



**Al₂O₃ SERAMİK TOZU KATKILI POLİÜRETAN
KÖPÜK ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ PLAKLARIN
TİTREŞİM ve BURKULMA DAVRANIŞLARI**

Tayyab KHAN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekanik Bilim Dalı

Prof. Dr. Hamit AKBULUT

2019

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Al₂O₃ SERAMİK TOZU KATKILI POLİÜRETAN KÖPÜK
ÇEKİRDEKLİ SANDVİÇ PLAKLARIN TİTREŞİM ve BURKULMA
DAVRANIŞLARI**

Tayyab KHAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Mekanik Bilim Dalı

ERZURUM
2019

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU



**Al₂O₃ Seramik Tozu Takviyeli Poliüretan Köpük Çekirdekli Sandviç Plakaların
Titreşim ve Burkulma Davranışları**

Prof. Dr. Hamit AKBULUT danışmanlığında, Tayyab KHAN tarafından hazırlanan bu çalışma 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

İmza:

Üye: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

İmza:

Üye: Prof. Dr. İrfan KAYMAZ

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 20.06.2019 tarih ve 25 / 50 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN

Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması, Atatürk Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından verilen araştırma fonu (Proje No: FYL-2018-6900) kapsamında desteklenmiştir.

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Al_2O_3 Seramik Tozu Katkılı Poliüretan Köpük Çekirdekli Sandviç Plakların Titreşim ve Burkulma Davranışları

Tayyab KHAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Bu çalışmada, Al_2O_3 seramik tozu katkılı poliüretan köpük çekirdekli sandviç plakaların deneysel modal özellikleri incelenmiş ve ayrıca burkulma ile bası mukavemetleri tespit edilmiştir. Al_2O_3 seramik tozunun katkı oranı ağırlıkça %0 ile %10 arasında değişmiştir. Al_2O_3 seramik tozunun poliüretanın mikro yapısı üzerindeki morfolojik etkisinin incelenmesi için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) analizlerinden faydalanılmıştır. Tez kapsamında yapılan bütün testler için ilgili ASTM standartlarına göre numuneler hazırlanmış ve bütün testler aynı şekilde ilgili standartlara göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür çalışmalarıyla karşılaştırılmış ve sandviç numunelerin sönüm oranları ve burkulma davranışlarında Al_2O_3 katkısı ile önemli iyileşmelerin meydana geldiği gözlenmiştir. Bu kapsamında, katkısız numunelere kıyasla %2 Al_2O_3 katkılı numunelerin sönüm oranında %38,3 artış gözlenirken, %1 ve %3 Al_2O_3 katkı numunelerde sırasıyla %31,4 ve %26,8 artış gözlenmiştir. Aynı şekilde, %5 katkılı numunelerin burkulma pik yüklerinde katkısız numunelere kıyasla %6 artış not edilmiştir. Ayrıca katkı oranındaki artış ile sandviç numunelerin basma yükünde doğrusal bir azalma görülmüştür.

2019, 91 sayfa

Anahtar kelimeler: Al_2O_3 , Poliüretan, Sandviç Yapı, Titreşim, Burkulma, Basma

ABSTRACT

Master Thesis

Buckling and Vibration Response of Al_2O_3 Ceramic Powder Reinforced Polyurethane Core Sandwich Composites

Tayyab KHAN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Mechanical Science

Supervisor: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

In this study, the vibration response of the Al_2O_3 ceramic powder reinforced polyurethane core sandwich composites and the buckling and compression strength have been investigated. The reinforcement ratio of the Al_2O_3 ceramic powder was varied from 0 to 10% by weight. The morphological effect of the Al_2O_3 powder reinforcement on the polyurethane microstructure was investigated by benefitting from an optical microscope as well as scanning electron microscopy. The specimens for all the tests that were performed with in the scope of this thesis were prepared according to the relative ASTM standards and all the tests were also performed according to the relative standards. Important improvement in the damping response and the buckling behavior of the sandwich specimens were observed with the Al_2O_3 reinforcement. In this context, a 38,3% increase in the damping ratio was observed for 2% Al_2O_3 reinforced specimens compared to the neat specimens and the specimens with 1% and 3% Al_2O_3 reinforcement showed 31,4% and 26,8% increase, respectively. Similarly, 6% increase in the buckling peak load was observed for specimens with 5% reinforcement compared to the neat specimens. Moreover, the compression peak load was observed to decrease linearly with an increase in the reinforcement ratio for all the reinforced specimens.

2019, 91 pages

Keywords: Al_2O_3 , Polyurethane, Sandwich structure, Vibration, Buckling, Compression

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasında bana her türlü desteği veren, değerli yardımlarını ve anlayışını esirgemeyen, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, danışmanım Sayın Prof. Dr. Hamit AKBULUT'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında fikri ve teknik olmak üzere, öneri ve yardımlarla bulunan, hep desteğini gördüğüm Sayın Arş. Gör. Volkan ACAR'a, samimi katkıları için Sayın Arş. Gör. Raci AYDIN ve Sayın Arş. Gör. Burak HÜLAGÜ'ye, çalışma boyunca yoğun yardım ve ilgisini esirgemeyen değerli arkadaşım Sayın Onur Ahmet AYDIN'a, tezin düzeltilmesindeki katkıları için değerli arkadaşım Sedanur KELEŞ'e teşekkür ederim.

Fikri katkıları ve ilgileri için Sayın Prof. Dr. M. Özgür SEYDİBEYOĞLU'na ve Sayın Erdoğan TEKE'ye teşekkür ederim. Tezin değerlendirilmesi ve en iyileştirilmesi kapsamında verdikleri destekler için tez savunma jürisi hocalarım Sayın Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU ve Sayın Prof. Dr. İrfan KAYMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB) tarafından Türkiye Bursları kapsamında verilen burs (Burs no: 16PK000140) ve Atatürk Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından verilen araştırma fonu (Proje No: FYL-2018-6900) için şükranlarımı sunarım. Labortuvar imkânları ile sağladığı teçhizat ve destekler için Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederim.

Bana her zaman maddi ve manevi destek veren sevgili aileme teşekkür ederim.

Tayyab KHAN

Haziran 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Sandviç Yapılar.....	3
2.1.1. Yüzey tabakaları.....	5
2.1.2. Çekirdek malzemeleri.....	6
2.1.3. Üretim yöntemleri.....	9
2.1.4. Yüzey tabakaları ve çekirdek ara yüzeyler.....	10
2.2. Poliüretan.....	13
2.2.1. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitler.....	15
2.2.2. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri.....	16
2.3. Al ₂ O ₃ Tozu.....	21
2.3.1. Al ₂ O ₃ tozunun hazırlanması.....	22
2.3.2. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin dinamik analizleri.....	24
2.3.3. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin burkulma davranışı.....	28
2.3.4. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin basma davranışı.....	31
2.3.5. Al ₂ O ₃ seramik tozu esaslı kompozitler.....	34
3. MATERYAL ve YÖNTEMLER.....	38
3.1. Materyal.....	38
3.1.1. Yüzey tabakaları.....	38
3.1.2. Çekirdek malzemesi.....	38
3.1.3. Takviye malzemesi.....	38

3.1.4. Ara yüzey yapıştırıcısı.....	39
3.2. Yöntemler.....	40
3.2.1. Yüzey tabakaların üretimi	40
3.2.2. Poliüretan köpüğünün üretimi	47
3.2.3. Sandviç numunelerin hazırlanması	51
3.2.4. PU köpük numunelerin mikroskop görüntülemeleri	55
3.2.5. Sandviç numunelerin dinamik analizleri.....	56
3.2.6. Sandviç numunelerinin basma testleri.....	60
3.2.7. Sandviç numunelerinin burkulma testleri	62
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	65
4.1. Poliüretan Numunelerin Mikroskop Görüntüleri	65
4.2. Dinamik Analizi Sonuçları.....	67
4.3. Basma Testi Sonuçları.....	72
4.4. Burkulma Testi Sonuçları.....	77
5.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Semboller

GA	Güven Aralığı
SDS	Standart Sapma
n	Salınımın Sayısı
x_0	İlk Genlik Değeri
x_n	Son Genlik Değeri
ζ	Sönüm Oranı
δ	Logaritmik Azalması

Kısaltmalar

CNC	Bilgisayarlı Sayısal Denetim
CNFs	Karbon Nanofiberleri
CNT	Karbon Nanotüp
EPE	Epoksi/Cam-PUF-Epoksi/Cam
EPP	Epoksi/cam-PUF-Polyester
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FRF	Frekans Cevap Fonksiyonu
MDI	Metilen difenil diizosiyanat
MWCNTs	Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler

PMI	Polimetakrilimid
PP	Polipropilen
PPP	Polyester/Cam-PUF-Polyester/Cam
PU	Poliüretan
PUF	Poliüretan Köpüğü
PVC	Polivinil klorür
PVP	Polivinilpirolidon
TSD	Eğimli Sandviç Ayrılma
VARTM	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
DMMP	Dimetil Metil Fosfonat
SNGO	SiO ₂ ve Grafen oksit karışımı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. De Havilland Mosquito uçağın gövdesi	4
Şekil 2. 2. Farklı çekirdek geometrileri ve sandviç yapıları	8
Şekil 2. 3. Basınç-birleştirme-haddeleme (PJR) işleminin şeması	10
Şekil 2. 4. Sandviç panel üretiminde kullanılan VARTM şeması	10
Şekil 2. 5. Eğilme yüküne maruz yapıştırıcı ile üretilen bir bağlantıda oluşan kayma gerilmeleri	12
Şekil 2. 6. Dört nokta eğilme testindeki çatlak ilerlemesi ve yapıştırma bağlantısındaki hasar oluşum mekanizması.....	12
Şekil 2. 7. Sandviç yapı için soyma aparatı (a) Şematik resim, (b) Gerçek test	13
Şekil 2. 8. Poliüretan köpük sentezinin kimyasal formülü	14
Şekil 2. 9. PUF (a) poliol ve izosiyanatın karıştırılması (b) mekanik karışım (c) köpük yükselmesi (d) PUF	15
Şekil 2. 10. Poliüretan köpük çekirdek esaslı sandviç yapı	15
Şekil 2. 11. Eğilme yükü altında sandviç numune (a) 3 nokta eğilme testi (b) 4 nokta eğilme testi	17
Şekil 2. 12. Darbe yükleme altındaki hasarlı PU çekirdek esaslı sandviç numuneleri (a) katkısız PU çekirdek, (b) %0,5 nanokil takviyeli çekirdek, (c) %1 nanokil takviyeli çekirdek	19
Şekil 2. 13. Ara yüzey kırılma tokluğunu hesaplamak için TSD'nin şeması.....	21
Şekil 2. 14. Al ₂ O ₃ tozunun SEM görüntüsü.....	24
Şekil 2. 15. Sandviç numuneler için titreşim test cihazının şematik düzeni.....	25
Şekil 2. 16. Değişken çekirdek kalınlığına sahip sandviç numunelerin sönümleme oranları	27
Şekil 2. 17. Sandviç numuneleri (a) kompozisyon, (b) basma yükü altındaki sonuçları.....	29
Şekil 2. 18. PUF çekirdek esaslı sandviç numunenin burkulma yükü altındaki aşamalı hasarı	30
Şekil 2. 19. Basma yükü altında PUF çekirdek esaslı sandviç numunesi.....	33

Şekil 2. 20. Nano- Al_2O_3 ile güçlendirilmiş kompozitlerin farklı sıcaklıklarda mekanik özellikleri a) Eğilme dayanımı b) Elastisite modülü.....	36
Şekil 2. 21. Al_2O_3 takviyeli PU hibrit filmlerin aşınma direnci.....	37
Şekil 3. 1. Al_2O_3 seramik tozunun nano görüntüleri (Grafen Ankara)	39
Şekil 3. 2. Huntsman AV 138 M-1 / 988-1 yapıştırıcı sistemi	39
Şekil 3. 3. Epoksi sisteminin mekanik karıştırıcı ile karıştırılması.....	41
Şekil 3. 4. Epoksi sisteminden gazının giderilmesi a) Gaz giderme için kullanılan vakum haznesi b) Gaz giderme işlemi sırasında epoksi yüzeyindeki hava boşlukları .	41
Şekil 3. 5. Epoksi reçinesi ve sertleştirici a) Karıştırmadan önce b) 2 dakika elle karıştırdıktan sonra c) 5 dakika mekanik karıştırıcı ile karıştırdıktan sonra d) 1 saat gaz giderme işleminden sonra.....	42
Şekil 3. 6. VARTM tekniği ile kompozit levhaların üretiminde kullanılan temel malzemeler	43
Şekil 3. 7. VARTM üretimin aşamalı hazırlama a) Ayırıcı filminin yapıştırılması ve üzerine karbon elyafın yerleştirilmesi, b) Abrasif kumaşın yerleştirilmesi, c) Akış filesinin ve spiral hortumların yapıştırılması, d) Vakum torbasının yapıştırılması.	44
Şekil 3. 8. VARTM işlemi a) Vakum oluşumu b) Reçine akışı	45
Şekil 3. 9. Yüzey tabakaları numuneleri a) CNC ile kesme işlemi b) Kesilmiş numuneler	46
Şekil 3. 10. PUF üretimi için kullanılan kalıplar	47
Şekil 3. 11. Köpüğün tamamen kabarma işlemi	48
Şekil 3. 12. Hassas terazi ile Al_2O_3 tozunun ölçümü.....	48
Şekil 3. 13. Poliöl ve Al_2O_3 karıştırmadan önce ve karıştırdıktan sonra	49
Şekil 3. 14. PU köpük numunelerin üretimi	50
Şekil 3. 15. CNC ile kesilmiş PU numuneleri	50
Şekil 3. 16. Yüzeylerinde yapıştırıcı olan alt yüzey tabakaları.....	51
Şekil 3. 17. Alt yüzey tabakalarına PUF çekirdeklerinin yerleştirilmesi.....	52
Şekil 3. 18. Üst yüzey tabakalarının yerleştirilmesi	53
Şekil 3. 19. Metal ağırlıklar altında kürlenme için bırakılan sandviç numuneleri.....	53

Şekil 3. 20. Yapıştırıcı kürlendikten sonra son sandviç numuneler.....	54
Şekil 3. 21. Titreşim, burkulma ve basma testleri için sandviç numuneler	55
Şekil 3. 22. Çalışma kapsamında kullanılan optik mikroskobu.....	56
Şekil 3. 23. Titreşim analizleri için deney düzeneği.....	57
Şekil 3. 24. Numunelerin sıkıştırılması için kullanılan metal parçası ve torkmetre	59
Şekil 3. 25. Sandviç numune üzerinde lazerin hedeflenmesi.....	59
Şekil 3. 26. Üniversal test cihazı.....	60
Şekil 3. 27. Su terazisi kullanılarak yüzeyinin kontrolü	61
Şekil 3. 28. Basma sandviç numunesi.....	62
Şekil 3. 29. CNC freze makinesi ile tutucuların işlenmesi	63
Şekil 3. 30. Tutucuların yapım aşamaları	63
Şekil 3. 31. Burkulma testine maruz sandviç numunesi	64
Şekil 4. 1. Poliüretan numunelerin mikroskop görüntüleri.....	65
Şekil 4. 2. Poliüretan matris içerisinde Al_2O_3 partiküllerinin toplanması.....	66
Şekil 4. 3. Sandviç numunelerin doğal frekansını gösteren grafi	67
Şekil 4. 4. Sandviç numunelerin sönüm oranını gösteren.....	68
Şekil 4. 5. Sandviç numunelerin 1. sönüm oranları	69
Şekil 4. 6. Sandviç numunelerin 1. doğal frekansları	71
Şekil 4. 7. Sandviç numunenin basma testi öncesi ve sonrası görüntüleri	72
Şekil 4. 8. Sandviç numunelerin ortalama basma yükü sonuçları	73
Şekil 4. 9. Basma yükü altındaki çekirdek hasarı	74
Şekil 4. 10. Basma testi sonuçların eğrileri.....	75
Şekil 4. 11. Sandviç numunelerin ortalama burkulma yükü sonuçları	77
Şekil 4. 12. Burkulma testi sonuçların ortalama eğrileri.....	78
Şekil 4. 13. Düşük katkı oranındaki numunelerin ara yüzey kırılma hasarı, a) katkısız, b) %1 Al_2O_3 katkılı, c) %2 Al_2O_3 katkılı.....	79
Şekil 4. 14. PU çekirdek kırılma hasarları, a) %3 Al_2O_3 katkılı, b) %5 Al_2O_3 katkılı	81
Şekil 4. 15. %10 katkılı numunelerin PU çekirdek kırılma hasarı	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3. 1. Kesilmiş yüzey tabakaları numunelerinin boyutları	46
Çizelge 3. 2. Kesilmiş PU numunelerinin boyutları	51
Çizelge 3. 3. Sandviç numunelerinin boyutları.....	55
Çizelge 4. 1. Sandviç numunelerin 1. sönüm oranları ve güven aralık değerleri	70
Çizelge 4. 2. Sandviç numunelerin 1. doğal frekansları ve güven aralık değerleri	71
Çizelge 4. 3. Sandviç numunelerin basma pik yükü ve güven aralık değerleri	73
Çizelge 4. 4. Sandviç numunelerin burkulma pik yükü ve güven aralık değerleri	78

1. GİRİŞ

Poliüretan köpükler (PUFs), hafif, çevre dostu, düşük yoğunluklu, darbe ve şok emilimi, işlenebilirlik ve mükemmel esneklik gibi dikkat çekici özellikleri sayesinde polimer ailesinde en fazla araştırılan gruplardan biridir. Bunlara ek olarak PU'nun yıllardır farklı uygulamalar için tercih edilmesini sağlayan bir başka önemli avantajı ise maliyetinin düşük olmasıdır. Poliüretan (PU) hammaddelerinin yıllık üretimi, her yıl hızlı bir artışla 12 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. (Jamil *et al.* 2016). Sahip olduğu bu özellikler poliüretanı (PU) havacılık, deri kaplama, otomotiv, mobilya, soğutma, spor, ulaşım, yalıtım malzemeleri ve denizcilik gibi çeşitli sektörlerde araştırmacılar ve üreticiler tarafından kullanmaya yöneltmiştir. Bu çeşitli uygulama dağılımı, poliüretanların ana bileşenlerini (esas olarak polioller ve izosiyanatlar) ve bu bileşenlerin polimerdeki oranlarını değiştirerek mümkündür (Nacas *et al.* 2018). Böylece PU, gerekli özelliklere göre farklı sektörlerde viskoz sıvılar, düşük yoğunluklu yumuşak köpük, esnek ve yarı esnek köpük ve sert köpük gibi çeşitli fiziksel durumlarda üretilebilir. Farklı hedef parametreler için 10-800 kg/m³ arasında değişen çok çeşitli PU türleri üretilebilir.

Ayrıca, PUF'ler, sandviç yapılar (genellikle bir çekirdek malzeme ile birleştirilmiş olan üst ve alt yüzey tabakalarından oluşan yapılar) için geleneksel çekirdek malzemeleri olarak karakterize edilir. Bu sandviç yapılar, havacılık, denizcilik, otomotiv, yalıtılmış sandviç paneller, okyanus akıntısı türbinleri kanatları, gemi ve inşaat endüstrilerinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu PU çekirdekler, sandviç kompozitlerin genel performansını daha da artırmak için nanopartiküller gibi farklı maddelerle takviye edilir. Takviye türüne bağlı olarak ortaya çıkan sandviç kompozitler, yüksek darbe direnci, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek elastikiyet, korozyon ve aşınma direnci gibi dikkat çekici özellikler gösterir. Ayrıca, etkileyici kimyasal bileşime ve iyi bir çözücü direncine sahip çok yönlü bir polimer üyesi olan PU, çeşitli takviyeler için bir matris olarak mükemmel bir seçim haline gelmiştir.

Her ne kadar nano-takviyeli PU esaslı sandviç kompozit malzemeler üstün özelliklere sahip olsa da, takviye için kullanılan nano yapıların birkaç dezavantajı vardır. Bunlardan ilki, takviye olarak kullanılan nanomalzemelerin (karbon nanotüp ve grafen gibi) çok pahalı olmasıdır. Bir diğer dezavantajı, PU matrisinde nanomalzemelerin topaklanarak takviyeli sandviç kompozitlerin performansını olumsuz etkileme ihtimalinin yüksek olmasıdır. Çünkü topaklanma, sandviç yapısını dış etkilere karşı daha savunmasız hale getirir ve yapının gücünü azaltır. Takviye olarak nanoyapıların kullanılmasının bir başka dezavantajı ise işlenmelerinin çok zor olması ve bu süreçte sağlığı olumsuz yönde etkileyebilecek olmasıdır.

Bu tez çalışmasında, PU çekirdeğin burkulma ve titreşim özelliklerini artırmak için takviye olarak Al_2O_3 seramik tozu kullanılmıştır. Al_2O_3 tozu yüksek mukavemet, yüksek sertlik, çok yüksek aşınma direnci, yüksek elektrik yalıtımı, biyo uyumluluk, yangına dayanıklılık ve yüksek korozyon direnci gibi birçok etkileyici özelliğe sahiptir (Song *et al.* 2017, Accuratus, Kyocera Global).

Sandviç kompozitlerin PU çekirdeğini güçlendirmek için Al_2O_3 seramik tozunun takviye oranları ağırlıkça %0-10 arasında kullanılmıştır. Sandviç numunelerinin yüzey tabakaları karbon elyafı/epoksi kompozitlerden oluşturulmuştur. Bu yüz tabakaları, vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) işlemi kullanılarak üretilmiştir. Sandviç yapısını hazırlamak için yüzey tabakaları çekirdek malzemeye ara yüzey yapıştırıcı kullanarak yapıştırılmıştır. Al_2O_3 seramik tozu takviyeli ve takviyesiz tüm numunelerin titreşim tepkisi ve burkulma davranışı incelenmiştir. Sonuçlar literatürdeki araştırmalar göze alınarak yorumlanmıştır.

