich structures. *Construction and Building Materials*, 71, 194-201.

- Pauzi, N. N. Pz. Nik., Majid, R. A., Dzulkipli, M. H., Yahya, M. Y., 2014. Development of rigid bio-based polyurethane foam reinforced with nanoclay. *Composites Part B: Engineering*, 67, 521–526.
- Reyno, T., Marsden, C., Wowk, D., 2018. Surface damage evaluation of honeycomb sandwich aircraft panels using 3D scanning technology. *NDT & E International*, 97, 11-19.
- Sachse, S., Poruri, M., Silva, F., Michalowski, S., Pielichowski, K., Njuguna J., 2014. Effect of nanofillers on low energy impact performance of sandwich structures with nanoreinforced polyurethane foam cores. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 16, 173-194.
- Saha, M.C., Kabir, M.E., and Jeelani, S., 2006. Core/skin debond fracture toughness of s2-glass/epoxy sandwich composites with nanophased polyurethane foam. In *SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Saint Louis, Missouri.
- Sandia, N. L., 2018. Materials characterization activities for (Take Our Sons & Daughters to Work Day). <https://prod.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2013/138526.pdf> (09 Augustos 2018).
- Scalici, T., Fiore, V., Valenza, A., 2018. Experimental assessment of the shield-to-salt-fog properties of basalt and glass fiber reinforced composites in cork core sandwich panels applications. *Composites Part B: Engineering*, 144, 29-36.
- Shams, A., Stark, A., Hoogen, F., Hegger, J., Schneider, H., 2015. Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane. *Composite Structures*, 121, 271–279.
- Sharma, R. S., Raghupathy, V., 2010. Influence of core density, core thickness, and rigid inserts on dynamic characteristics of sandwich panels with polyurethane foam as core. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 3226–3236.
- Shawkat, W., Honickman, H., Fam, A., 2008. Investigation of a Novel Composite Cladding Wall Panel in Flexure. *Journal of Composite Materials*, 42, 315-330.
- Shen, Y., Cantwell, W., Mines, R., Li, Y., 2014. Low-velocity impact performance of lattice structure core based sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, 48, 3153-3167.
- Silva, V. R. D., Mosiewicki, M. A., Yoshida, M. I., Silva, M. C. D., Stefani, P. M., Marcovich, N. E., 2013. Polyurethane foams based on modified tung oil and reinforced with rice husk ash I: Synthesis and physical chemical characterization. *Polymer Testing*, 32 (2), 438-445.
- Sormana, J.L., Meredith, J.C., 2004. High-throughput discovery of structure-mechanical property relationships for segmented poly(urethane-urea) s. *Macromolecules*, 37, (6), 2186-2195.
- Szatkowski, P., Pielichowska, K., Blazewicz, S., 2017. Mechanical and thermal properties of carbon-nanotube-reinforced self-healing polyurethanes. *Journal of Materials Science*, 52, 12221-12234.
- Tang, C., Wong, C., Zhang, L., Choy, M., Chow, T., Chan, K. C., Yue, T. M., Chen, Q., 2013. In situ formation of Ti alloy/TiC porous composites by rapid microwave sintering of Ti6Al4V/MWCNTs powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 557, 67–72.
- Thirumal, M., Khastgir, D., Singha, N. K., Manjunath, B. S., Naik, Y. P., 2008. Effect of foam density on the properties of water blown rigid polyurethane foam. *Journal of Applied Polymer Science*, 108, 1810–1817.

- Wang, J., Chen, B., Wang, H., Waas, A. M., J., 2015. Experimental study on the compression-after-impact behavior of foam-core sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 17, 446.
- Wang, T., Chen, S., Wang, Q., Pei, X., 2010. Damping analysis of polyurethane/epoxy graft interpenetrating polymernetwork composites filled with short carbon fiber and micro hollow glass bead. *Materials & Design*, 31 (8), 3810–3815.
- Wang, Z.-X., Shen, H.-S., 2018. Nonlinear vibration of sandwich plates with FG-GRC face sheets in thermal environments. *Composite Structures*, 192, 642-653.
- Wei, Z. J., Cao, L., Wang, H. W., Zou, C. M., 2011. Microstructure and mechanical properties of TiC/Ti-6Al-4V composites processed by in situ casting route. *Materials Science and Technology*, 27, 1321-1327.
- Woldensenbet, E., Sankella, N., 2009. Flexural Properties of Nanoclay Syntactic Foam Sandwich Structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 11 (5), 425-444.
- Xiong, J., Vaziri, A., Ghosh, R., Hu, H., Ma, L., Wu, L., 2016. Compression behavior and energy absorption of carbon fiber reinforced composite sandwich panels made of three-dimensional honeycomb grid cores. *Extreme Mechanics Letters*, 7, 114-120.
- Xu, A., Vodenitcharova, T., Kabir, K., Flores-Johnson, E. A., Hoffman, M., 2014. Finite element analysis of indentation of aluminium foam and sandwich panels with aluminium foam core. *Materials Science and Engineering: A*, 599, 125-133.
- Xu, Z., Tang, X., Gu, A., Fang, Z., 2007. Novel preparation and mechanical properties of rigid polyurethane foam/organoclay nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 106, 439-447.
- Yan, C., Song, X., Jing, C., Feng, S., 2017. Effects of epoxy resin liquidity on the mechanical properties of aluminum foam sandwich. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32, 673-691.
- Zhang, W., Feng, Y., Chen, W., Yang, J., 2017. Effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of in situ inhomogeneous TiBw/Ti6Al4V composite fabricated by pre-sintering and canned powder extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 693, 1116-1123.
- Zhang, X. C., Scarpa, F., McHale, R., Limmack, A. P., Peng, H. X., 2016. Carbon nano-ink coated open cell polyurethane foam with multilayered skeleton for damping applications. *RSC Advances*, 83, 80334-80341.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Onur Ahmet AYDIN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Kağızman Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/ Makine Mühendisliği Bölümü (2018)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/ Makine Mühendisliği Anabilim Dalı/Mekanik Bilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Yayımlar	
Journal of Adhesion Science and Technology:	Low-velocity impact and bending response of graphene nanoparticle -reinforced adhesively bonded double strap joints
The Journal of Adhesion:	Experimental modal analysis of graphene nanoparticle-reinforced adhesively bonded double strap joints
Materialstoday Communications:	Experimental investigation of mechanical and modal properties of Al ₂ O ₃ nanoparticle reinforced polyurethane core sandwich structures