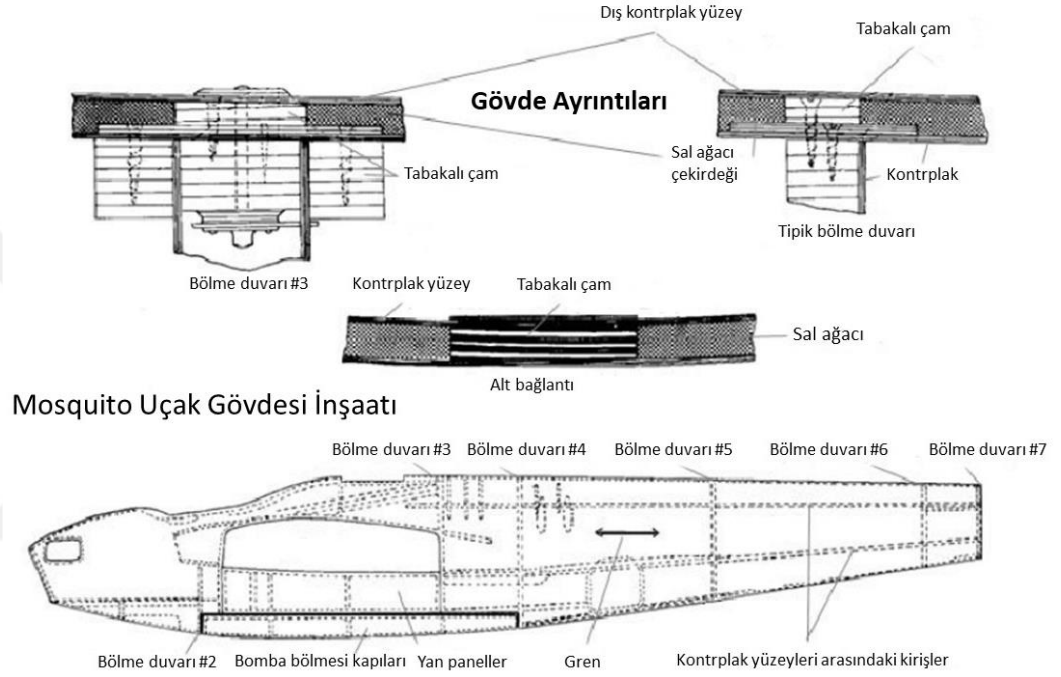
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Sandviç yapılar

Mühendislik uygulamalarında, yapı ve makine elemanlarının hem yüksek mukavemetli olmaları aynı zamanda hafif olmaları istenir. Bu özelliklere sahip bir yapı, kompozit teknolojisiyle mümkün olup, en etkili kompozit şekli sandviç türü kompozitlerdir, (Uzal *et al.* 2018). Sandviç kompozit malzemeler, üç farklı tabakadan oluşan özel kompozit yapılardır. İnce fakat rijit olan üst ve alt yüzey tabakalar, bir yapıştırıcı ile kalın fakat hafif olan çekirdek malzemeye yapıştırılarak birleştirilirler. Yüzey tabakalar genellikle, yüksek mukavemetli kompozit veya metal plakalardan seçilirken, çekirdek malzemeler ise ucuz, yoğunluğu az ve düşük mukavemetli malzemelerden seçilir. Özellikle eğilme durumunda, eğilme normal gerilmeleri üst ve alt yüzey tabakalarında daha büyük buna karşılık çekirdek yapıda daha küçük olduğu için, bu tür sandviç yapılar ekonomi açısından mühendislik uygulamalarında büyük önem arz etmektedir. Çekirdek malzemesi birçok malzemedendir yapılabilir. Genel olarak çekirdek malzemeleri köpük, bal peteği, kafes çekirdekleri ve ağ yapıları olmak üzere dört sınıfa ayrılabilir.

Sandviç yapı kavramı ilk olarak 1849 yılında William Fairbairn tarafından Galler'de yapılacak bir köprü için ortaya atılmıştır, (Herrmann *et al.* 2005). Sandviç kompozitlerle ilgili ilk araştırma makalesi ise 1944'te Almanya'da Marguerre tarafından yazılmıştır. Sandviç yapılar yaygın olarak II. Dünya Savaşı sırasında üretilen uçak gövdelerinde kullanılmıştır. Bu savaşta “Mosquito Night Bomber” uçaklarında kullanılan kontrplak sandviçler havacılık sektöründe kullanılan ilk sandviç yapılardır, (Vinson 2005). Böylece bu malzemelerin havacılık uygulamalarında kullanılmasıyla birlikte önemli bir ilerleme sağlanmıştır. ABD'deki sandviç kompozitlerin ilk kullanımı ise II. Dünya Savaşı sırasında, Wright Patterson Hava Kuvvetleri Üssünde Vultee BT-15 gövdesinin tasarımı ve üretimi ile başlamış olup, sandviç yapının yüzey tabakalarında cam elyaf takviyeli polyester ve çekirdek malzeme olarak bal peteği ile birlikte ahşap tercih edilmiştir, (Vinson 2005).

Bombardıman uçaklarında (De Havilland Mosquito) kullanılan ilk sandviç yapı Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2. 1. De Havilland Mosquito uçağın gövdesi (Herrmann *et al.* 2005)

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere, gövde yapısı büyük oranda sandviç yapıdan oluşmaktadır. Sandviç yapılarının dikkat çeken diğer bir uygulaması da 1969’da Ay’a başarılı bir şekilde inen Apollo projesinde olmuştur, (Vinson 2005). Daha sonra 1970’li yıllarda İsveç’teki deniz gemilerinde kullanılmak üzere sandviç kompozit malzemeler üzerinde önemli çalışmalar yapılmıştır.

Elyaf takviyeli kompozitlerde iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Bundan dolayı elyaf takviyeli plakaların kullanıldığı sandviç yapılar, havacılık, denizcilik, otomotiv ve inşaat sektörü gibi birçok alanda kullanımları giderek artmaktadır.

2.1.1. Yüzey tabakaları

Sandviç kompozit yapılar eğilme yüklerine maruz bırakıldıklarında üst ve alt kısımlarında yüksek gerilmeler meydana gelirken orta kısımlarında daha küçük gerilmeler meydana gelir, tarafsız düzlemde ise şekil değişimleri dolayısıyla gerilmeler sıfırdır. Bundan dolayı sandviç kompozitlerde yüzey plaka malzemesi olarak genellikle rijit ve yüksek mukavemetli metaller veya elyaf takviyeli kompozitler kullanılır. Metaller arasında genellikle hafifliğinden dolayı alüminyum veya çelik levhalar tercih edilir. Ayrıca üstün termal ve akustik yalıtım özellikleri nedeniyle ahşap esaslı yüzey tabaka malzemeleri sandviç yapılarda kullanılmaktadır, (Scalici *et al.* 2018).

Sandviç yapılarda en çok kullanılan yüzey tabakaları aşağıdaki gibidir;

- **Kompozit yüzey tabakaları:** Elyaf takviyeli epoksi kompozitler en yaygın kullanılan kompozit yüzey tabakalardır. Bu malzemelerde cam, karbon, bazalt, aramid gibi elyaf malzemeleri ile epoksi reçinesi güçlendirilir, (Correia *et al.* 2012, Xiong *et al.* 2016).
- **Metal esaslı yüzey tabakaları:** Sandviç kompozitlerin özel uygulamaları için yüzey tabakaları olarak farklı metaller ve alaşımlardan oluşan ince levhalar da kullanılır. Çelik, alüminyum ve alaşımları bu tip yüzey tabakaları için en yaygın örnekleridir, (Harhash *et al.* 2016).
- **Ahşap esaslı yüzey tabakaları:** Ahşap yüzey tabakaları, inşaat ve denizcilik uygulamalarında kullanılan sandviç kompozitlerde kullanılmaktadır. Özellikle balsa ağacı ve kontrplak bu tür uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır, (Jin *et al.* 2015).
- **Biyo esaslı yüzey tabakalar:** Sandviç kompozitlerin yüzey tabakalarında doğal elyaflar da kullanılır. Jüt ve kenaf elyafları yaygın olarak tercih edilen doğal elyaflardır, (Aziz *et al.* 2017).

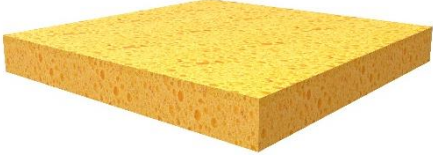
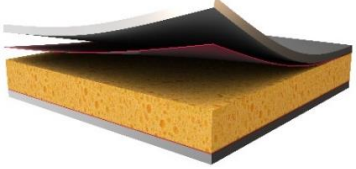
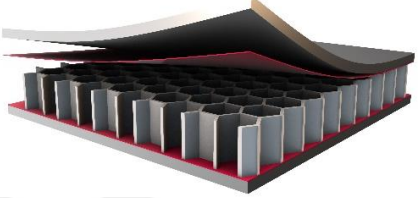
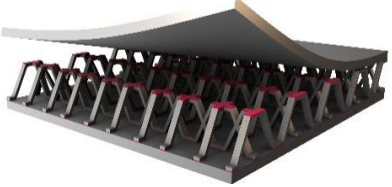
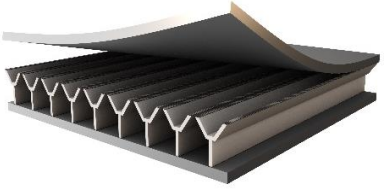
2.1.2. Çekirdek malzemeleri

Hafiflik ve maliyetle birlikte, mukavemet, rijitlik ve enerji emilimi gibi parametreler bir sandviç yapıdan beklenen özelliklerdir. Sandviç yapıların en önemli avantajı çeşitli çekirdek malzemelerinin kullanılabilmesidir. Çekirdek malzeme seçimi, uygulama alanına ve hedef parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Çekirdeğin belirli bir tasarım amacına yönelik olarak kimyasal, fiziki ve mekanik özellikleri vardır, (Lee *et al.* 2018).

Daha önceki yıllarda farklı türlerde çekirdek malzemeler kullanılarak birçok araştırma yapılmıştır. Geometriye göre petekler, oluklu çekirdekler ve farklı kafes kiriş yapılar en yaygın çekirdek malzeme türleri olarak kabul edilebilir. Petek sandviç kompozitler, üstün bir darbe direncine sahiptirler ve neme karşı dayanıklı yapılar olması nedeniyle de havacılık ve otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır, (Reyno *et al.* 2018). Y-biçimli çekirdeklere benzer olarak farklı geometrilere sahip oluklu çekirdek esaslı sandviç kompozitler, geçmiş yıllarda incelenmiş ve geleneksel çekirdek malzemelere kıyasla daha iyi bir enerji emme kabiliyeti gösterdikleri görülmüştür, (Liu *et al.* 2018). Kafes kiriş (Jin *et al.* 2015) ve piramit kafes (Xiong *et al.* 2012) gibi kiriş çekirdek sandviç yapılar son yıllarda farklı uygulamalarda kullanılmış ve özellikle faz dışı eğilme ve basınç yüklerinde yüksek enerji emme kabiliyeti göstermişlerdir.

Sandviç kompozitlerde kullanılan çekirdek malzemeler; malzemenin türüne göre polimer köpükler, ahşap çekirdekler, metalik köpükler, mantar topakları ve seramik çekirdekler olarak da sınıflandırılabilir. Örneğin, balsa ahşap çekirdekli sandviç kompozitler, hafif olduğu için köprü, rüzgâr türbin kanatları ve havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır, (Mohammadi and Nairn 2017). Metalik köpük çekirdekli sandviç kompozitler (özellikle alüminyum çekirdekli kompozitler), genellikle havacılık, denizcilik ve otomotiv endüstrilerinde kullanılmaktadır, (Yan *et al.* 2017).

Yüksek ısı performansına sahip seramik çekirdekler ise özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. Son zamanlarda yapılan bir çalışmada SiC çekirdekli bir sandviç yapı 1000°C'lik bir termal şoka dayanma kabiliyeti göstermiştir (Gianchandani *et al.* 2018). Sandviç yapılar için diğer bir çekirdek malzeme mantar topraklarıdır. Bu çekirdek malzemelerinin, yüksek darbe dayanımı, titreşime sönümleme kalitesi ve akustik ve ısı yalıtımı özellikleri gibi üstün özelliklere bulunmaktadır, (Castro *et al.* 2009). Sandviç yapılarda kullanılan farklı geometrilerdeki malzemeler Şekil 2.2'de görülmektedir.

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

Şekil 2. 2. Farklı çekirdek geometrileri ve sandviç yapıları

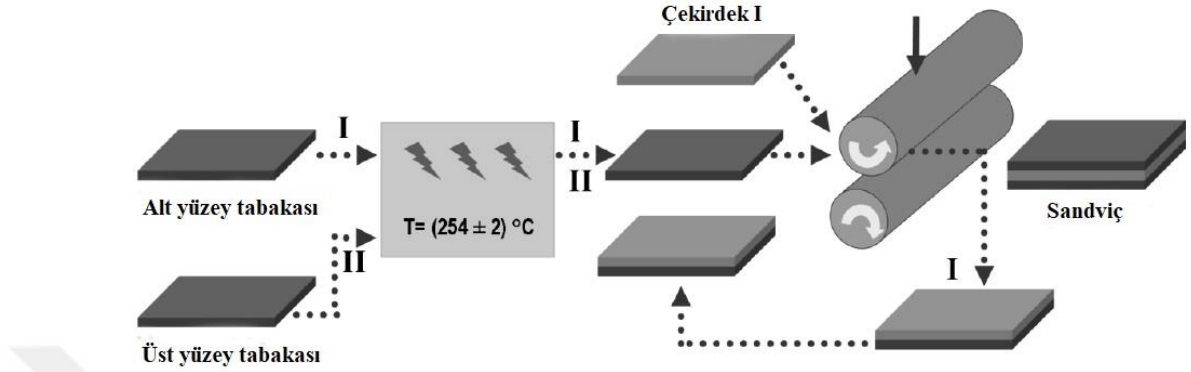
Şekil 2.2’de görüldüğü gibi sandviç yapılarda, malzeme tipine ve geometrisine göre çok çeşitli çekirdek malzemeler kullanılabilir. Burada sunulan çekirdek malzemelerin ve sandviç yapıların çeşitli endüstriyel uygulamalarda farklı avantajları vardır.

2.1.3. Üretim yöntemleri

Bir sandviç yapı farklı yöntemle hazırlanabilir. Her yöntemin kendi avantajları vardır. Bu yöntemler arasında en yaygın ve en eski olanı el yatırma metodudur. Bu yöntemde normal olarak ahşap bir kalıp kullanılır ve alt yüzey tabakası önce kalıba yerleştirilir. Ardından, bir fırça yardımıyla yüzey tabakasına düzgün şekilde bir yapıştırıcı sürülür ve çekirdek malzemesi yüzey tabakasına yapıştırılır. Bundan sonra, üst yüzey tabakasına yapıştırıcı sürülür ve bu üst tabaka çekirdek malzemesine yapıştırılır. Bu işlemler sonunda kalıp kapatılır ve sandviç panel yaklaşık 24 saat boyunca kurumaya bırakılır, (Baba and Thoppul 2009).

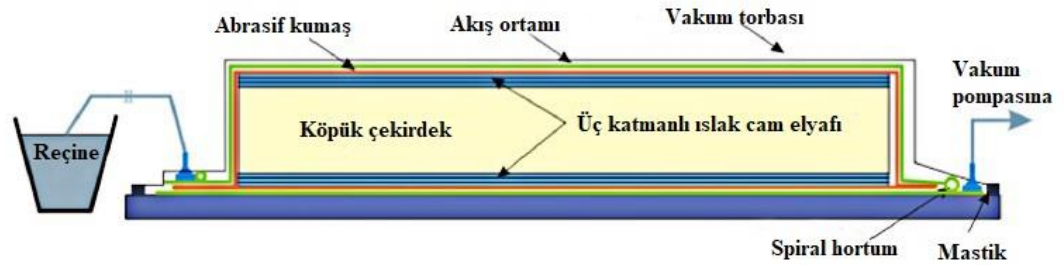
Sandviç yapısını hazırlamak için başka bir yöntem ise sıcak pres kullanılmasıdır. Bu yöntemde çekirdek malzemesi, yüzey tabakalarına yapıştırılır ve daha iyi bir yapışma olması için sandviç yapı sıcak bir prese tabi tutulur. Bu yöntemle ilgili olarak Malingam *et al.* (2018), sıcak pres işlemi kullanılarak elyaf metal tabakaların hibrit sandviç kompozitlerini hazırlamıştır.

Son yıllarda, özellikle metal-polimer-metal sandviçleri üretmek için yeni bir haddeleme tekniği (veya pres-birleştirme haddeleme (PJR) tekniği) kullanılmaya başlanmıştır. Bu tekniğin diğer üretim yöntemlerine göre maliyet ve basitlik avantajları bulunmaktadır, (Mousa *et al.* 2017). PJR üretim metodunun şeması Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2. 3. Basınç-birleştirme-haddeleme (PJR) işleminin şeması (Carrado *et al.* 2010)

Şekil 2.3'ten görüldüğü gibi, üst ve alt yüzey tabakaları önce temizlenir ve daha sonra bir fırın içinde ayrı bir yapıştırıcı ile aktive edilir. Sonra, çekirdek malzeme haddeleme işlemi ile yüzey tabakalarına tutturulur. Sandviç panel üretiminde kullanılan diğer bir bilinen yöntem VARTM işlemidir. Bu işlemde, reçine içindeki hava kabarcıkları önce bir vakum ortamında uzaklaştırıldıktan sonra hava kabarcıkları içermeyen reçine vakum ortamında tabakalara sürülür, (Abdi *et al.* 2014). Üretimim şeması Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2. 4. Sandviç panel üretiminde kullanılan VARTM şeması (Abdi *et al.* 2014)

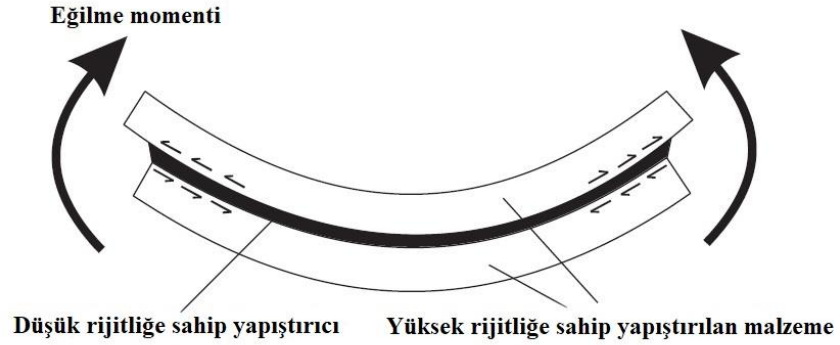
2.1.4. Yüzey tabakaları ve çekirdek ara yüzeyler

Yüzey tabakalarının çekirdek malzemeye hangi yöntem ile bağlanacağı, yüzey tabaka malzemesinin tipine ve sandviç yapının çekirdeğine bağlıdır. En sık kullanılan yöntem yapıştırma işlemidir. Bu yöntemde, epoksi yapıştırıcı yüzey tabakalarına veya çekirdek

malzemesine eşit miktarda yayılır ve yüzey tabakaları çekirdek malzemesine yapıştırılır. Daha sonra bir ağırlık basıncı veya haddeleme işlemi ile preslenir. Yapıştırma bağlantısı genellikle benzer yüzey ve çekirdek malzemelere sahip sandviç yapıların yapıştırılmasında kullanılır. Yapıştırma bağlantısının en büyük avantajı, yüzey tabakaları ile çekirdek malzeme arasındaki yükün kayma ile aktarılmasıdır, (Fiho and Santos 2009).

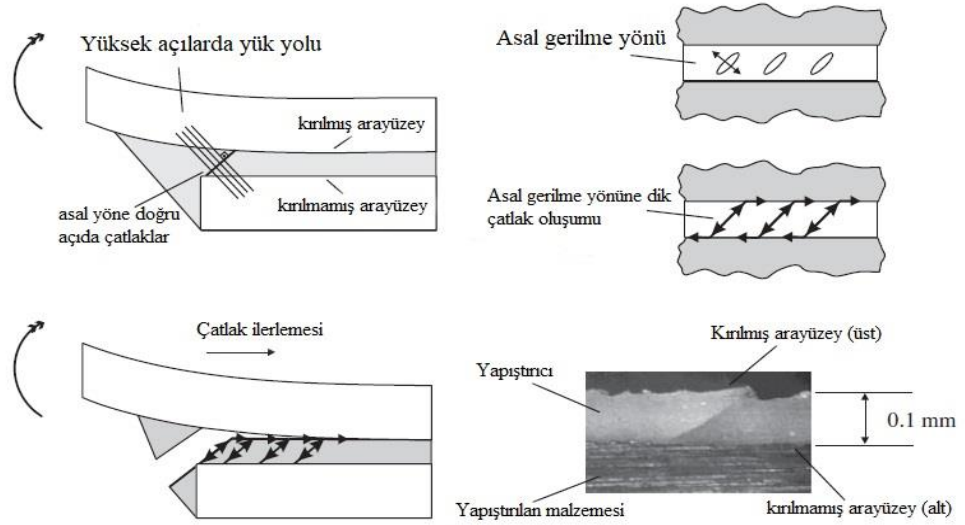
Sandviç yapılar, yapıştırma bağlantısından başka kaynak işlemi ve perçinleme teknikleriyle de elde edilebilir. Kaynak yöntemi çoğunlukla, kafes malzemeli veya benzer malzemeden yapılmış oluklu çekirdeklere sahip sandviç yapıların metal esaslı yüzey tabakalarını birleştirmek için kullanılır. Plastik esaslı sandviç yapıların üretiminde, kaynak yöntemiyle birleştirilme bu malzemelerin bozulmasına neden olduğu için çok fazla kullanılmaz. Bu yapılarda gelişmiş kaynak teknikleri uygulamak için araştırmalar devam etmektedir.

Sandviç kompozit panellerde perçinle bağlama çok nadir olarak yapılır. Perçinle bağlama tekniğinde, gerilme yığılması oluşumu önemli bir dezavantaj olmakla birlikte, bu metot demontaj işleminin gerekli olduğu durumlarda kolaylık sağlar. Yapışkan tabakada çekirdek malzeme ve bir sandviç kompozitin yüzey tabakaları arasında meydana gelen gerilmeleri, bindirme bağlantılarındaki yapıştırma bağlantı teorisine göre belirlenir, (Karachalios *et al.* 2013). Bindirme bağlantısı eğilme yüküne maruz kalması durumunda, yapıştırıcının ve yapışan yüzeylerin mekanik özelliklerinin farklı olması nedeniyle yapıştırıcının üst ve alt ara yüzeylerinde kayma gerilmeleri oluşur. Bu kayma gerilmeleri, Şekil 2.5'te görülmektedir.



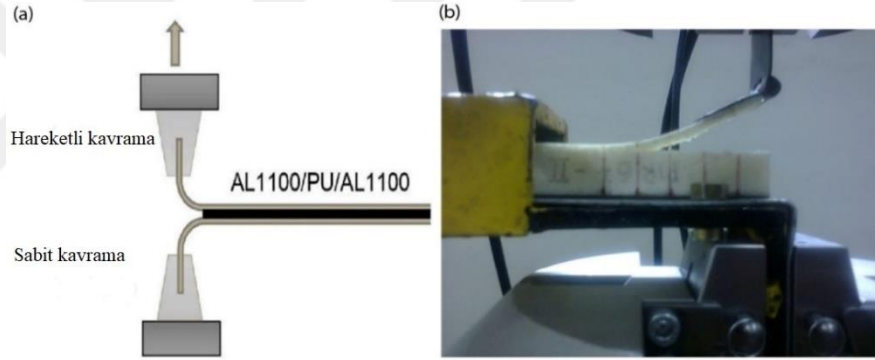
Şekil 2. 5. Eğilme yüküne maruz yapıştırıcı ile üretilen bir bağlantıda oluşan kayma gerilmeleri (Karachalios *et al.* 2013)

Şekil 2.5'e göre kayma gerilmeleri, yapıştırıcının üst ve alt kısmında eşit büyüklükte fakat zıt yönde meydana gelmektedir. Bu kayma gerilmeleri, çatlak oluşumuna yol açar ve bunun sonucunda delaminasyon ile kırılma gerçekleşir. Bu sırada, çeki asal gerilmesinin yönüne dik olarak çatlak oluşmakta ve ilerlemektedir, Şekil 2.6.



Şekil 2. 6. Dört nokta eğilme testindeki çatlak ilerlemesi ve yapıştırma bağlantısındaki hasar oluşum mekanizması (Karachalios *et al.* 2013)

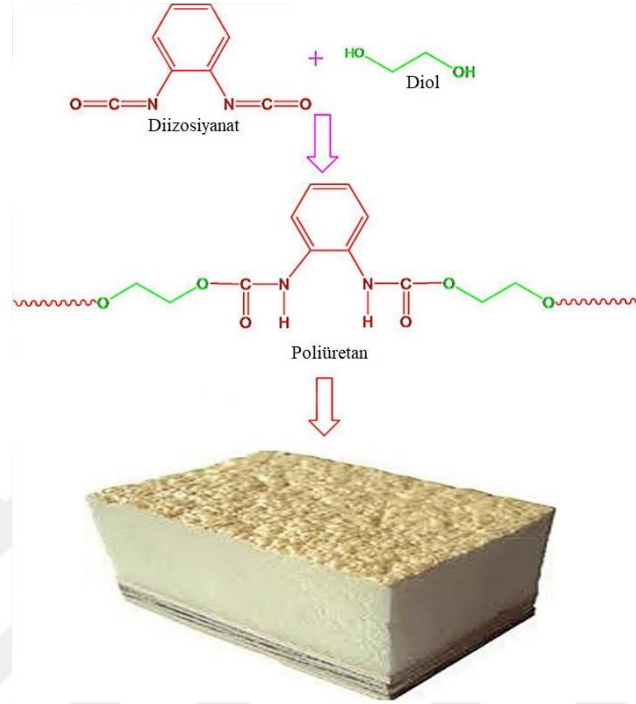
Sandviç bir yapının yüzey tabakaları ve çekirdek malzemesi arasındaki yapışmanın iyileştirilmesi için çeşitli teknikler kullanılır. Bu teknikler arasında en yaygın olanı, yapıştırıcının grafen ve karbon nanotüpler gibi farklı katkı maddeleri ile güçlendirilmesidir. Örneğin, Chen *et al.* (2017), yapışmayı güçlendirmek için sandviç yapıdaki yapıştırıcıya çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) katmışlar ve MWCNT'lerle sandviç kompozitlerin ara yüzey bölgesinde iyileşme olduğunu görmüşlerdir. Yüzey tabakaları ve çekirdek malzemesi arasındaki yapıştırma mukavemetini belirlemek için genellikle soyma testi kullanılır. Soyma testinin şeması ve test cihazı Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2. 7. Sandviç yapı için soyma aparatı (a) Şematik resim (Mousa *et al.* 2017), (b) Gerçek test (Suresh and Padmanabhan 2017)

2.2. Poliüretan

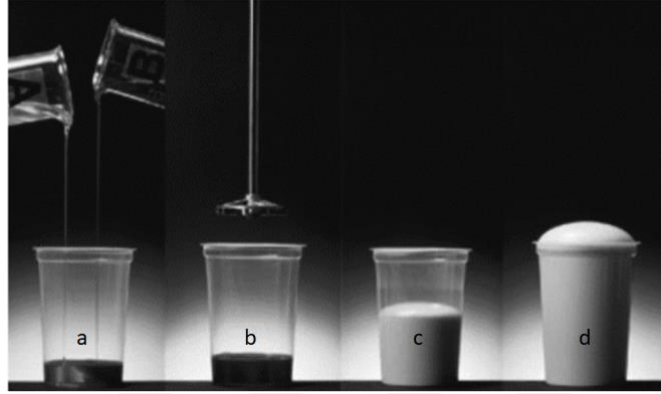
Poliüretan ilk kez 1930'da Otto Bayer tarafından üretilmiştir. Son zamanlarda polimer grubun en önemli türlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Poliüretan çeşitli PUF üretimlerinde kullanılmaktadır. Kimyasal bileşimlerine, mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerine bağlı olarak PUF'ler, sert poliüretan köpükler (RPUF'ler), yarı sert poliüretan köpükler, viskoelastik ve esnek köpükler olarak sınıflandırılır, (Prociak *et al.* 2018). PUF malzemeleri mobilya, inşaat, ayakkabı sektörü, ev aletleri, otomotiv, soğutma ve yalıtım malzemesi olarak birçok alanda kullanılmaktadır. PU malzemesi ise, polimer malzemesinin temel yapıtaşları olan poliollerin (veya diollerin) izosiyanatların poliadişyon reaksiyonu ile üretilir. Bu poliadişyon reaksiyonunun kimyasal formülü, Şekil 2.8'de verilmektedir.



Şekil 2. 8. Poliüretan köpük sentezinin kimyasal formülü (Kausar, 2017)

Şekil 2.8’den görüldüğü gibi, poliüretan köpük sentezi için izosiyanat ve dioller gerekli temel bileşenlerdir. Ayrıca, köpüğün yükselmesi için genellikle bir üfleme ajanı veya bir köpürtücü ajan gereklidir. Saf su yaygın olarak PUF üretiminde üfleme ajanı olarak kullanılabilir.

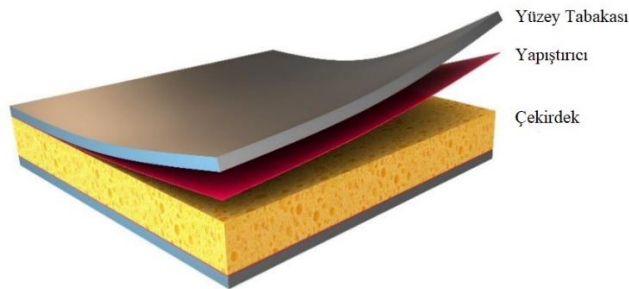
PUF'lerin (özellikle RPUF'lerin) sandviç yapılarda çekirdek malzeme olarak kullanılmaları, temel kullanım alanlarının başında gelmektedir. PU, hafifliği, düşük fiyatı ve üretim kolaylığı nedeniyle çekirdek malzeme olarak yaygın şekilde tercih edilmektedir. PU'nun tercih edilmesinin bir diğer önemli nedeni ise kullanım amacına bağlı olarak farklı yapılarının bulunmasıdır. PU çekirdek malzemeden oluşan sandviçler, çok farklı uygulamalarda kullanılmışlardır. Bu tür sandviç yapıların binaların kaplanması yaygın bir şekilde kullanılması önemli bir örnektir. Benzer şekilde, PU çekirdek esaslı sandviç malzemeler de denizcilik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PUF'un kademeli olarak üretimi Şekil 2.9’da sunulmaktadır.



Şekil 2. 9. PUF (a) poliol ve izosiyanatın karıştırılması (b) mekanik karışım (c) köpük yükselmesi (d) PUF (Anonim, BASF Corp.)

2.2.1. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitler

Son yıllarda, PU esaslı sandviç kompozitlerin birçok alanda kullanımları giderek artmaktadır. Bu kompozit yapıların üretimlerinin temel amacı, yüksek mukavemet ve rijitlik ile birlikte çok hafif bir yapı elde etmektir. Bu sandviç yapılardaki PU çekirdek malzemesi sayesinde hafiflik, stabilite, enerji Emilimi gibi avantajlar elde edilir. PU çekirdeklerin üretiminde, istenen özellikleri elde etmek için zamanla farklı oranlarda hammaddeler kullanılmıştır. Böylece farklı endüstriyel uygulamalarda PU çekirdeklerle birlikte çeşitli yüzey tabakaları da kullanılmıştır. Örnek bir PU çekirdek esaslı sandviç yapı, Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2. 10. Poliüretan köpük çekirdek esaslı sandviç yapı

Şekil 2.10'dan görüldüğü gibi, PU çekirdek esaslı sandviç yapı PUF çekirdeğinin üstüne ve altına yapıştırıcı yardımıyla bağlanan yüzey tabaka malzemelerinden oluşmaktadır.

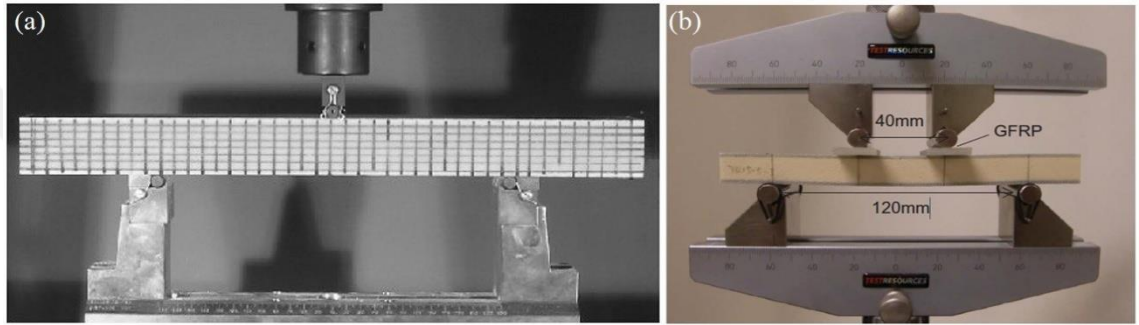
2.2.2. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri

Poliüretan (PU) çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmak için birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda, bükülme davranışı, darbe tepkisi, sürünme (creep) davranışı vb. gibi mekanik özellikler incelenmiş ve PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için farklı iyileştirme teknikleri sunulmuştur.

Yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin bükülme yükleri altındaki eğilme performansını araştırmaya odaklanmıştır. En önemli parametrelerden biri PU çekirdeğin yoğunluğudur ve sandviç kompozitlerin eğilme davranışları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Sharaf *et al.* (2010), PU çekirdek esaslı sandviç panelleri bükme yükü altında analiz etmiştir. Çekirdek yoğunluğunun sandviç kompozitlerin eğilme performansına etkisi, iki farklı yoğunluktaki (0.31 ve 0.63 kN/m³) PU çekirdeklerin kullanılmasıyla gözlenmiştir. Çalışmada altı numune (P1-P6) 0.31 kN/m³ yoğunluğa sahip yumuşak PU çekirdek kullanılarak, dört numune ise (P7-P10) 0.63 kN/m³ yoğunluğa sahip sert bir çekirdek kullanılarak üretilmiştir. DeneySEL sonuçlar PU yoğunluğunun sandviç kompozitlerin gücü üzerinde büyük bir etkisi olduğunu göstermiştir. Çekirdek yoğunluğunun iki katına çıkması durumunda bükülme mukavemeti ve sertliğinde sırasıyla, %165 ve %113'lük önemli bir artış hesaplanmıştır.

Uday ve ark. (2014) tarafından yapılan benzer bir çalışmada, RPUF'ların yoğunluğunun, cam/epoksi yüzey tabakalı sandviç kompozitlerin bükülme özellikleri üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Yapılan çalışmada sandviç yapılarda RPUF çekirdekleri üç farklı yoğunlukta (125, 250 ve 500 kg/m³) kullanılmıştır. Üç noktalı eğilme testlerinden, köpük yoğunluğundaki bir artışla sandviç kompozitlerin bükülme sertliğinin arttığı ve bükülme

gerilimi, normal gerilme ve kayma gerilmesinde bir azalma olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, PU köpük çekirdek yoğunluğunun bükülme davranışı dikkate alındığında kritik derecede önemli olduğunu göstermiştir. Eğilme yükü altındaki sandviç numuneleri Şekil 2.11’de görülmektedir.



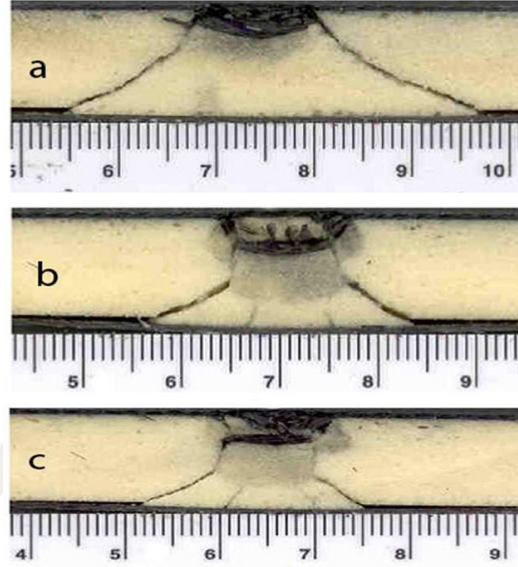
Şekil 2. 11. Eğilme yükü altında sandviç numune (a) 3 nokta eğilme testi (Mamalis *et al.* 2008) (b) 4 nokta eğilme testi (Suzuki and Mahfuz 2018)

PU çekirdeğin yoğunluğu dışında, PU sandviç kompozitlerin üretimi sırasında sıcaklık gibi parametrelerin de eğilme performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu önceki araştırmalarda gösterilmiştir. Mirzapour *et al.* (2005) farklı işleme koşullarını kullanan cam/epoksi yüzey tabakalı PU çekirdekli sandviç paneller üretmiştir. Bu farklı işlem koşulları kullanılarak kuru ve ıslak yüzey tabakaları PU çekirdek malzemeye yapıştırılmış ve tüm numuneler eğilme yüklenmesine maruz bırakılmıştır. Sandviç kompozitlerin üretimi sırasındaki sıcaklığın artmasıyla çekirdek mukavemetinin azaldığı, yüzey tabakalarla çekirdek malzeme arasındaki bağlanma kuvvetinin ise arttığı gözlenmiştir. Bu sandviç kompozitlerin bükülme mukavemetindeki artış %267'ye kadar yükselmiştir. Çekirdek mukavemeti ve bağlanma dayanımı temelinde, en iyi sandviç yapısını elde etmek için en uygun sıcaklık seçilmiştir.

Bu sandviç kompozitlerin ana avantajlarından biri, farklı uygulamalarda çeşitli darbe koşullarında hasarı en aza indirmesidir. Darbe davranışlarını incelemek için önceki yıllarda PU sandviç kompozitleri hakkında ayrıntılı bir araştırma yapılmıştır. Örneğin, Nasirzadeh

ve Sabet (2013), PU çekirdek yoğunluğunun, kompozit yüzey tabakalı sandviç yapının yüksek hızlı darbe tepkisi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sandviç kompozitlerin üretiminde altı farklı yoğunlukta (37, 49, 70, 95, 105 ve 240 kg/m³) PU köpük kullanılmıştır. 49 kg/m³ yoğunluğa sahip PU köpük, enerji emiliminde ve balistik limit hızında en iyi performansı göstermiştir. Oysa 70 kg / m³ yoğunluğa sahip PU çekirdek, özel enerji emilimi açısından daha iyi balistik performans göstermiştir.

PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin düşük hızda etki davranışını araştıran başka bir çalışma Hosur *et al.* (2007) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, sandviç numunelerin darbe tepkisini güçlendirmek için PU çekirdeğe nanokil takviyesi uygulanmıştır. Katkısız çekirdek, %0,5 ve %1 nanokil takviyeli çekirdeklere sahip sandviç numunelere testler yapılmıştır. Nanokil ile güçlendirilmiş numunelerde daha yüksek pik yükleri gözlenmiş ve düzenli hasar alanlarına kıyasla daha küçük hasar alanına ve daha güçlü hücre yapısına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, nanokil ile güçlendirilmiş numunelerde sertlikteki artış nedeniyle nispeten kırılgan bir kırılma görülmüştür. Farklı nanokil oranları ile güçlendirilmiş PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe hasarındaki iyileşmesi, Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2. 12. Darbe yüklemesi altındaki hasarlı PU çekirdek esaslı sandviç numuneleri (a) katkısız PU çekirdek, (b) %0,5 nanokil takviyeli çekirdek, (c) %1 nanokil takviyeli çekirdek. (Hosur *et al.* 2007)

Şekil 2.12'den görülebildiği gibi darbe hasarı, PU çekirdeğe uygulanan nanokil takviyesinin oranındaki artışla azalmıştır. Ayrıca, katkısız PU çekirdekli sandviç numuneler, diğer numunelere kıyasla en büyük hasar alanını göstermiştir.

PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin darbe tepkisi üzerinde diğer değişkenlerin de etkili olduğu gösterilmiştir. Örneğin, Wang *et al.* (2012), darbe çekirdeklerinin ve sandviç yapılandırma parametrelerinin, karbon/epoksi yüzey tabakalı PU çekirdekli sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Köpük çekirdek kalınlığı, hasar durumu veya darbe tepkisi üzerinde hiçbir etki göstermemiştir. Darbe enerjisindeki bir artış, sandviç kompozitlerde hem girinti derinliğini hem de hasar çapını arttırmıştır. Dahası, temas süresi, absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine oranı ve pik yük gibi parametreler yüzey tabaka kalınlığı artınca azalmış, darbe enerjisi artınca ise artmıştır.

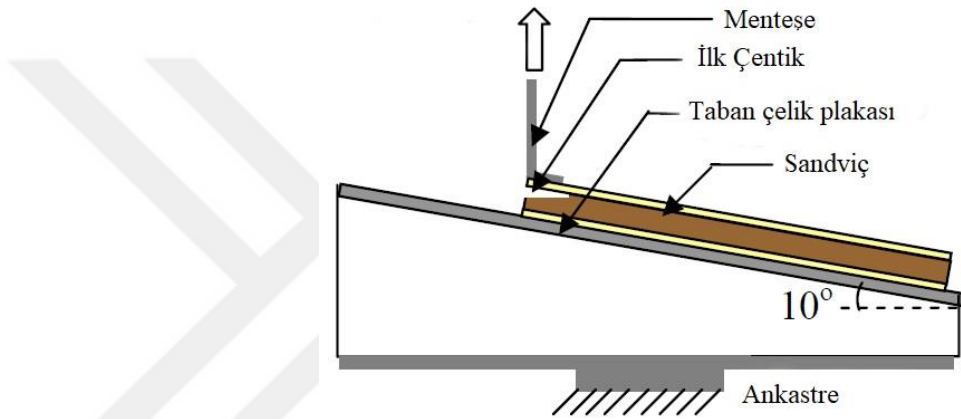
Sandviç panellerin uzun süre çevrimsel yüklemeye maruz kaldıkları durumlarda (köprü güvertelerinde olduğu gibi), yorulma davranışlarını incelemek ve yorulma ömürlerini

tahmin etmek çok önemlidir. Araştırmacılar, son yıllarda PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin yorulma davranışını analiz etmek için farklı teknikler kullanmışlardır. Örneğin, PU çekirdeğinin sandviç yapıların yorulma davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için Frank ve ark. (2012), PUF katkılı ve katkısız ağ çekirdek çelik sandviç yapılarının yorulma analizini gerçekleştirmiştir. PUF'lu sandviç yapıların üstün yorulma dayanımı gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, iki milyon çevrimlik (bir ömür boyu değerlendirilen) yorulma dayanımı, önceki çalışmalarla aynı değerler göstermiştir.

Farklı tipteki yüzey tabakalarına sahip PU çekirdek esaslı sandviç kompozitler, farklı yorulma davranışı göstermektedir. Örneğin, Sharma *et al.* (2004), PU çekirdek sandviçlerin eğri yorulma davranışını ve sertlik bozulumu incelemek için sonlu elemanları analizi (FEA) kullanmışlardır. Çalışmada, yüzey tabakalara göre üç farklı sandviç yapı, (Epoksi/cam-PUF-Polyester (EPP), Epoksi/Cam-PUF-Epoksi/Cam (EPE) ve Polyester/Cam-PUF-Polyester/cam (PPP)) kullanılmış ve yüzey tabakalar ile çekirdek arasındaki bağlantının yorulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her üç sandviç yapı türü arasında, EPE en iyi bükülme yorulma sonuçlarının yanı sıra en iyi sertlik bozulum değerlerini göstermiştir. PPP ise tüm örnekler arasında en düşük yorulma özelliklerini ve sertlik bozulmasını göstermiştir. Tüm bu sonuçlar, farklı endüstriyel uygulamalar için PU çekirdek esaslı sandviç yapıların potansiyelini göstermektedir.

Köpük çekirdekli sandviç yapılarda en yaygın şekilde görülen başka bir kritik hasar türü ise yüzey tabakaları ve çekirdek malzemesi arasındaki delaminasyon olgusudur. Geçmişte araştırmacılar, yüzey tabakaları ve çekirdek malzemesi arasındaki yapışmayı güçlendirmek için PUF çekirdeğine farklı takviyeler kullanılmıştır. Örneğin; Saha ve ark. (2006), nano TiO₂, karbon nano fiberler (CNFs), çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNTs) ve nanokil olmak üzere dört farklı nanopartikül kullanarak karşılaştırmaya dayalı bir çalışma yürütmüştür. Farklı nanopartiküllere sahip sandviç numunelerinin performansı, eğilmiş sandviç ayrılma (TSD) testine tabi tutularak, kırılma tokluğu temelinde araştırılmıştır. Nanopartiküllerin takviye oranları %0-1,5 arasında değişmiştir. Tüm takviye oranları

arasında %1 orana sahip nanokilin kırılma tokluğu, temiz PU çekirdekli sandviç numunelere kıyasla %69 artış göstermiştir. Ayrıca, MWCNTs tüm katkı oranları ile CNFs kıyasla daha iyi kırılma tokluğu göstermiştir. TSD için test ayarları Şekil 2.13'te görülmektedir.



Şekil 2. 13. Ara yüzey kırılma tokluğunu hesaplamak için TSD'nin şeması (Saha *et al.* 2006)

Şekilden görülebildiği gibi, sandviç numunede ilk olarak bir çentik oluşturulur ve ara yüzey kırılma tokluğunu hesaplamak için numunenin üst yüz tabakası üzerine yukarı yönde sabit bir kuvvet uygulanır.

2.3. Alüminyum oksit tozu

Yaygın olarak alümina adıyla bilinen alüminyum oksit (Al_2O_3), seramik ailesinin en önemli türlerinden biridir. Alüminyum oksit, hem doğal olarak kristal şekilde bulunur hem de farklı teknikler kullanılarak üretilebilir. Düşük maliyete sahip olan bu toz en çok kullanılan seramik malzemelerden biridir ve üstün mekanik özelliklere sahiptir, (Accuratus). Özellikle kimyasal ve fiziki stabilitesi çok iyidir, (Kyocera Global). Daha önce de bahsedildiği gibi Al_2O_3 tozu, yüksek mukavemet ve rijitlik, yüksek aşınma direnci, yüksek elektrik yalıtımı,

biyo uyumluluk, yangına dayanıklılık, yüksek korozyon direnci gibi birçok üstün özelliklere sahiptir (Song *et al.* 2017, Accuratus, Kyocera Global).

Belirtilen üstün özelliklerinden dolayı, Al_2O_3 tozu metalürji, havacılık, uzay, elektrik-elektronik, tıp gibi birçok alandaki çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır, (Song ve ark. 2017). Al_2O_3 tozunun yaygın olarak kullanıldığı bazı alanlar aşağıda verilmiştir, (Accuratus);

- Balistik zırh yapımı
- Yüksek sıcaklık elektrik yalıtkanları
- Aşınma yastıkları
- Yüksek gerilim yalıtkanları
- Laboratuvar alet tüpleri ve numune tutucular
- Aşınmaya dayanıklı borular
- Fırın tüpleri
- Termometre sensörleri

2.3.1. Al_2O_3 tozunun hazırlanması

Geçmişte, Al_2O_3 tozlarını üretmek için farklı araştırmacılar tarafından çeşitli teknikler kullanılmıştır. Bu teknikler arasında kimyasal sentez, elektriksel deşarj işleme yöntemi, amonyak çökeltme yöntemi ve sol-gel yöntemi en yaygın olanlarıdır. Bu işlemlerin her birinin kendi avantajları ve tozun özelliklerine farklı etkileri bulunmaktadır. Al_2O_3 tozlarının hazırlanması ile ilgili önceki çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

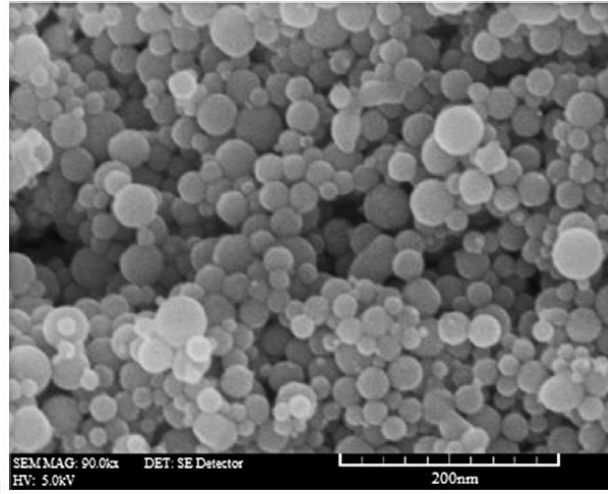
Song *et al.* (2015), ultra saf Al_2O_3 tozunu üretmek için düşük voltajda elektriksel deşarj işleme yöntemini kullanmıştır. Çalışmada, tozun hazırlanmasında hammadde olarak saf alüminyum çubuklar kullanılmıştır. Bu çubuklar suya yerleştirilmiş ve alümina tozlarını

elde etmek için hassas elektriksel yükleme tekniği dikkatlice uygulanmıştır. Daha sonra saflıklarına, faz farklarına ve partikül boyutlarına göre karakterize edilmiştir. Çalışmada üretilen tozların parçacık boyutu, birkaç on mikrometre olarak gözlemlenmiştir. Çalışmada, elektriksel deşarj yönteminin alümina tozu üretimi için ideal bir teknik olabileceği sonucuna varılmıştır.

Wang (2017) tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, Al_2O_3 tozunu üretmek için amonyak çökeltme yöntemini kullanılmıştır. Burada, alüminyum kaynağı olarak $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ve çökeltici olarak ise NH_4OH kullanılmıştır. Çalışmada, 2 saat boyunca 900°C 'de sinterleyerek alfa ve gama alümina tozları üretilmiştir. Çökeltme ajanı olarak amonyak kullanılarak kristal tozlar elde edilmiştir. Çalışmaya göre, çökeltme tekniği kullanılarak nano boyutunda alümina tozunun üretilmesinin düşük maliyet, yüksek saflık, basit aparat ve büyük miktarda üretim gibi farklı avantajları vardır.

Ultra saf Al_2O_3 tozunu üretmek için, Zhang *et al.* (2016) tarafından sol-gel yöntemi tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmada, alüminyum kaynağı olarak $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ve dağıtıcı olarak polivinilpirolidon (PVP) kullanılmıştır. 1000°C sıcaklıkta nanopartikül boyutunda alümina tozunun alfa fazı elde edilmiştir. Bu sonuçlar alümina tozlarının hazırlanmasında yeni bir yöntem sağlamıştır.

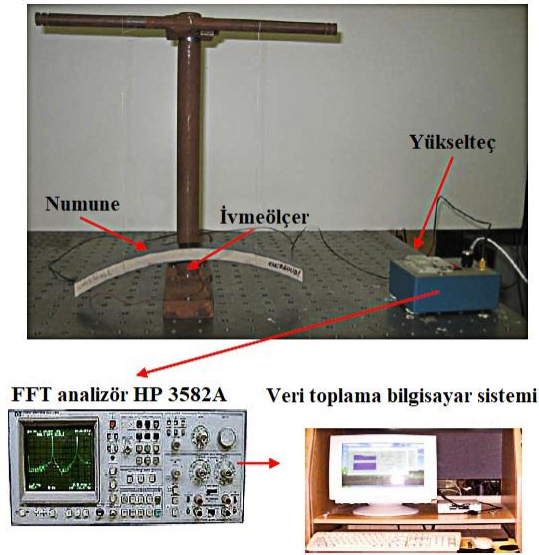
Çelik (2002), plazma sprey kaplamalarda kullanılması için Al_2O_3 - TiO_2 tozlarını üretmek amacıyla kimyasal sentez yöntemini kullanmıştır. Çalışmada, alüminyum kaynağı olarak alüminyum nitrat ve titanyum kaynağı olarak titanyum et oksit kullanılmıştır. Bu iki hammadde önce asit içinde eritilmiştir ve sonra oda sıcaklığında 2 saat karıştırılmıştır. Çalışmada, 1300°C 'de 1 saat sinterlenerek partikül büyüklüğü 38 ila 90 μm arasında değişen tozlar başarıyla üretilmiştir. Al_2O_3 tozunun SEM görüntüsü, Şekil 2.14'te görülmektedir.



Şekil 2. 14. Al_2O_3 tozunun SEM görüntüsü (Mohseni *et al.* 2019)

2.3.2. Poliüretan çekirdek esashı sandviç kompozitlerin dinamik analizleri

Sandviç yapılar hizmet ömrü boyunca farklı türden yüklemelere maruz kalırlar. Bu kritik yükleme koşullarından biri, bu sandviç kompozitler titreşime maruz kaldığında dinamik yüklemelerdir. Dinamik yükleme, sandviç kompozitlerin genel servis ömrü üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir ve bundan dolayı bu yüklemelere ciddi dikkat gösterilmesi gerekir. Önceki yıllarda araştırmacılar, düz ve eğimli PU çekirdek esashı sandviç kompozitlerin dinamik davranışlarını ve doğal frekanslarını bulmak için çeşitli deneysel, sayısal ve matematiksel modelleme tekniklerini kullandılar. Örneğin, Baba and Thoppul (2009), düz ve eğimli sandviç numunelerde yüzey tabakaları ve PU çekirdek arasındaki bağlantının dinamik davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ara yüzeyde ayrılmaya sahip sandviç kompozitlerde doğal frekanslarda bir azalma gözlenmiştir. Ara yüzeyde ayrılma olan sandviç numunelerde sürtünmedeki artıştan dolayı sönümlenme kaybı faktörü de artmıştır. Dahası, frekans yerine sönümlenme kaybı faktörünün ayrılmaya ve sandviç numunelerdeki eğrilğe daha duyarlı olduğu görülmüştür. Çalışmada kullanılan titreşim test cihazı Şekil 2.15'te sunulmaktadır.



Şekil 2. 15. Sandviç numuneler için titreşim test cihazının şematik düzeni (Baba and Thoppul 2009)

Baba (2012), PU çekirdekli düz ve eğimli sandviç kirişlerin doğal frekanslarındaki değişiklikleri gözlemlemek için başka bir çalışma yürütmüştür. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sandviç yapılarda her iki tür için de sayısal bir model hazırlanmıştır.

Sayısal sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılması iyi bir uyum göstermiştir. Sandviç numunenin eğrilik açısındaki artışla birinci doğal frekansın arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, yüksek frekanslar artan eğrilikten etkilenmemiştir. Ayrıca hasarlı ara yüzeylere sahip olan numunelerde, doğal frekans değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Malzeme özellikleri ve test parametreleri de PU sandviç kompozitlerin dinamik tepkisini etkiler. Sharma *et al.* (2004), PU sandviç kompozitlerde, çekirdek yoğunluğunun, yüzey malzemesi tipinin, çalışma sıcaklığının ve ara yüzey bağının, dinamik sonuçlar üzerindeki etkisi hakkında ayrıntılı olarak çalışmışlardır. Çalışma da, yüzey tabakalara göre üç farklı sandviç yapılar, Epoksi/cam-PUF-Polyester (EPP), Epoksi/Cam-PUF-Epoksi/Cam (EPE) ve Polyester/Cam-PUF-Polyester/cam (PPP) hazırlanmış ve hepsinde üç farklı çekirdek yoğunluk (0,60, 0,65 ve 0,70 gm/cc) kullanılmıştır. Tüm sandviç kompozitlerin farklı

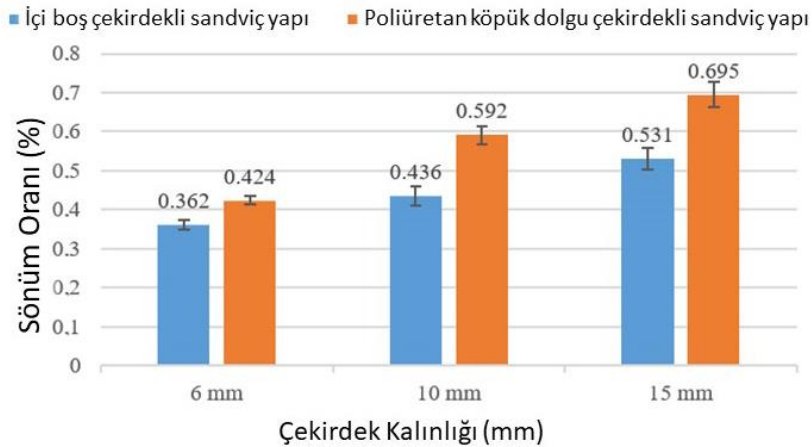
sönümleme tepkisi gösterdiği görülmüştür. Köpük yoğunluğunda bir azalma ile sandviç kompozitlerin sönümleme kabiliyeti artmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak, sandviç kompozitler üç farklı sıcaklık bölgesinde farklı tepki göstermiştir. Tüm kompozitlerin sönümleme kabiliyeti -20 ila 0 °C sıcaklık aralığında arttırılmıştır, 0 ila 60 °C aralığında az miktarda düşürülmüş ve 60 °C'den 100 °C'ye büyük ölçüde düşürülmüştür. Tüm numuneler arasında, PPP en iyi sönümleme özelliklerini göstermiştir.

Önceki çalışmalarda, PUF çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin dinamik davranışı, hem nümerik hem de analitik formülasyonlar kullanılarak iyi bir şekilde tahmin edilmiştir.

Örneğin, Barbieri *et al.* (2009) dinamik analiz gerçekleştirerek sıcak haddelenmiş çelik ve yüksek etkili polistiren yüzey tabakalarına sahip RPUF esaslı sandviç kompozitlerin frekans tepkisini incelemiştir. Deneyler, darbeli bir çekiç ve sandviç numune boyunca yer alan dört ivmeölçer kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, Timošenko kiriş teorisi ve sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayanılarak Matematiksel modeller sunuldu. Fiziksel parametreler (Young modülü ve kayıp faktörü) Genetik Algoritma ve genlik ilişki katsayısı kullanılarak tahmin edilmiştir. Tahmini ve deneysel Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF) eğrileri karşılaştırılmıştır. Üç titreşim modu için, sayısal çalışmanın deneysel veriler ve önceki çalışmalar ile karşılaştırıldığında çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Cam kumaştan yapılmış 3 boyutlu dokuma, boş ve PUF içeren sandviç numunelerin titreşim tepkisini araştırmak için başka bir çalışma Vaidya and Uddin (2009) tarafından yapılmıştır. Araştırmada sönümoranları ve FRF gibi parametreler incelenmiştir. PUF'li ve PUF olmayan sandviç numuneleri bükülme titreşimleri için test edilmiş ve çekirdeğin PUF ile doldurulması, sönüm oranında %150'lik bir artış göstermiş ve aynı zamanda, numunenin ağırlıkta %77 artış gözlenmiştir. PUF ile doldurulmuş örnekler için titreşim modlarının sayısının da 5'ten 2'ye düştüğü de gözlenmiştir. PUF'un, dokuma sandviç kompozitlerin titreşim tepkisini büyük ölçüde geliştirebileceği sonucuna varılmıştır.

PUF, sandviç kompozitlerin bal peteği gibi diğer çekirdek tiplerin dinamik tepkisini arttırmak için bir takviye olarak da kullanılabilir. Aydın and Gündoğdu (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, bal peteği çekirdekli sandviç numuneleri titreşim tepkisini iyileştirmek için PUF ile doldurulmuştur. Bu çalışmada, yüzey tabaka kalınlığı ve çekirdek kalınlığının sandviç numunelerin titreşim tepkisi üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Deneyler, Taguchi yöntemine dayanılarak yapılmış ve ayrıntılı bir sayısal analiz de yapılmış. Sonuçların deneysel verilerle iyi bir ilişkisi olduğu gözlenmiştir. PUF ile doldurulmuş sandviç panellerin, enerji depolama kapasitesinin arttırıldığı ve daha yüksek sönümlleme oranı değerleri gösterdiği görülmüştür. Çekirdek kalınlığındaki bir artış için de benzer bir eğilim gözlenmiş ve yüksek doğal frekans ve sönüm oranlarının elde edilmesi için çekirdek kalınlığının arttırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Farklı sandviç numunelerin sönümlleme oranları Şekil 2.16’da görülmektedir.



Şekil 2. 16. Değişken çekirdek kalınlığına sahip sandviç numunelerin sönümlleme oranları (Aydın and Gündoğdu 2018)

Şekilden görülebileceği gibi, PUF ile doldurulmuş sandviç numuneleri, her bir çekirdek kalınlığı değeri için doldurulmamış çekirdeklere sahip numunelere kıyasla daha yüksek sönümlleme oranları sergilemiştir.

PUF çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin dinamik tepkisini arttırmak için Sharma and Raghupathy (2010), PUF çekirdeğini sert parçacıklar katmıştır. Araştırma temel olarak çekirdek yoğunluk, çekirdek kalınlık ve sert parçacıkların sandviç numunelerin farklı sınır koşullarında temel frekans açısından dinamik tepkisi üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Çekirdek yoğunluğundaki bir artışın, belirli bir kalınlık için temel frekansta önemli bir artışa yol açtığı gözlenmiştir. Çekirdek malzemenin kalınlığındaki artışla da temel frekansta artış gözlenmiştir. Ayrıca, çekirdek malzemeyi sert parçacıklar ile güçlendirmekle sınır koşullarının çoğu için arttığı görülmüştür.

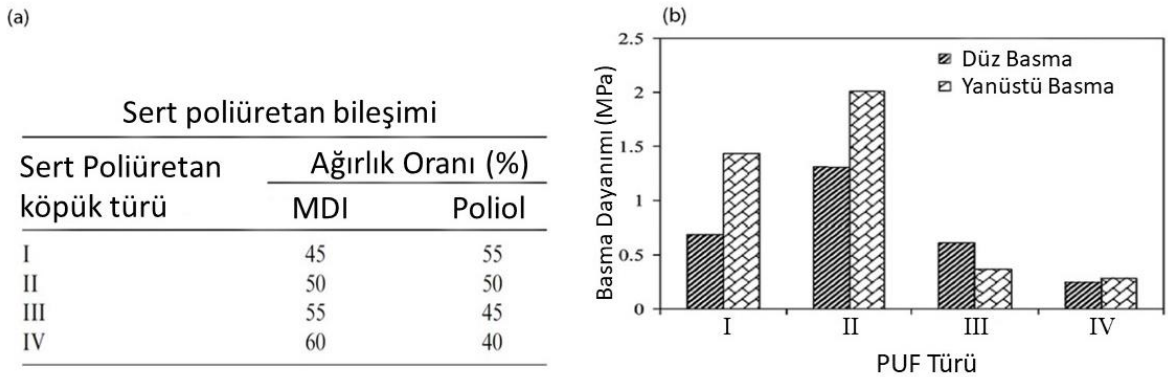
2.3.3. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin burkulma davranışı

PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerde iyi bilinen bir hasar modu burkulma olgusudur. Geçmişte pek çok araştırmacı tarafından PU çekirdekli sandviç kompozitlerinin burkulma davranışı, eksenel yüklenmeye maruz bırakarak çalışılmıştır. Önceki çalışmalarda burkulma davranışını ve farklı hasar modlarını incelemek için farklı FE modelleri yaratılmış ve birçok deney yapılmıştır. Boccaccio *et al.* (2013) PUF esaslı sandviç kompozitleri eksenel yüklemeye maruz bırakarak bükülme tepkisini analiz etmiştir. Asıl deneyi simüle etmek için bir Sonlu Elemanlar (FE) modeli de kullanılmıştır ve sonuçları deneysel test sonuçlarına karşı doğrulanmıştır. Sandviç kompozitin toplam kalınlığının sabit tutulmasıyla, burkulma olgusunun hem çekirdek malzemenin kalınlığı hem de yüzey tabakalarının kalınlığı ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Çekirdek kalınlığı azaldığında, daha kalın yüzey tabakalarına sahip sandviç numuneler burkulmaya karşı daha hassas hale gelmiştir. Yüzey tabakalarının kalınlığının artırılması, ara yüzdeki kusurlarını artığı için sık sık burkulma hasarın oluşmasına neden olmuştur.

Teorik bir çalışmada, Davis and Hakmi (1991), PUF dolgulu çelik sandviç kirişlerin bükülme sonrası davranışını, bir dizi deney yaparak ve geliştirilmiş etkin genişlik için bir formül kullanarak çalışmıştır. Araştırmada kullanılan ifadelerin, genişlik-kalınlık oranının

küçük olan sandviç kirişlerin etkili genişliğini tahmin etmek için güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır ($b/t < 120$).

Yadav *et al.* (2011) tarafından yapılan ayrıntılı bir çalışmada, PUF çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin yanüstü basma tepkisinin yanı sıra düz basmanın tepkisi araştırılmıştır. Bileşenlerin (poliol ve Metilen difenil diizosiyanat (MDI)) miktarına dayanarak dört farklı tipte PUF çekirdeği üretilmiştir. PUF bileşenlerinin miktarının sandviç numunelerin basma testi altındaki sonuçlar üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Tüm numuneler arasında, %50 poliol ve %50 MDI içeren PUF çekirdekli sandviç numuneler her iki basma yükleme tipi altında en iyi sonuçları göstermiştir. Bütün PUF çekirdeği türü için düz ve yanüstü basma sonuçları Şekil 2.17’de verilmiştir.



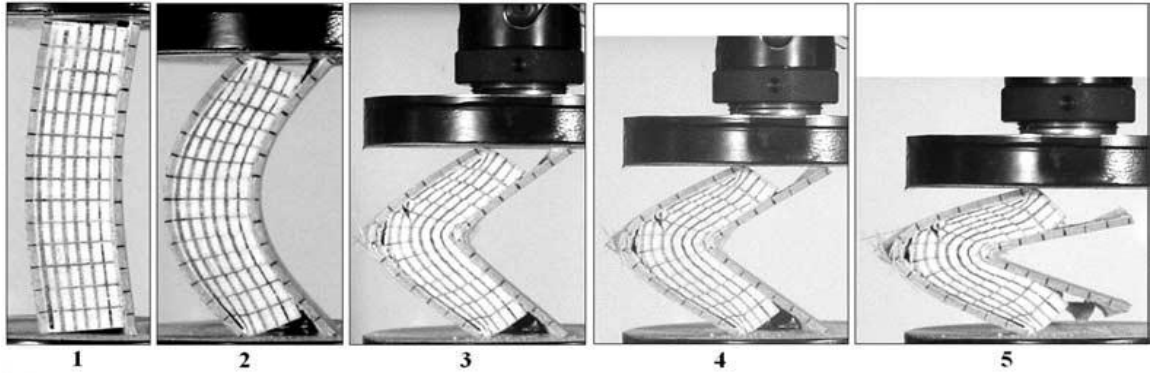
Şekil 2. 17. Sandviç numuneleri (a) kompozisyon, (b) basma yükü altındaki sonuçları (Yadav *et al.* 2011)

Şekilden de anlaşılacağı gibi, eşit miktarda poliol ve MDI içeren PUF çekirdekli sandviç numuneleri en iyi basma davranışını göstermiştir. Ayrıca, MDI miktarındaki bir artışla sandviç numunelerin kenardaki basma kuvvetinin azaldığı görülebilir.

Başka bir çalışmada Mathieson and Fam (2004), PU çekirdekli sandviçlerde geometrik parametrelerin burkulma tepkisi üzerinde etkisini incelemiştir. Çalışmada, GFRP yüzey tabakalara sahip PU çekirdekli sandviç kompozitlerin deneysel ve analitik eksenel yükleme

altındaki hasarı incelenmiştir. Test numunelerin incelik oranı 15 ila 70 arasında dikkate alınmıştır. Sandviç numunelerde, 15 ila 17 incelik orana sahip olan kısa numunelerde yüzey tabakaların buruşturma hasar modu, 41 ila 70 arasındaki paneller için küresel burkulma ve orta ince kesitteki paneller için karışık hasar modları gözlenmiştir. Ayrıca, yüzey tabakaların kalınlığı ve çekirdek malzemesinin kayma modülünün artırılması ile nihai yükü büyük ölçüde arttırdığı gözlenmiştir.

Diğer bir karşılaştırmalı çalışmada Mamalis *et al.* (2005), sandviç kompozitlerin farklı çekirdek tipleri (Polimetakrilimid (PMI), Polivinilklorür (PVC) ve PUF) kullanarak yanüstü basma davranışları incelemiştir. Test sonuçlarına göre farklı çekirdekli numunelerin üç farklı tipte çöküş modu gösterdiği görülmüştür. Bu çökme modları köpük çekirdek kese kırılması, sandviç panellerin dengesiz dağılması ve aşamalı uç-kırması olarak görülmüştür. PVC çekirdekli numunelerin pik yük ve ortalama kırma yükü açısından en iyi performansı gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, her üç hasar modları arasında aşamalı uç-kırması, en kritik hasar modu olarak kabul edilmiştir. Çalışmadaki PUF çekirdek esaslı sandviç numunelerin burkulma yükü altında aşamalı hasar Şekil 2.18’de görülmektedir.



Şekil 2. 18. PUF çekirdek esaslı sandviç numunenin burkulma yükü altındaki aşamalı hasarı (Mamalis *et al.* 2005)

Diğer bir karşılaştırmalı çalışma Correia *et al.* (2012) tarafından iki farklı çekirdek malzeme kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, GFRP yüzey tabakalarına ve iki farklı

çekirdek malzemeye (PU ve polipropilen (PP) bal peteğine) sahip sandviç yapıların yapısal davranışı incelenmiştir. Her iki sandviç tipteki numunelere yanüstü basma testleri dahil olmak birçok test yapılmıştır. PU çekirdekli numunelere göre, bal peteği içeren sandviç numuneleri için hesaplanan kırılma yükü iki kat fazla bulunmuştur. Sonuçlarda bu kadar büyük bir fark, bal peteği çekirdeğine kıyasla PU çekirdekli numunelerdeki düzlem dışı esneklikten dolayı meydana gelmiştir.

PUF çekirdek esaslı sandviç numunelerin burulma davranışını iyileştirmek için Sharma *et al.* (2004) sandviç numunelerin kalınlıkta cam kumaş kullanarak dikiş tekniği uygulamıştır. Yanüstü basma testleri kullanılarak dikişsiz ve dikişli sandviç numunelerin burkulma davranışı incelenmiştir. Dikiş yöntemi, test numunelerinin burkulma mukavemetinde önemli bir artış sağlamış ve aynı zamanda ara yüzeydeki ayrılma olgusuna engel olmuştur. Çalışmada FEA da yapılmış ve dikiş aralığının burkulma davranışı üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Sonuçlardan, dikiş aralığındaki bir azalmanın, sandviç numunelerin burkulma mukavemetinde önemli bir artışa yol açtığını gözlenmiştir.

2.3.4. Poliüretan çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin basma davranışı

Yanüstü ve eksenel basma yüklemenin yanı sıra, farklı endüstriyel uygulamalarda PU çekirdek esaslı sandviç kompozitler düz bir şekilde basma ile de karşılaşılır. Çekirdek malzemenin hasara uğramaması için yüksek bir basınç dayanımına sahip olması çok önemlidir. Geçmişte, araştırmacılar PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin basma davranışını araştırarak farklı parametrelerin basınç davranışı üzerindeki etkilerini hesaplamışlar ve ayrıca basma davranışlarını geliştirmek için farklı teknikler de kullanmıştır. Örneğin, Manujesh *et al.* (2014) nem emiliminin PU sandviç kompozitlerin mekanik davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sandviç numunelerini üretmek için kompozit yüzey tabakalarında dört farklı tip kumaş kullanılmıştır. Tüm sandviç numuneleri 180 gün boyunca tuz sis haznedeki neme maruz bırakılmıştır. Tüm numuneler için mekanik özellikleri nem emiliminden önce ve sonra, burkulma mukavemeti, çekirdek kayma

mukavemeti, yanüstü ve düz basma dayanımı açısından hesaplanmıştır. Tüm numuneler mekanik özelliklerde zamana bağlı olarak doğrusal bir bozulma göstermiştir. PU köpük yoğunluğunun da basınç dayanımı bozulmasında önemli bir rol oynadığı görülmüştür. PU köpük yoğunluğunda bir azalma ile basınç dayanımı bozulmasında bir artış gözlenmiştir.

PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin basma davranışını arttırmak için Adnan *et al.* (2013), ağırlıkça %0 ila %3 arasında CNT ile güçlendirilmiş PU çekirdekli sandviç numuneleri hazırlamışlar. Farklı CNT oranı değerleri için yapılan basma testlerinin sonuçlarında farklı davranış gözlenmiş. Tüm numuneler arasında, %0,5'lik orandaki küçük takviye için basma kuvvetinde iyi bir gelişme gözlenmiş. Ayrıca, yüksek takviye oranlarda PU matrisindeki homojen olmayan karışım ve CNT'nin topaklanma nedeniyle için basınç mukavemetinde azalma gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada, Mahfuz *et al.* (2005) PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin basma davranışını güçlendirmek için farklı bir takviye kullanmış. Takviye olarak TiO_2 nanopartikülleri kullanılmıştır. Çalışmada, %3 TiO_2 nanopartikülleri takviyeli sandviç numunelerin basma davranışı ve gerinim hızı tepkisi, yüksek gerinim hızı basma testleri kullanılarak araştırılmış. Takviye edilmiş sandviç numunelerin, katkısız numunelerine kıyasla hem basma mukavemeti hem de enerji emme kabiliyetlerinde ortalama %40 ila %60 arasında bir artış gözlenmiştir.

PUF çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için araştırmacılar tarafından geçmiş yıllarda kullanılan diğer bir teknik ise çekirdek malzemenin kalınlıkta polimer pimlerle güçlendirilmesidir. Abdi *et al.* (2016), sandviç yapıda PUF çekirdeğine polimer pim takviyesi kullanarak basma ve çentiklenme tepkisini araştırmışlar. PUF çekirdeğinin polimer pimlerle güçlendirilmesiyle, sandviç numunelerinin basma kuvvetinde dikkate değer bir artış gözlenmiştir. Test sonuçlarından, polimer pimlerinin çapındaki bir artış ile düz basma ve çentiklenme kuvvetlerinin arttığı

gözlenmiştir. Çalışmadaki düz basma yüklemesine tabi olan PUF çekirdek esaslı sandviç numuneleri, Şekil 2.19’da görülmektedir.



Şekil 2. 19. Basma yükü altında PUF çekirdek esaslı sandviç numunesi (Abdi *et al.* 2016)

Yukarıdaki bölümde bahsedildiği gibi, Yadav *et al.* (2011), bileşenlerin miktarına dayanarak dört farklı tipte PUF çekirdeği hazırlamıştır ve sandviç numunelerin basma davranışını araştırmıştır. Düz basma testi sonuçlarından yanüstitü basma ile kıyasla benzer bir davranış gözlenmiştir. PUF çekirdeğinde eşit miktarda bileşen bulunan sandviç numunelerinde en yüksek basma mukavemeti gözlenmiştir. Bununla birlikte, PUF çekirdeğinde en yüksek MDI miktarına sahip numuneler için en basma mukavemeti gözlenmiştir.

Stewart *et al.* (2010) tarafından yapılan başka bir çalışmada, PU çekirdekli sandviç yapıda SiC nanopartikülleri takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Çalışmada, katkılı ve katkısız numunelerin mekanik ve kırılma davranışlarını araştırmak için basma testi, üç noktalı eğilme testi ve ara yüzey kırılma tokluğu testi uygulanmıştır. Nanopartiküllerin takviye oranları ağırlıkça %0,1 ila %2 arasında değişmiştir. Test sonuçlarından sandviç numunelerin hem basma hem de eğilme davranışında %1 katkı oranıyla %50 ila %70 arasında bir gelişme olduğunu göstermiştir. SiC parçacıklarının işlevsizleştirilmesiyle daha fazla gelişme sağlandı. Ayrıca, ara yüzey kırılma tokluğu için en iyi sonuçlar %0,1’lik bir

katkı oranı ile elde edilmiş. SiC partiküllerinin işlevsizleştirilmesiyle basınç dayanımında büyük bir gelişme hesaplanmıştır.

Benzer bir çalışmada, Abidin *et al.* (2013) PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlere kenaf elyaf takviyesi kullanmış ve basma davranışını ile balistik tepkisini hesaplamıştır. Kenaf elyaflarının PU çekirdekteki katkı oranı %0'luk bir artışla %0 ila %30 arasında değişmiş. Basma testi sonuçları, katkılı sandviç numunelerin Young modülünde ve enerji emiliminde büyük bir gelişme göstermiştir. Kenaf elyafın %20 takviyesi ile hem basma hem de darbe davranışı açısından en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

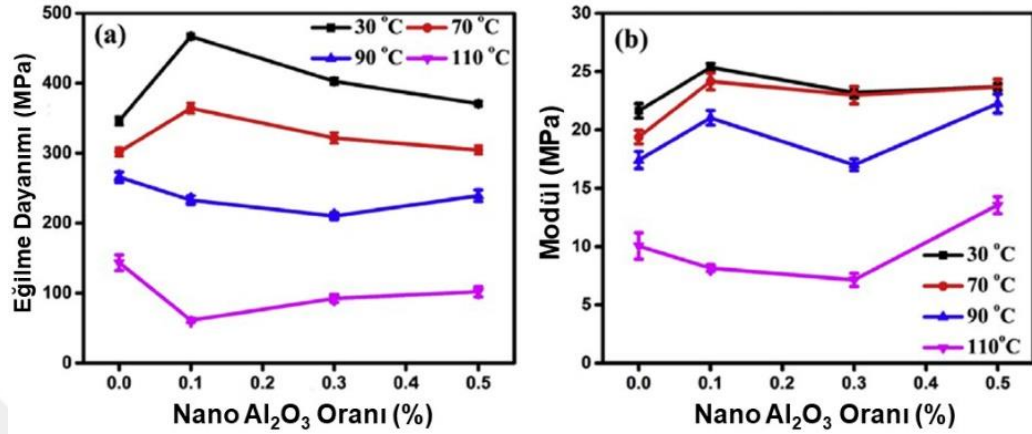
PU çekirdek esaslı sandviç kompozitlerin basma tepkisindeki iyileşmeyi araştırmak için diğer bir çalışma Jia *et al.* (2012) tarafından yapılmıştır. Çalışmada, dokuma kumaşlı sandviçleri üretmek için iki farklı malzeme (cam elyafı ve polyester ipliği) kullanılmış ve PUF ile doldurulmuştur. Üretilen sandviç numunelerin eğilme ve basma özelliklerini incelemek için deneyler yapılmış. Dokuma kumaşları yapmak için kullanılan malzemenin türüne göre sonuçlar çıkarılmıştır. Sonuçlardan, poliester ipliğe yüzey tabakalarına sahip numunelerin cam elyafı numunelere kıyasla daha iyi basınç ve eğilme dayanımlarına sahip olduğu gözlenmiştir.

2.3.5. Al_2O_3 seramik tozu esaslı kompozitler

Daha önce tartışıldığı gibi, Al_2O_3 seramik ailesinin en önemli üyelerinden biridir ve farklı havacılık, metalürji, mikro elektronik, inşaat ve tıp endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nano ve mikro partikül boyutlarındaki Al_2O_3 tozları, üstün mekanik özelliklerine sahip olduğu için polimerler ve metaller gibi farklı matrisler için çok önemli takviye olabilir. Al_2O_3 tozu esaslı kompozitler üzerine yapılan kayda değer araştırmalardan bazıları bu bölümde sunulmaktadır.

Mohseni *et al.* (2019), polipropilen elyaf takviyeli hafif jeo-polimer betonların mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemek için pirinç kabuğu külü ve nano- Al_2O_3 kullanmıştır. Çalışmada, 20 nm büyüklüğünde Al_2O_3 nano parçacıkları kullanılmıştır ve tüm jeo-polimerler için takviye oranı karışımın toplam hacminin %20'si olarak belirlenmiştir. Al_2O_3 tozu kullanarak polipropilen liflerinin %0,5 ve %1 takviyeleri ile jeo-polimer numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %0,6 ve %2,3'e kadar arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, benzer lif katkı oranları için bükülme mukavemetinde sırasıyla %15,4 ve %36,3'e kadar artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar inşaat uygulamalarında Al_2O_3 tozu ve pirinç kabuğu külünün çok etkili olduğunu göstermiştir.

Farklı bir çalışmada, Mahato *et al.* (2019) yüksek sıcaklıklarda Al_2O_3 tozu takviyeli cam elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik, termal ve morfolojik davranışlarını araştırmıştır. Kompozitler el yatırma tekniği kullanılarak hazırlanmıştır ve nano- Al_2O_3 'ün takviye oranları ağırlıkça %0,1 ila %0,5 arasında değiştirilmiştir. Test sonuçlarından Al_2O_3 tozunun takviyesinin kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. En iyi bükülme mukavemeti ve elastisite modülü %0,1 nano- Al_2O_3 takviyesi ile gözlenmiştir. Ayrıca, %0,1 katkı oranı ile eğilme dayanımı ve kompozitlerin elastisite modülünde sırasıyla %25,82 ve %14,7 artışlar gözlenmiştir. Ayrıca, tüm kompozitlerin eğilme dayanımların yüksek sıcaklıklarda düştüğü gözlenmiştir. Ancak, parçalanma nano- Al_2O_3 ile güçlendirilmiş kompozitler için daha yüksektir. Değişken sıcaklıklarda eğilme mukavemeti ve farklı kompozitlerin elastisite modülü Şekil 2.20'de görülmektedir.



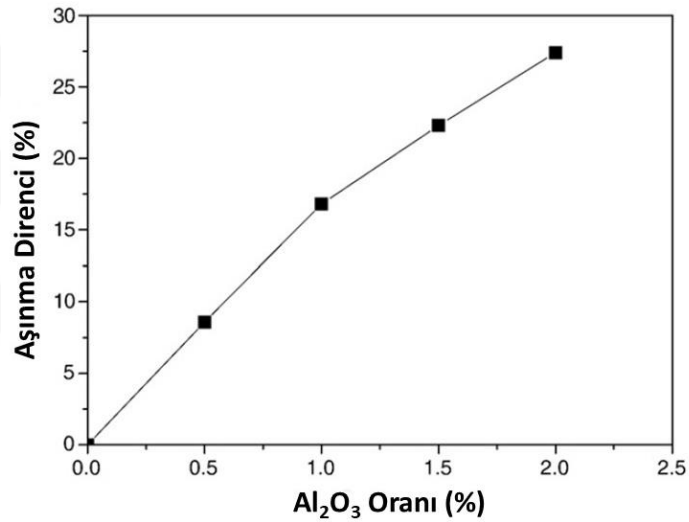
Şekil 2. 20. Nano-Al₂O₃ ile güçlendirilmiş kompozitlerin farklı sıcaklıklarda mekanik özellikleri a) Eğilme dayanımı b) Elastisite modülü (Mahato *et al.* 2019)

Yukarıdaki şekilde görülebileceği gibi, en iyi performans %0.1 nano-Al₂O₃ takviyesine sahip kompozitler için gözlenmiştir. Ayrıca, sıcaklıkta bir artış ile tüm kompozitlerin performansı azalmıştır.

Benzer bir çalışmada, Nayak *et al.* (2016) Al₂O₃ ve TiO₂ katkılı cam elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Araştırmada, kompozit malzemelerin üretimi için daha önce tartışılan çalışmada kullanılan el yatırma tekniği uygulanmıştır. Kompozitler, farklı Al₂O₃ ve TiO₂ nano parçacıkları takviye oranları ile güçlendirilmiştir. Çalışmada, %1 Al₂O₃ ve %1 TiO₂ takviyesi ile kompozitlerin tabaka içi kayma dayanımının ağırlıkça %16'ya çıktığı görülmüştür. Bununla birlikte, tabaka içi kayma dayanımı açısından en iyi sonuçların %0,3 Al₂O₃ takviyesi ve %0,15 TiO₂ takviyesi kullanılarak elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar Al₂O₃ partiküllerinin, elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerinde önemli gelişmeler sağlamak için kullanılabileceğini göstermiştir.

Geçmiş yıllarda araştırmacılar Al₂O₃ tozu takviyeleri ile PU kompozitlerin performansını da araştırmışlar. Böyle bir çalışmada, Chen *et al.* (2010) Al₂O₃ nanopartiküller takviyeli PU hibrit filmlerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, polyester esaslı

termoplastik PU, ağırlıkça %0,5 ila %2 arasında değişen farklı takviye oranlarına sahip Al_2O_3 nanoparçacıkları ile güçlendirilmiştir. Aşınma deneyi sonuçları, Al_2O_3 ile takviye edilmiş hibrit filmlerin aşınma direncinde büyük bir artış olduğunu göstermiştir. Ayrıca %2 nano- Al_2O_3 ile hibrit filmlerin aşınma direncinde %27,4'e varan önemli bir gelişme gözlenmiştir. Farklı Al_2O_3 içerikli PU hibrit filmlerin aşınma direnci, Şekil 2.21'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 21. Al_2O_3 takviyeli PU hibrit filmlerin aşınma direnci (Chen *et al.* 2010)

Nano- Al_2O_3 parçacıkları ile güçlendirilmiş PU kompozitleri üzerinde dikkat çeken diğer bir çalışma, Ameri *et al.* (2015) tarafından yapılmıştır ve çalışmada güçlendirilmiş PU kompozitlerin gaz ayırma özellikleri araştırılmıştır. Ağırlıkça %2,5 ila %30 arasında değişen nano- Al_2O_3 'ün farklı takviye oranlarına sahip PU kompozitlerinde CH_4 , CO_2 , N_2 ve O_2 gazlarının geçirgenliği incelenmiştir. Gaz geçirgenliği deneylerinin sonuçları, Al_2O_3 katkı orandaki bir artış ile bütün gazların geçirgenliğinde bir düşüş olduğunu göstermiştir. Gazların geçirgenliği Higuchi modeli kullanılarak da tahmin edilmiştir ve deneysel sonuçlar ile iyi bir ilişki olduğunu bulunmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEMLER

3.1. MATERYAL

Araştırmada kullanılan sandviç numuneleri üretmek için kullanılan malzemeler hakkında özet bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Yüzey tabakaları

Genellikle metaller ve elyaf takviyeli epoksi kompozitler sandviç yapıların yüzey tabakaları olarak kullanılır. Tez çalışmasında, sandviç malzemelerin yüzey tabakaları için karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit tabakalar üretilmiştir. Bu kapsamda, nominal ağırlığı 200 gr/m² olan “twill” dokuma özelliklerine sahip karbon elyafı kumaşlar, Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. (İstanbul)’dan tedarik edilmiştir. Kompozit üretiminde kullanılan epoksi reçine sistemi (DTE 1200 epoksi reçine / DTS 1151 sertleştirici) Duratek Koruyucu Malzemeler San. ve Tic. A.Ş.(Kocaeli)’den temin edilmiştir.

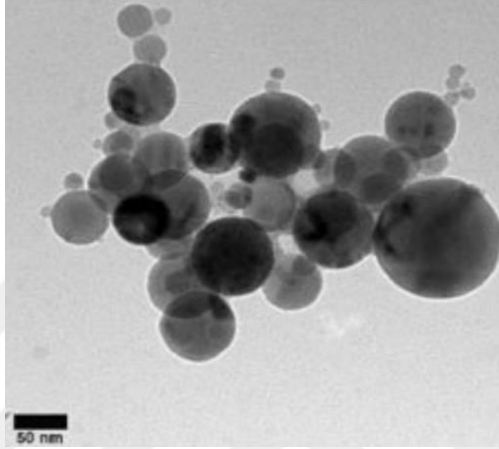
3.1.2. Çekirdek malzemesi

Sandviç numunelerde çekirdek malzemesi olarak Al₂O₃ seramik tozu katkılı ve katkısız PU köpükler kullanılmıştır. Bu kapsamda, 1122-28 PU Sistemi (Poliol ve MDI) Ravago Petrokimya A.Ş. (Kocaeli)’den tedarik edilmiştir.

3.1.3. Takviye malzemesi

PU çekirdek malzemesi Al₂O₃ seramik tozu ile takviye edilmiş olup, takviye oranı ağırlıkça 0 ile %10 arasında değiştirilmiştir. Tez kapsamında kullanılan 40 nm ortalama çaplı ve %99

saflıktaki Al_2O_3 seramik tozu, Grafen Chemical Industries Company (Ankara)'dan temin edilmiştir. Al_2O_3 seramik tozunun SEM görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3. 1. Al_2O_3 seramik tozunun SEM görüntüsü (Grafen Co., Ankara)

3.1.4. Ara yüzey yapıştırıcısı

Sandviç kompozitleri üretiminde, yüzey tabakasını çekirdek malzemesine yapıştırmak için Huntsman AV 138 M-1 / 988-1 yapıştırıcı sistemi kullanılmış ve Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. (İstanbul)'dan tedarik edilmiştir, (Şekil 3.2).



Şekil 3. 2. Huntsman AV 138 M-1 / 988-1 yapıştırıcı sistemi

3.2. Yöntemler

3.2.1. Yüzey tabakaların üretimi

Bu çalışmada, sandviç yapıların yüzey tabakaları olarak karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitler kullanılmıştır ve yüzey tabakalarının üretiminde VARTM tekniği kullanılmıştır. Bu tabakaları üretmek için Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümündeki Mekanik Laboratuvarında bulunan VARTM cihazı kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan karbon elyaf Dost Kimya (Türkiye) şirketinden tedarik edilmiştir. Araştırmada kullanılan DTE 1200 epoksi reçinesi ve DTS 1151 sertleştiriciden oluşan DURATEK 1200 epoksi sistemi ise DURATEK firmasından sağlanmıştır. Düşük viskoziteli bu epoksi sistemi özel olarak vakum infüzyon işlemleri için üretilmiştir.

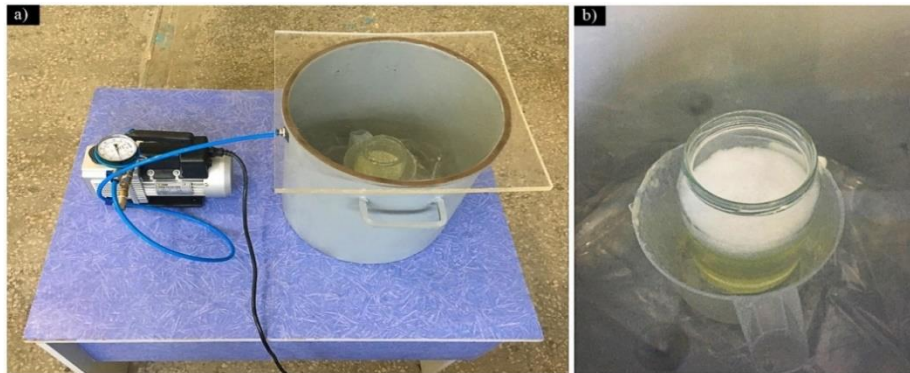
Çalışmada kullanılmak üzere (550 mm × 500 mm) ebatlarında 18 adet karbon/epoksi kompozit levha üretilmiş ve standartlara göre farklı boyutlardaki numuneler üretilen bu tabakalardan kesilmiştir. Tüm levhalar, her biri ortalama 1.05 mm kalınlığında 4 karbon elyaf tabakasından oluşturulmuştur.

VARTM üretiminde ilk olarak epoksi ve sertleştirici hazırlanmıştır. Her üretim için, 550 g epoksi reçine ve 150 g epoksi sertleştirici içeren epoksi sisteminin (DURATEK tarafından belirtildiği gibi, ağırlıkça karışım oranı, 100:27) toplam kütlesi 700 g olarak sabitlenmiştir. Epoksi ve sertleştirici bir cam kavanozda 2-3 dakika elle karıştırıldıktan sonra 500 dev/dak'da 5 dakika boyunca mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Epoksi sistemin mekanik karıştırıcı ile karıştırılması Şekil 3.3'te görülmektedir.



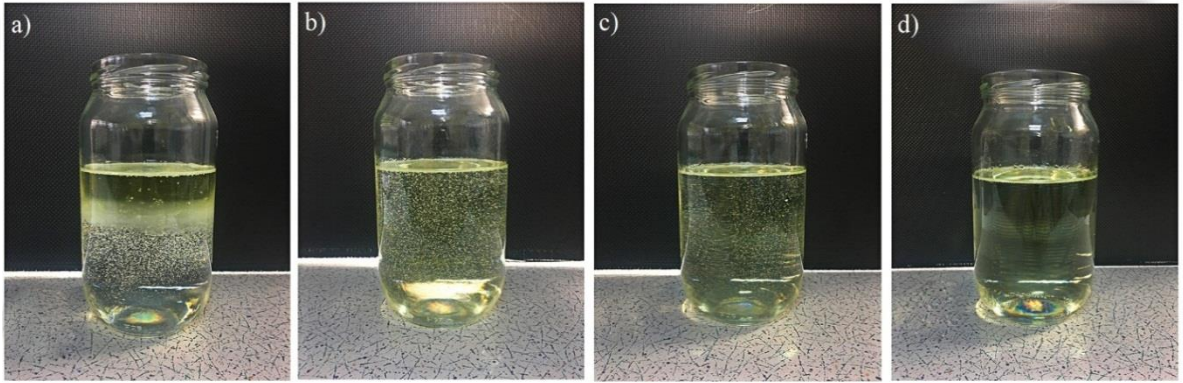
Şekil 3. 3. Epoksi sisteminin mekanik karıştırıcı ile karıştırılması

Mekanik karıştırma işlemi, epoksi reçinesinin ve sertleştiricinin homojen bir karışımını nispeten sağlamıştır. Ancak bu karıştırma işleminden sonra epoksi içerisinde, kompozit tabakalarının üretimini olumsuz etkileyebilecek çok fazla hava boşluklarının olduğu görülmüştür. Hava boşluklarının tamamen giderilmesi amacıyla, epoksi sistemi 1 saat boyunca bir vakum haznesinde tutulmuş ve tüm hava boşlukları epoksiden çıkarılarak gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3. 4. Epoksi sisteminin gazının giderilmesi a) Gaz giderme için kullanılan vakum haznesi b) Gaz giderme işlemi sırasında epoksi yüzeyindeki hava boşlukları

Şekil 3. 4'te görüldüğü üzere, epoksi sisteminden tüm hava boşlukları vakum yardımı ile çıkarılmış ve hava boşluklarının tamamen yok edilmesini sağlamak için tüm üretimlerde gaz giderme süresi 1 saat olarak sabitlenmiştir. Yukarıda bahsedilen durumu görselleştirmek adına, gaz giderme işlemi öncesinde ve sonrasında epoksi sistemde var olan gaz boşluklarını içeren görseller Şekil 3.5'te görülmektedir.

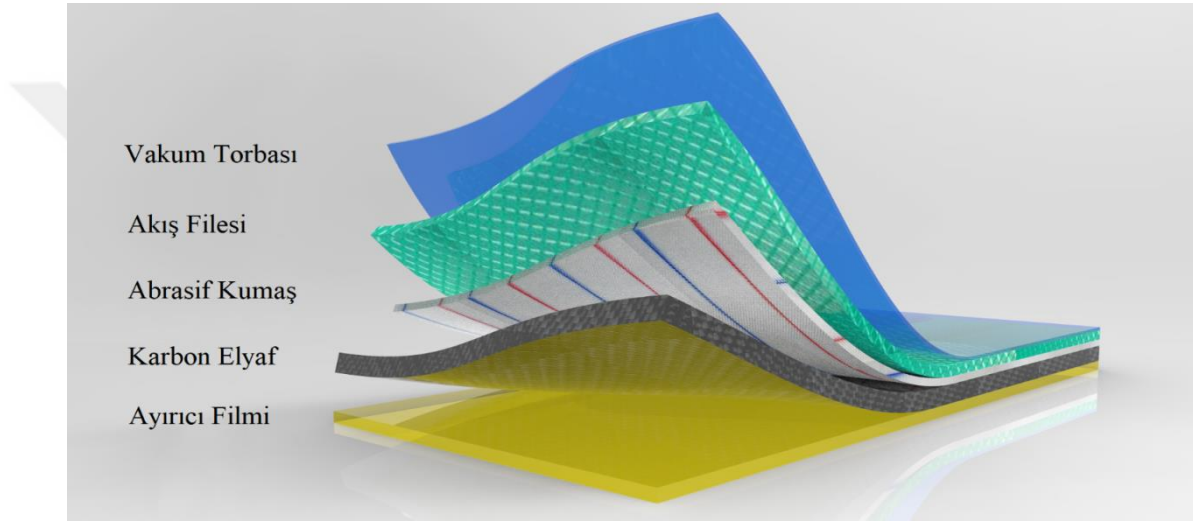


Şekil 3. 5. Epoksi reçinesi ve sertleştirici a) Karıştırmadan önce b) 2 dakika elle karıştırdıktan sonra c) 5 dakika mekanik karıştırıcı ile karıştırdıktan sonra d) 1 saat gaz giderme işleminden sonra

Şekil 3.5-c'den görüldüğü gibi, mekanik karıştırma işleminden sonra epoksi içinde çok fazla hava boşluğu bulunmaktadır. 1 saat boyunca gaz giderme işlemi sonunda hava boşlukları tamamen giderilmiştir.

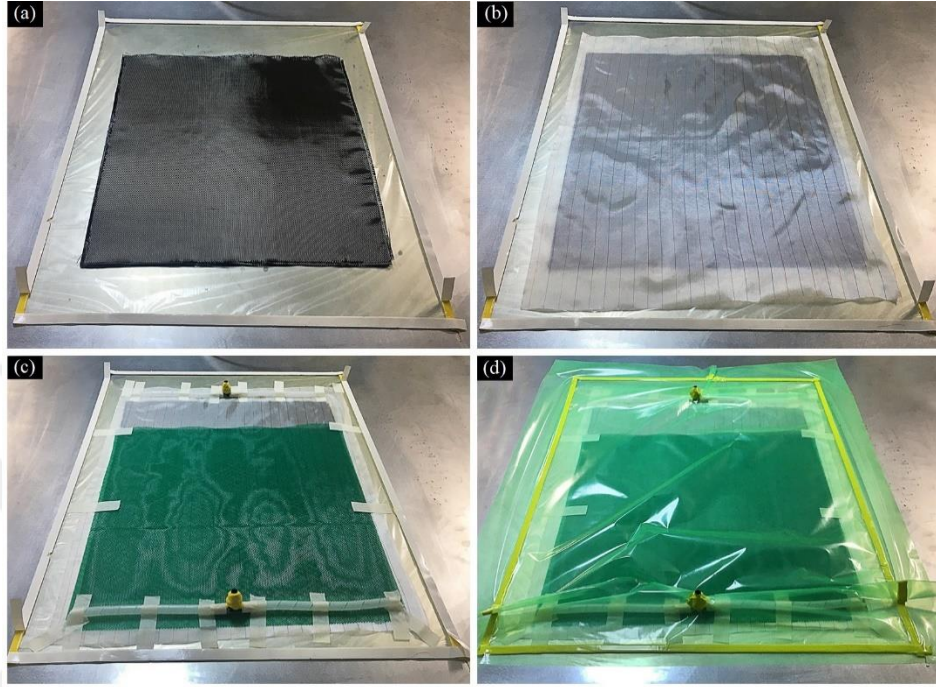
VARTM tekniği ile elyaf takviyeli kompozit tabakaların üretiminde çeşitli temel malzemeler kullanılmaktadır. Epoksi reçinenin VARTM cihazından ayrılmasını sağlamak amacıyla ayırıcı film (release film) cihaza yapıştırıldıktan sonra elyaf (cam, karbon, aramid, bazalt vb.) malzemeleri ayırıcı filminin üzerinde yerleştirilir. Tabaka sayısı üretim amacına bağlı olup kompozitin kalınlığını buna göre değişir. Üretilen kompozit tabakaların çıkarılmasını kolaylaştırmak için elyaflar üzerinde ince bir abrasif kumaş (peel ply) yerleştirildikten sonra, vakum infüzyonu sırasında epoksinin uygun dağılımını sağlayan bir akış filesi (flow mesh) yapıştırılır. Bunun üzerinde reçinenin infüzyonu için her iki tarafa

spiral hortum (spiral tube) yapıştırılır. Son olarak, sistemi hava sızdırmaz hale getirmek ve tüm havayı çıkarmak için bütün katmanların üstüne vakum naylonu (vacuum bag) yapıştırılır. VARTM tekniği kullanılarak elyaf takviyeli kompozit tabakların üretiminde kullanılan tüm bu katmanlar sırasıyla Şekil 3.6’da görülmektedir.



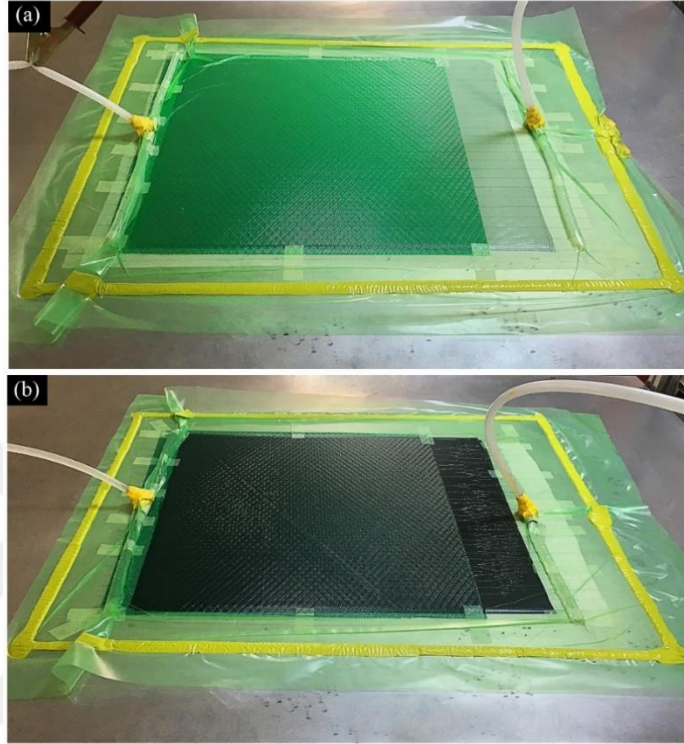
Şekil 3. 6. VARTM tekniği ile kompozit levhaların üretiminde kullanılan temel malzemeler

Yerleştirme kalıbının hazırlaması işlemin ilk olarak ayırıcı film kesilmiş ve sızdırmazlık bandı ile VARTM cihazının üzerine yapıştırılmıştır. Ardından 4 tabaka karbon elyaf kesilmiş ve ayırıcı film üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra abrasif kumaş ve akış filesi kesilerek karbon elyaf tabakaları üzerine yerleştirilmiştir. Nihai olarak, spiral hortumlar ve vakum torbası yapıştırılmıştır. VARTM üretim safhaları Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3. 7. VARTM üretimin aşamalı hazırlama a) Ayırıcı filminin yapıştırılması ve üzerine karbon elyafın yerleştirilmesi, b) Abrasif kumaşın yerleştirilmesi, c) Akış filesinin ve spiral hortumların yapıştırılması, d) Vakum torbasının yapıştırılması.

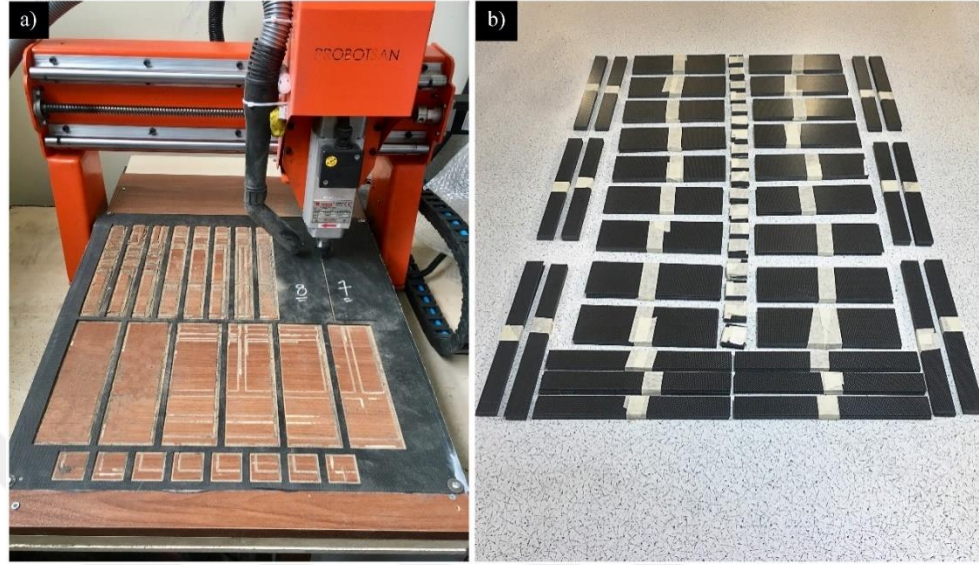
Şekil 3.7’den görüldüğü üzere, VARTM üretim sistemi vakum torbası ile kapatıldıktan sonra, vakum oluşturarak infüzyon işlemi başlamış ve her iki ucuna spiral hortumlar yerleştirilmiştir. Bundan sonra, ince hortumlar ve “t” şeklindeki küçük bağlantılar yardımıyla sistemin bir ucu vakum pompasına bağlanarak, diğer ucu kapatılmıştır. Bu sırada VARTM cihazındaki vakum pompası ve ısıtıcı sistemi açılmıştır. Vakum oluşturulduktan sonra hava sızıntısı olmaması için sistem kontrol edilmiştir. Bundan sonra VARTM cihazının sıcaklığı 100°C’ye ulaştığında infüzyon işlemi başlamış ve kapalı hortum açılarak epoksi reçine infüze edilmiştir. Vakum oluşumu ve reçine akışı Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3. 8. VARTM işlemi, a) Vakum oluşumu, b) Reçine akışı

Kalıbın kapanması ortalama 10 dakika sürmüş ve 40 dakika boyunca besleme işlemi (bleeding) gerçekleştirilmiştir. Besleme işlemi ile mobil boşlukların kalıp dışına atılması sağlanmış olup bu süre zarfında vakum pompasının çalışmasına devam edilmiştir. Kalıp 100°C’de 4 saat süreyle kürlenmeye bırakılmış ve ardından oda sıcaklığına kadar soğutulması sağlanmıştır. Ardından kalıp bozulmuş ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitleri elde edilmiştir.

Kompozit levhalar üretildikten sonra, CNC makinesi yardımıyla, titreşim, burkulma ve basma testleri için numuneler kesilmiştir. Yüzey tabakalarının kesilmesi ve kesilmiş numuneler Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3. 9. Yüzey tabakaları numuneleri a) CNC ile kesme işlemi b) Kesilmiş numuneler

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, her bir kompozit levhadan titreşim, burkulma ve basma testleri için 8 adet numune kesilmiştir. Numunelerin düzgün kesilebilmesi için kompozit levhaları CNC kesme makinesinin alt plakasına her dört taraftan cıvatalarla sabitlenmiştir. Çalışma kapsamındaki titreşim, burkulma ve basma testleri için 3 farklı boyutta kompozit numune kesilmiştir. Kesilmiş yüzey tabakaları numunelerinin boyutları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Kesilmiş yüzey tabakaları numunelerinin boyutları

Numune Tipi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
Titreşim	250	25	1.05
Basma	30	30	1.05
Burkulma	200	60	1.05

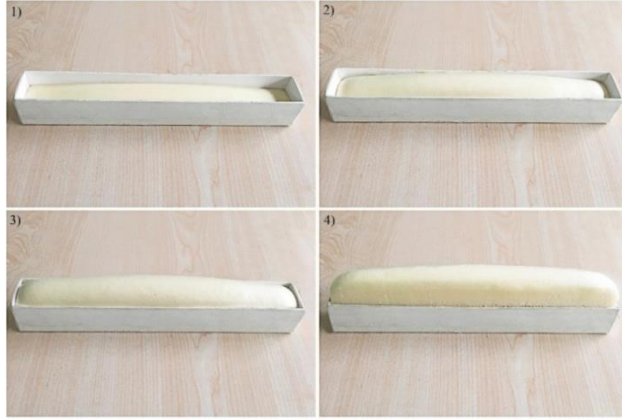
3.2.2. Poliüretan köpüğünün üretimi

Numune üretiminde kullanılan kalıplar: Bu çalışmada PUF üretiminde kullanılan poliüretan sistemi (Poliol ve MDI), Ravago Petrokimya (Türkiye) tarafından tedarik edilmiştir. Katkısız ve Al_2O_3 tozu katkılı PUF numunelerin üretimi için iki farklı tipte esnek plastik kalıp hazırlanmış ve tüm basma, titreşim ve burkulma numuneleri bu kalıplar kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca basma testi için PUF numuneleri de titreşim numune kalıplarında üretilmiştir. Her numune tipi için asgari 6 kalıp hazırlanmıştır. PUF numunelerin üretiminde kullanılan kalıplar Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3. 10. PUF üretimi için kullanılan kalıplar

Numune üretimi: İlk olarak, katkısız PUF numunelerinin üretimlerinde, poliöl ve MDI muhteviyatı, firma tarafından önerilen %54.5 ve %45.5 oranları (MDI'nin poliöl'e oranı 120:100) sabit tutulmuştur. Bu karışım oranları esas alınarak bütün katkısız numuneler için tek kullanımlık bardaklarda belirli bir miktar MDI ve poliöl 15 saniye boyunca 1000 dev/dak'da mekanik karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra, karışım kalıba dökülmüş ve serbestçe kabarmaya bırakılmıştır. Köpüğün tamamen kabarması ortalama 5 dakika sürmüştür. Bundan sonra, köpük oda sıcaklığında 10 dakika boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Köpüğün kabarma işlemi Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



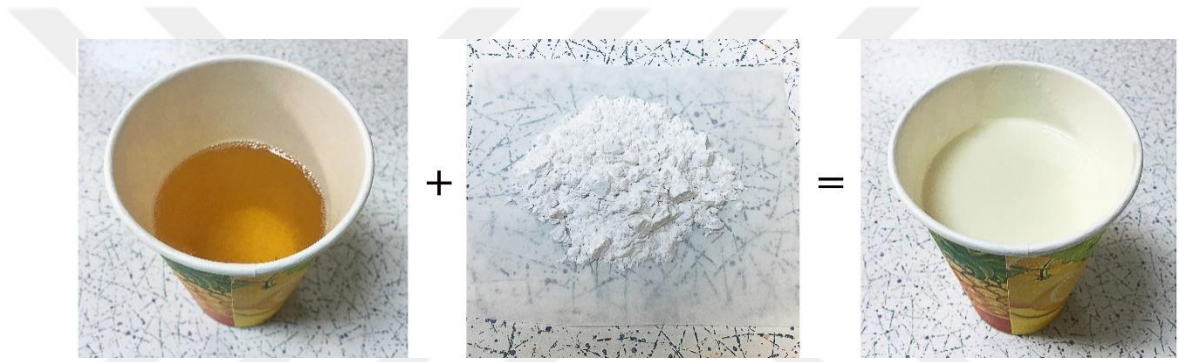
Şekil 3. 11. Köpüğün tamamen kabarma işlemi

Al_2O_3 tozu katkılı PUF numunelerinin üretiminde benzer parametreler kullanılmıştır. Al_2O_3 tozunun takviye oranı ağırlıkça %1, 2, 3, 5 ve 10 olarak alınmıştır. İlk olarak, Al_2O_3 tozu hassas terazi ile dikkatlice tartılmış ve belirli bir miktarda poliöl ile karıştırılmıştır. Hassas terazi ile Al_2O_3 tozunun ölçümü Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3. 12. Hassas terazi ile Al_2O_3 tozunun ölçümü

Hassas terazi ile Al_2O_3 tozu ölçtükten sonra, poliöl ile tozunun karışım hazırlanmıştır. Poliöl ve Al_2O_3 tozu 2000 dev/dak'da 5 dakika boyunca mekanik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Çalışma kapsamında, her numune için toplam ağırlık sabit tutulmuş ve MDI'nin poliöl'e oranı, katkısız numunelerde olduğu gibi, 120:110 oranı kullanılmıştır. Poliöl ve Al_2O_3 tozu, karıştırmadan önce ve karıştırdıktan sonra Şekil 3.13'te görülmektedir.



Şekil 3. 13. Poliöl ve Al_2O_3 karıştırmadan önce ve karıştırdıktan sonra

Şekil 3.13'te görüldüğü gibi, mekanik karıştırıcıda 5 dakika boyunca karıştırdıktan sonra çok homojen bir karışım elde edilmiştir. Bundan sonra, katkısız numunelerde olduğu gibi, farklı oranlardaki Al_2O_3 tozu katkılı PU numuneler ayrı ayrı kalıba dökülmüş ve 10 dakika boyunca kürlenmeye terk edilmiştir. Bazı PU numuneler Şekil 3.14'te görülmektedir.



Şekil 3. 14. PU köpük numunelerin üretimi

Numunelerin kesilmesi: Bütün PU köpük numuneler üretildikten sonra, yüzey tabakalarının standartlara göre kesilmeleri için CNC cihazı kullanılmıştır. Bazı kesilmiş PU numuneleri Şekil 3.15’te görülmektedir.



Şekil 3. 15. CNC ile kesilmiş PU numuneleri

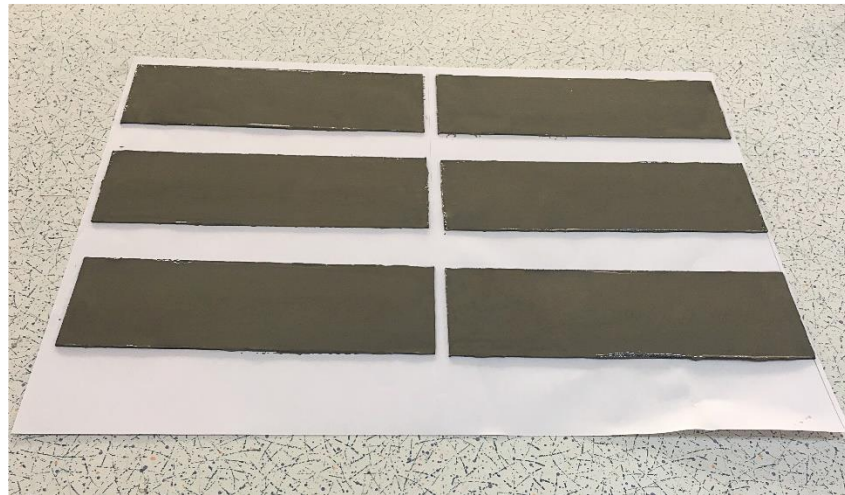
Çalışma kapsamında, titreşim, burkulma ve basma testleri için 3 farklı boyutta PU numuneler kesilmiştir. Kesilmiş PU numunelerin boyutları Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3. 2. Kesilmiş PU numunelerinin boyutları

Numune Tipi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
Titreşim	250	25	28
Basma	30	30	28
Burkulma	200	60	28

3.2.3. Sandviç numunelerin hazırlanması

Sandviç numunelerin hazırlanmasında, ara yüzey yapıştırıcı olarak Huntsman AV-138 ve HV-998 sertleştirici sistemi kullanılmıştır. İlk olarak, yapıştırıcı ile sertleştirici bir cam bardakta 1000 dev/dk'de 5 dakika boyunca mekanik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Bundan sonra, hazırlanmış yapıştırıcı sandviç numunelerin alt yüzey tabakalarına bir spatül yardımı ile eşit bir şekilde sürülmüştür. Yüzeylerinde yapıştırıcı olan alt yüzey tabakaları Şekil 3.16'da görülmektedir.

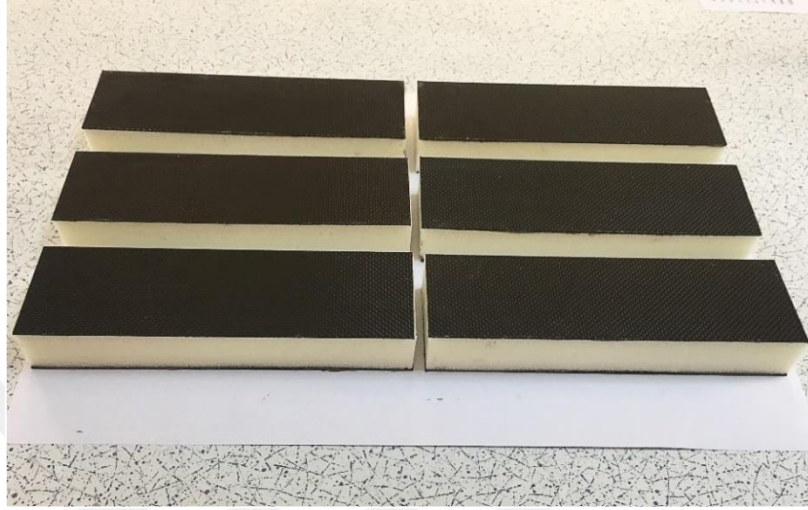
**Şekil 3. 16.** Yüzeylerinde yapıştırıcı olan alt yüzey tabakaları

Her bir çekirdek tipi için bir seferde 6 sandviç numune hazırlanmıştır. Alt yüzey tabakalarına düzgün şekilde yapıştırıcı uygulandıktan sonra, PUF çekirdek numuneleri dikkatlice bu alt yüzey tabakalarının üstüne yerleştirilmiştir. PUF çekirdeklerinin alt yüzey tabakalarına yerleştirilmesinden sonraki numuneler Şekil 3.17'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 17. Alt yüzey tabakalarına PUF çekirdeklerinin yerleştirilmesi

Bundan sonra, daha önce yapıldığı gibi, hazırlanmış yapıştırıcı sandviç numunelerin üst yüzey tabakalarına bir spetül yardımı ile eşit bir şekilde sürülmüştür. Son olarak, bu üst yüz tabakaları, sandviç numuneleri elde etmek için PUF çekirdeklerinin üstüne yerleştirilmiştir. PUF çekirdeklerinin üstüne üst yüzey tabakalarının yerleştirilmesinden sonra sandviç numuneleri Şekil 3.18'de görülmektedir.



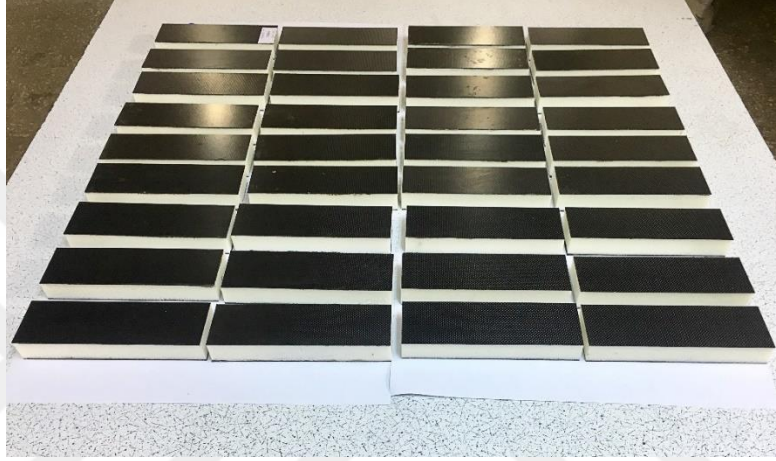
Şekil 3. 18. Üst yüzey tabakalarının yerleştirilmesi

Sandviç numunelerin üretiminden sonra, tüm numunelerin üzerine metal ağırlıkları yerleştirilmiş ve numuneler kürlenmesi için oda sıcaklığında 48 saat boyunca (yapıştırıcının oda sıcaklığında yavaş sertleşme süresi nedeniyle) bekletilmiştir. Ayrıca, metal ağırlıklar ve numuneler arasında temas oluşturmamak için temiz kâğıt yerleştirilmiştir. Metal ağırlıklar altında kürlenmesi için kalan sandviç numuneleri Şekil 3.19’da görülmektedir.



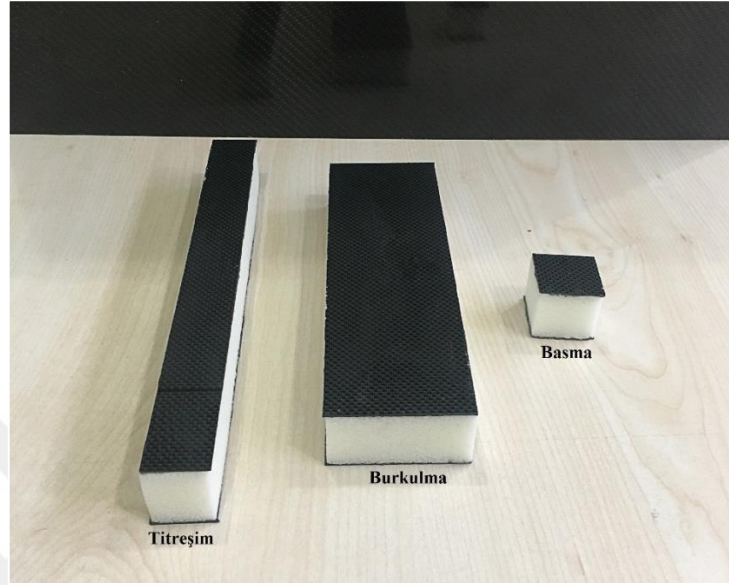
Şekil 3. 19. Metal ağırlıklar altında kürlenme için bırakılan sandviç numuneleri

Yapıştırıcı kürlendikten sonra metal ağırlıklar kaldırılmıştır ve sandviç numunelerin yanlarındaki fazla yapıştırıcı dikkatlice temizlenmiştir. Yapıştırıcının kürlenmesinden sonra son sandviç numunelerden bazıları Şekil 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3. 20. Yapıştırıcı kürlendikten sonra son sandviç numuneler

Bu araştırma kapsamında titreşim, burkulma ve basma testleri için ASTM standartlarına göre üç farklı boyutunda sandviç numune üretilmiştir. Titreşim (ASTM E756), burkulma (ASTM C364) ve basma (ASTM C365) testleri için sandviç numuneler Şekil 3.21'de görülmektedir. Bu numunelerin ASTM standartlarına göre boyutlar Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3. 21. Titreşim (ASTM E756), burkulma (ASTM C364) ve basma (ASTM C365) testleri için sandviç standart numuneler

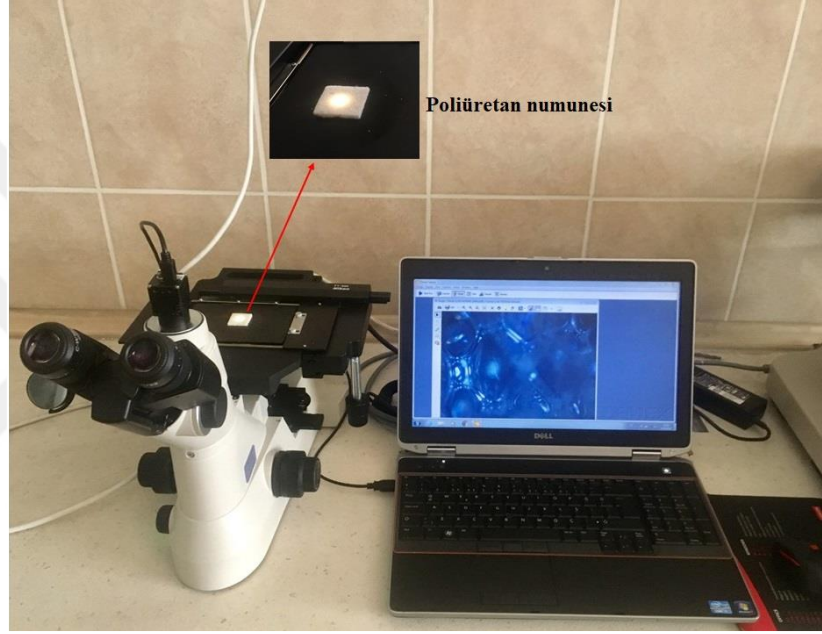
Çizelge 3. 3. Sandviç numunelerinin standart boyutları

Numune Tipi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
Titreşim	250	25	30.1
Basma	30	30	30.1
Burkulma	200	60	30.1

3.2.4. PU köpük numunelerin mikroskop görüntülemeleri

Katkısız ve katkılı PU üretimlerinden ilk olarak küçük boyutlarda numuneler kesilmiş ve bu numunelerin mikroskop görüntüleri alınmıştır. Bunun için Atatürk Üniversitesi ARGE Laboratuvarında bulunan Nikon Eclipse MA100 optik mikroskobu kullanılmıştır. Farklı katkı oranlarındaki tüm PU numunelerinin mikroskop görüntüleri dikkatle gözlenmiş ve katkısız numuneler ile karşılaştırılmıştır. Mikroskop görüntüleri, PU matrisindeki Al_2O_3 tozunun farklı takviye oranlarındaki dağılımından dolayı mikro yapıdaki değişikliklerini

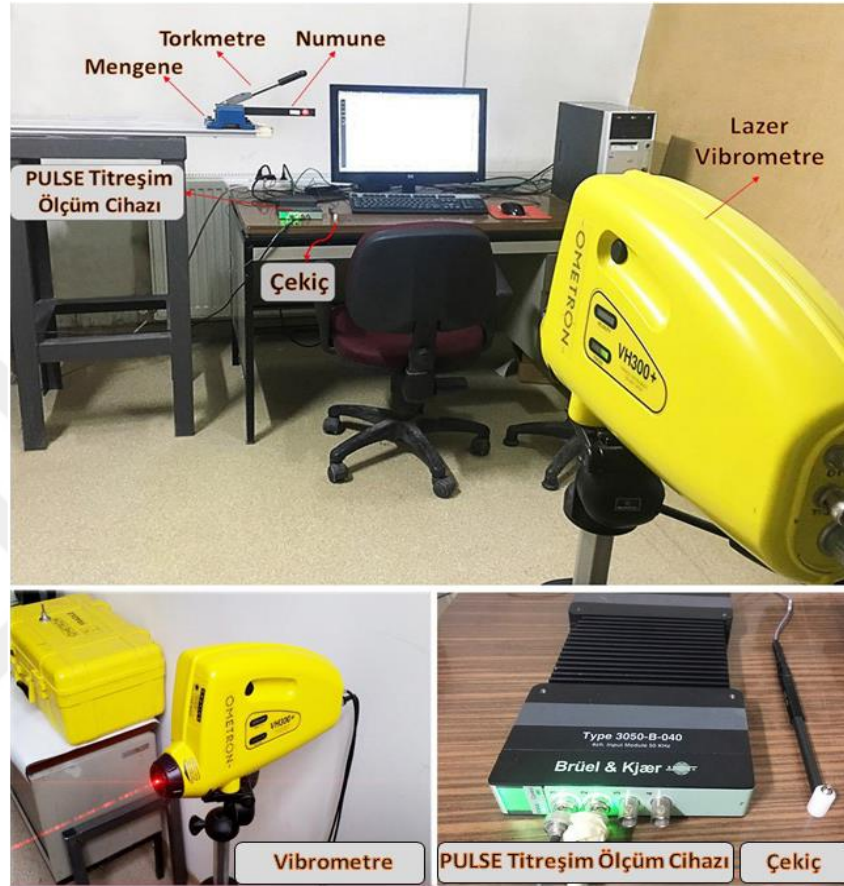
incelemek adına oldukça yardımcı olmuştur. Ayrıca, mikroskop görüntüleri bütün test sonuçlarındaki değişimini daha iyi anlamak adına oldukça fayda sağlamıştır. Mikroskop görüntülemeye kullanılan aparat Şekil 3.22'de görülmektedir.



Şekil 3. 22. Çalışma kapsamında kullanılan optik mikroskobu

3.2.5. Sandviç numunelerin dinamik analizleri

Sandviç numunelerin dinamik analizleri ASTM E756 standardına göre yapılmıştır. Analizleri, Atatürk Üniversitesi Makine Dinamiği ve Teorisi laboratuvarında mevcut lazer vibrometre, PULSE titreşim ölçüm sistemi, ME'scope VES® Modal Analiz Programı kullanılarak yapılmıştır. Dinamik analizleri kapsamında, sandviç numunelerin birinci, ikinci ve üçüncü doğal frekansları ve bunların sönüm oranları hesaplanmıştır. Sandviç numunelerin dinamik analizleri için kullanılan aparat Şekil 3.23'te görülmektedir.



Şekil 3. 23. Titreşim analizleri için deney düzeneği

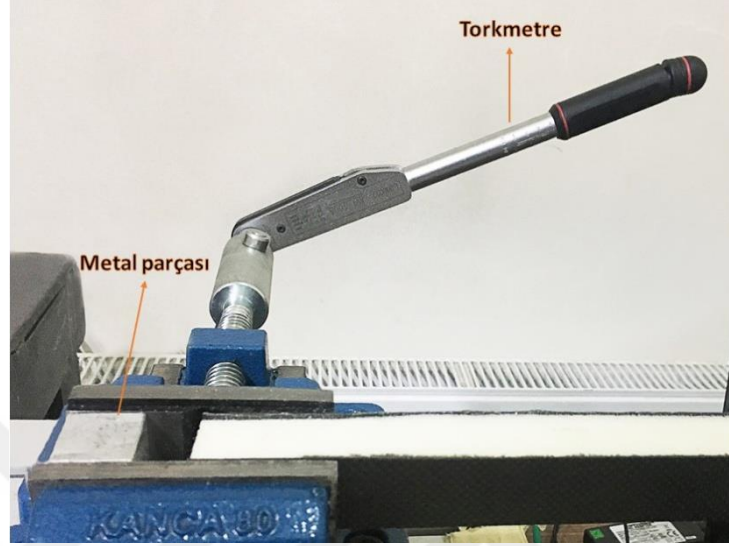
Her deney türü için en az 6 numune test edilmiş ve her numuneyle ilgili ortalama bir değer elde etmek için 5 test uygulanmış ve her numune türü için tek bir ortalama değer hesaplanarak Microsoft Excel dosyası olarak kaydedilmiştir. Ayrıca, bütün elde edilen değerler için Denklem 3.1’de verilen %95 güven aralığı formülü kullanılarak grafikler için hata çubukları hesaplanmış ve grafik olarak gösterilmiştir. Basma ve burkulma testlerinde de Denklem 3.1 kullanılarak güven aralığı hesaplanmış ve grafiklere dökülmüştür. %95 güven aralığını hesaplanmak için kullanılan denklem 3.1 aşağıdaki gibidir;

$$GA = \frac{1,96 \times SDS}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

Dinamik analizlerdeki işlem adımları aşağıda sıralanmıştır;

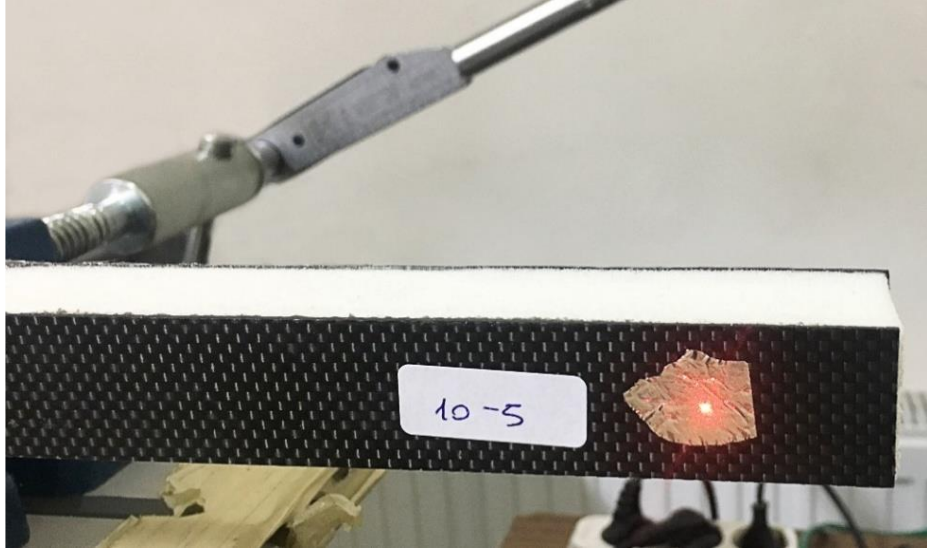
- Testler, sabit-ankastre sınır şartına göre gerçekleştirilmiş ve bu amaçla, numunenin bir ucu torkmetre yardımıyla mengeneye sabitlenmiştir. Test standardına göre numuneler mengene içinde 40 mm uzunluk olacak şekilde sıkıştırılmıştır.
- Kontrollü bir ölçüm elde etmek için tüm numuneler üzerinde belli bir nokta odaklanılmıştır. Ayrıca, lazer ışınının daha iyi yansımaları için sandviç numunelerin yüzeyine bir alüminyum folyo yapıştırılmıştır.
- Tüm numuneler sabit hız ve kuvvet uygulanan darbeli çekiç ile ankastre ucuna yakın bir yere vurulmuştur.
- Son olarak, numuneler için doğal frekans ve sönüm oranı değerleri çizilen grafikler yardımı ile hesaplanmıştır.

Yukarıda bahsedildiği gibi, numuneler torkmetre ile 4 Nm'lik sabit bir tork ile sıkıştırılmıştır. Ayrıca, ASTM standardının önerdiği gibi, PU çekirdeğinin hasara uğramaması için mengene içine sandviç numunesiyle aynı kalınlığa sahip küçük bir metal levha yerleştirilmiştir. Sandviç numunesinin sıkıştırılması için kullanılan metal levha ve torkmetre Şekil 3.24'te görülmektedir.



Şekil 3. 24. Numunelerin sıkıştırılması için kullanılan metal parçası ve torkmetre

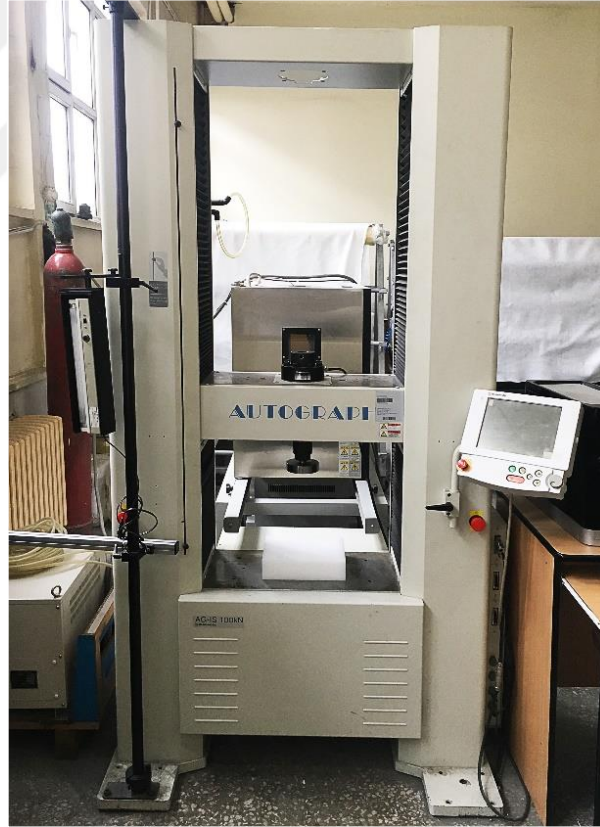
Ayrıca, lazer ışınının numuneden tekrar vibrometreye düzgün bir şekilde yansması çok önemlidir. Bu amaçla, numunenin hedef yüzeyine küçük bir alüminyum folyo yapıştırılmıştır. Sandviç numunesinin alüminyum folyo üzerinde lazerin hedeflenmesi Şekil 3.25'te görülmektedir.



Şekil 3. 25. Sandviç numune üzerinde lazerin hedeflenmesi

3.2.6. Sandviç numunelerinin basma testleri

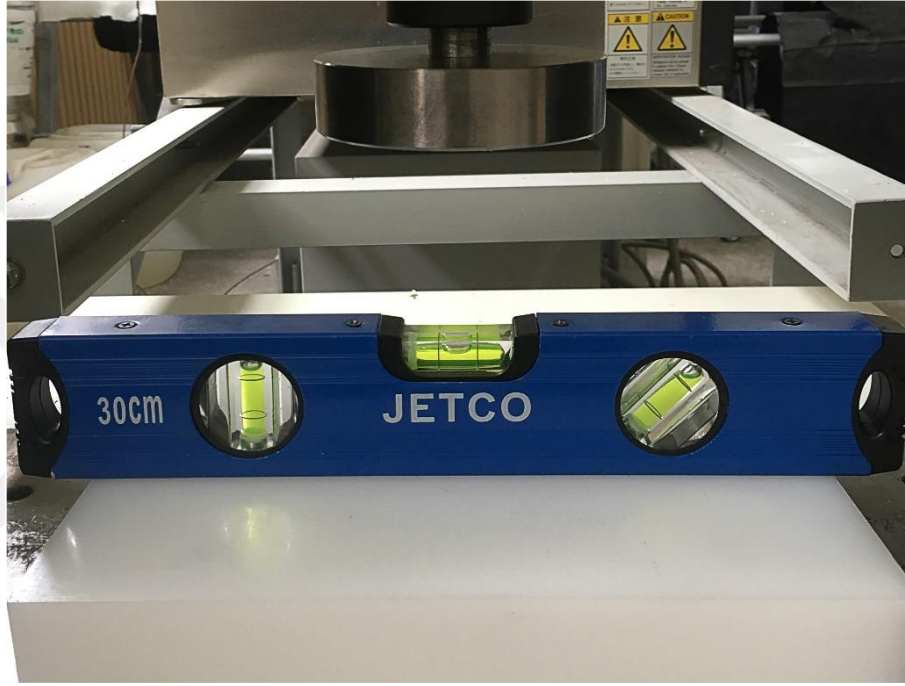
Basma testleri, Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümündeki Mekanik laboratuvarı bünyesinde bulunan Üniversal çekme test cihazı (Shimadzu AGIS100, Shimadzu Corporation/Japan) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basma testleri ASTM C365 standardına göre yapılmıştır. Titreşim testlerinde olduğu gibi, her numune tipi için 6 sandviç numune test edilmiştir. Bu araştırma kapsamında kullanılan test makinesi Şekil 3.26'da görülmektedir.



Şekil 3. 26. Üniversal çekme test cihazı

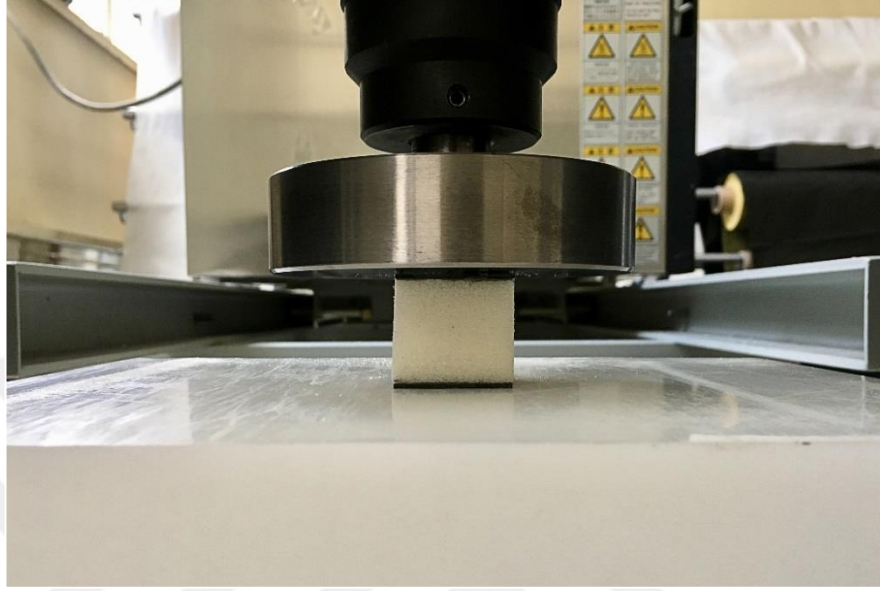
Basma testlerini yapmadan önce, alt yüzeye paralel sert bir plastik parçası yerleştirilmiştir. İlgili standardına göre, numunelerin düz bir şekilde bastırılması gerekmektedir. Bundan

doluy  plastik malzemenin yüzeyinin d zl    bir su terazisi ile kontrol edilmiştir. Plastik malzemenin su terazisi kullanılarak yüzey kontrolü  ekil 3.27'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 27. Su terazisi kullanılarak yüzeyinin kontrolü

Bundan sonra, tüm numuneleri aynı yere yerleştirmek için numunenin etrafına alt yüzey üzerinde düz bir çizgi çizilmiştir. PU çekirdeğin bası  altındaki hasarını gözlemlemek için numuneler 8 mm'lik  ekil değiştirme olacak şekilde bası kuvveti uygulanmıştır. Test standardına göre, yükleme hızı basma testleri için 0.5 mm/dak olarak tutulmuştur. Basma deneyi için sandviç numunesi  ekil 3.28'de görülmektedir.

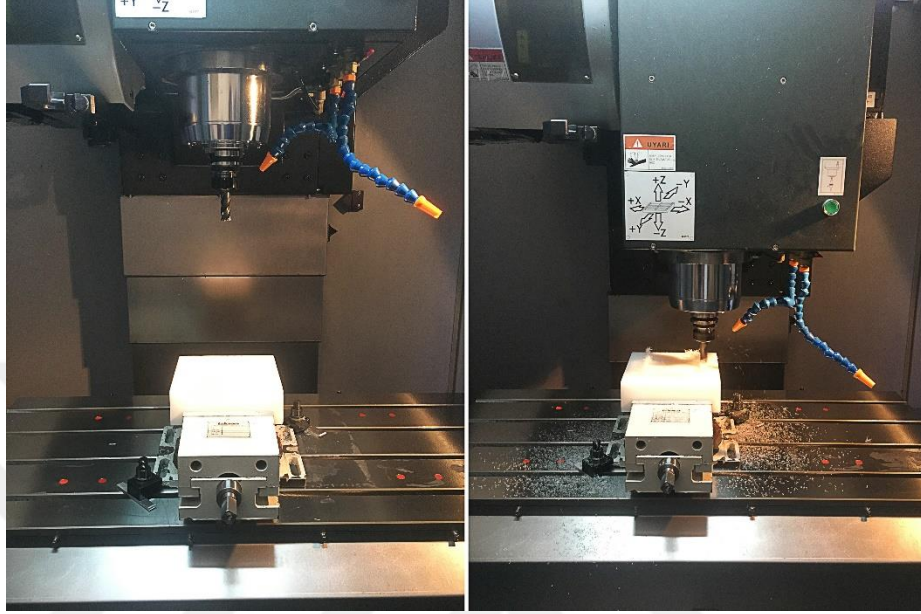


Şekil 3. 28. Basma testine maruz sandviç numunesi

Tüm numuneler için pik yükler belirlenmiş ve bir Microsoft Excel tablosu oluşturulmuştur. Bundan sonra, titreşim testi sonuçlarında olduğu gibi, Denklem 3.1 kullanılarak tüm değerler için güven aralıkları bulunmuş ve hata çubukları grafiklerine eklenmiştir.

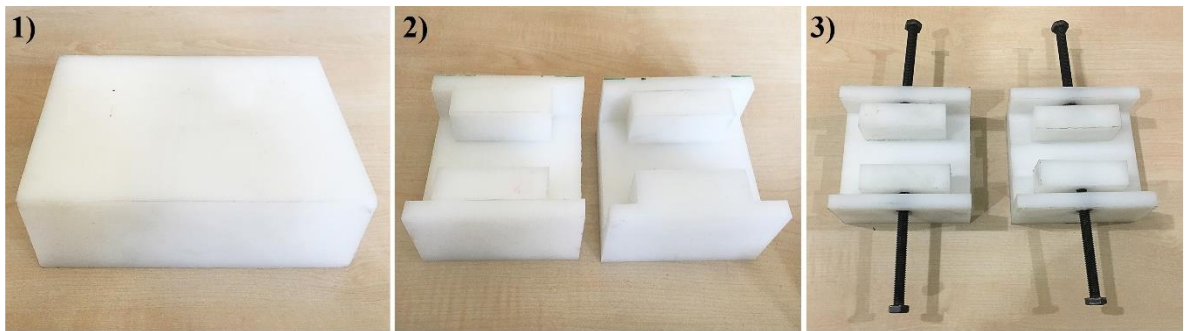
3.2.7. Sandviç numunelerinin burkulma testleri

Burkulma testleri de Üniversal çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tüm testler ASTM C364 standardına göre yapılmıştır. Burkulma testleri için de aynı plastik parçası zemin düz yüzey olarak kullanılmıştır. Sandviç numunelerin burkulma testleri için ilgili test standardı tarafından test numunelerinin üst ve alt kenarlarının hasara uğramadan önce erken ayrılmasını (delamination) önlemek için mengene ile sabitlenmesi önerilmektedir. Bu amaçla, CNC freze makinesi (Shimadzu AG-IS 100kN) kullanılarak sert bir plastik malzemeden numunelerin üst ve alt yüzeyleri için, ilgili standartta olduğu gibi, tutucular hazırlanmıştır. CNC freze makinesi kullanılarak tutucuların işlenmesi Şekil 3.29'da görülmektedir.



Şekil 3. 29. CNC freze makinesi ile tutucuların işlenmesi

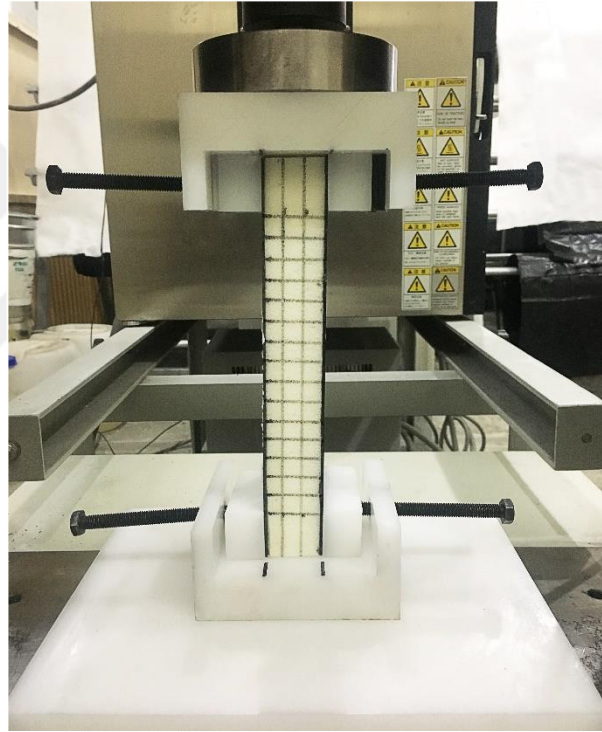
PU çekirdek malzemesine ekstra ağırlıktan hasara uğramadığından dolayı tutucular hafif bir malzemeden yapılmıştır. İşleme işleminden sonra, her bir kalıbın duvarlarının orta yüzeyinde iki delik açılmıştır. Daha sonra, bu uzun deliklere iki uzun düz yüzlü vida yerleştirilmiş ve burkulma testleri sırasında numuneyi üst ve alt yüzeylerinden sıkıştırmak için kullanılmıştır. Tutucuların yapım aşamaları Şekil 3.30'da görülmektedir.



Şekil 3. 30. Tutucuların yapım aşamaları

Tutucular hazırlandıktan sonra, numuneler dikkatlice bu kelepçelerin içine yerleştirilmiş ve ilgili test standardına göre burkulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 1 mm/dak

olarak sabit tutulmuştur. Diğer testlerde olduğu gibi her bir numune tipi için 6 test yapılmış ve numunelerin kırılma anındaki pik yükler belirlenmiştir. Daha sonra, bu pik yüklerin ortalama değerleri hesaplanmış ve grafikler oluşturulmuştur. Ayrıca, denklem 3.1 kullanılarak güven aralığı değerleri hesaplanmış ve grafiklere hata çubukları eklenmiştir. Burkulma testine maruz sandviç numunesi Şekil 3.31'de görülmektedir.



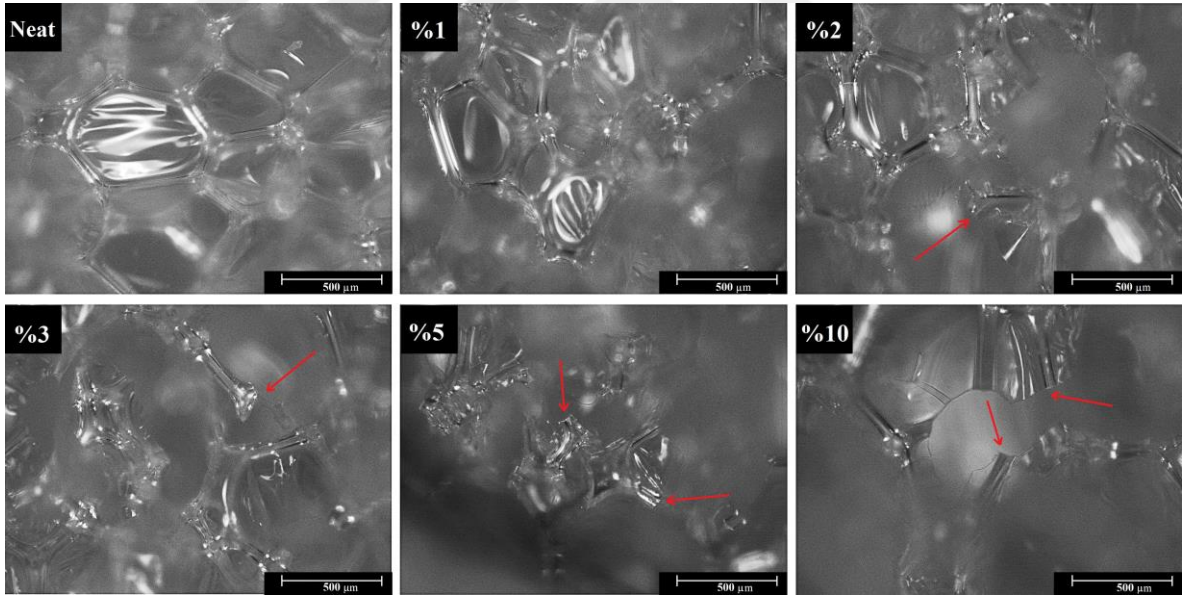
Şekil 3. 31. Burkulma testine maruz sandviç numunesi

Şekil 3.31'de görüldüğü gibi, burkulma davranışının gözlenebilmesi için numuneler üzerinde 1 cm aralıkla yatay ve düşey çizgiler çizilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Poliüretan Numunelerin Mikroskop Görüntüleri

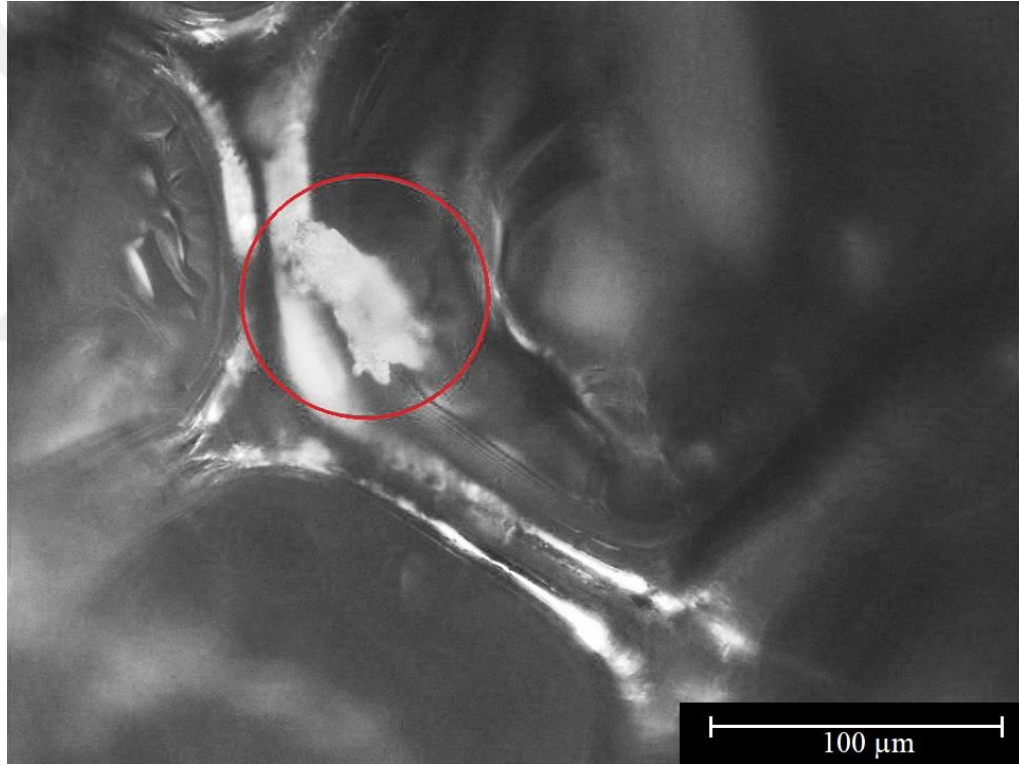
Daha önce bahsedildiği gibi, katkısız ve katkılı PU numunelerinin mikro görüntüleri, Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünün ARGE laboratuvarında bulunan Nikon optik mikroskobu kullanılarak alınmıştır. Bu amaçla, her bir PU numune türünden ince katmanları kesilmiş ve numunelerin hücre yapılarını gözlemlemek için her numune tipi için en az 5 mikro görüntü alınmıştır. Tüm poliüretan numunelerin mikro görüntüleri Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4. 1. Poliüretan numunelerin optik mikroskop görüntüleri (50 K×büyütme oranı)

Şekil 4.1’de, Al_2O_3 seramik partiküllerin katkılanması sonrasında, PU numunelerin hücre duvarlarındaki mikro zincir yapılarında oluşan kırılma hasarları açıkça görülmektedir. Hücre yapısındaki hasar, katkı oranındaki artışla birlikte artmış ve özellikle basma testi durumunda, sandviç numunelerin performansı üzerinde olumsuz bir etki göstermiştir.

Ayrıca, Al_2O_3 parçacıklarının, özellikle %10 katkılı numunelerde yüksek oranlarında homojen olmayan bir karışım durumu görülmüştür. MDI ve poliöl karışımının homojen olmayışının (heterojen), çok kısa karıştırma süresi (15 saniye) nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, karışımın heterojen olması PU matrisi içinde Al_2O_3 partiküllerinin topaklandığını göstermektedir. Bununla ilgili, %10 katkılı numunenin PU matrisinde yer alan topaklanmış Al_2O_3 partikül kümeleri Şekil 4.2'de görülmektedir.

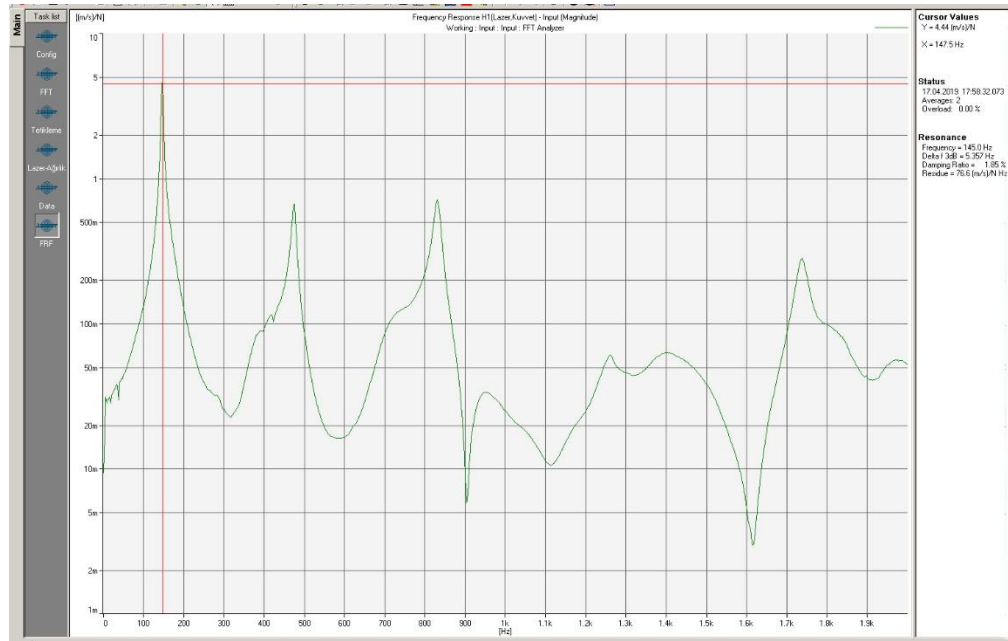


Şekil 4. 2. Poliüretan matris içerisinde Al_2O_3 partiküllerinin topaklanması

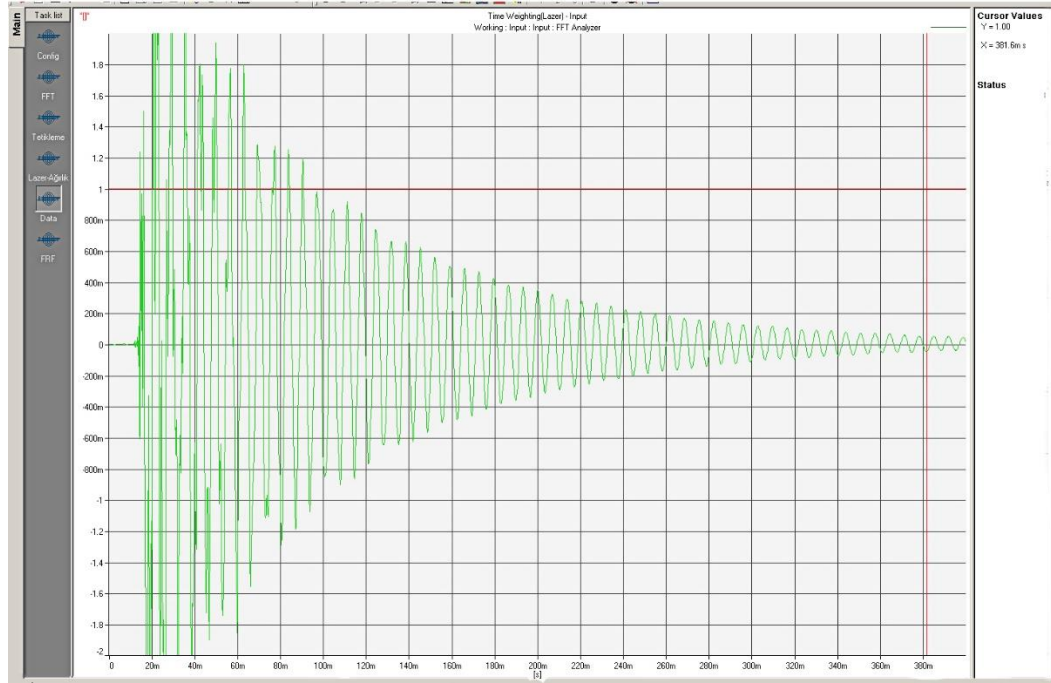
Şekil 4.2 yüksek katkı oranlarında Al_2O_3 partiküllerinin PU matrisi içerisinde topaklandığını göstermektedir. Partiküllerin topaklanması, bir sonraki bölümde detaylı olarak tartışılan sandviç numunelerin performansı üzerinde olumsuz bir etki oluşmuştur.

4.2. Dinamik Analizi Sonuçları

Daha önce bahsedildiği gibi, her bir sandviç numune türünden 6 numune için dinamik analizler yapılmıştır. Dinamik analizler ASTM E756 test standardına göre gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler için kullanılan aparat Şekil 3.19'da verilmiştir. Sandviç numunelerin dinamik analizi kapsamında tüm numuneler için 1. doğal frekanslar ve 1. sönüm oranları belirlenmiştir. Yapılan testler sırasında doğal frekanslar ve sönüm oranları için elde edilen örnek grafikler Şekil 4.3 ve 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4. 3. Sandviç numunelerin doğal frekansını gösteren grafik



Şekil 4. 4. Sandviç numunelerin sönüm oranını gösteren grafik

Şekil 4.3, doğal frekansların değerlerini belirlemek için kullanılan tipik frekans yanıt fonksiyonu (FRF) ve Şekil 4.4 ise, sönüm oranı değerlerini belirlemek için kullanılan logaritmik azalma grafiğini göstermektedir. Sönüm oranını hesaplamak için kullanılan logaritmik azalma formülü aşağıdaki gibidir:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_0}{x_n} \right) \quad (4.1)$$

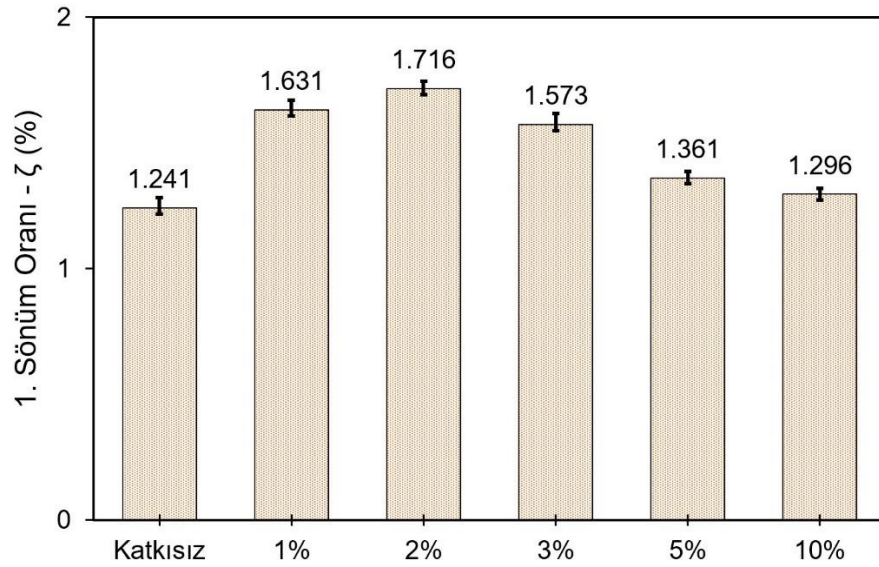
Burada n salınımın sayısı, x_0 ilk genlik değeri ve x_n son genlik değeridir. Sandviç numunenin sönüm oranı (ζ) aşağıdaki denklemden bulunur;

$$\zeta = \frac{\delta^2}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (4.2)$$

Doğal frekans ise Denklem 4.3 ile hesaplanmaktadır;

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.3)$$

Burada ω 1. doğal frekans değeri, k ve m sırasıyla malzemenin rijitlik ve kütle değerleridir. Sandviç numunelerin 1. doğal frekans ve 1. sönüm oranı değerleri elde edilen grafiklerden hesaplanmış ve Çizelge 4.1’de verilmiştir. Tüm sonuçlar için %95 güven aralığı değerleri hesaplanarak grafikler çizilmiştir. Sandviç numunelerin 1. sönüm oranı sonuçları Şekil 4.5’te görülmektedir.



Şekil 4. 5. Sandviç numunelerin 1. sönüm oranları

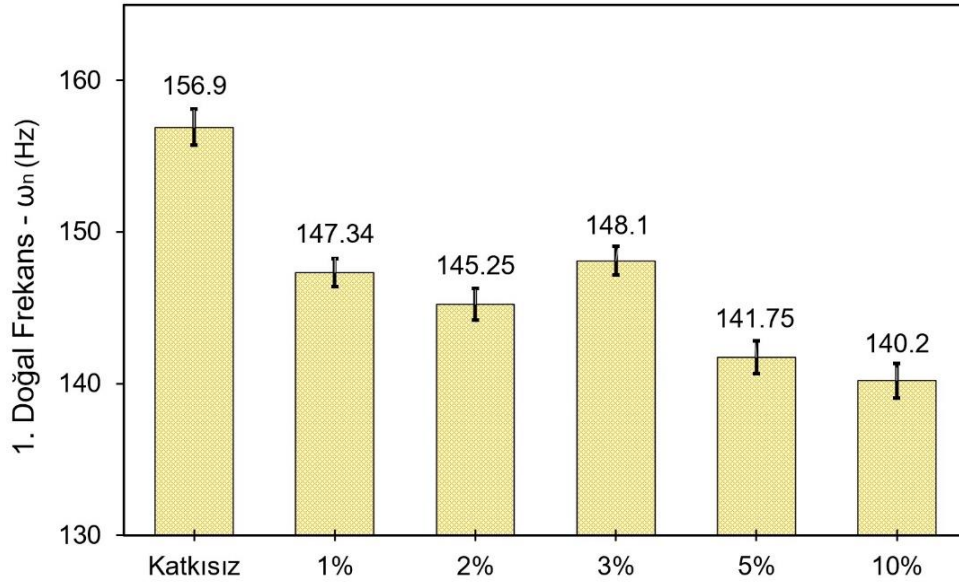
Şekil 4.5’ göre katkısız numunelere kıyasla bütün Al_2O_3 katkılı numunelerin sönümleme oranı değerleri artmış olup en yüksek sönüm oranı, %2 Al_2O_3 katkılı sandviç numunelerde elde edilmiştir. Katkısız numunelere kıyasla %2 Al_2O_3 katkılı numuneler için %38,3 artış gözlenirken, %1 ve %3 katkılıda sırasıyla %31,4 ve %26,8 artış görülmüştür. Ayrıca, %5

ve %10 katkılıda sırasıyla %9,7 ve %4,4 artış gözlenmiştir. Genel bir eğilim olarak, %2 katkı oranına kadar sönüm oranında bir artış gözlenmiş ve %2 ile %10 katkı oranları arasında doğrusal bir azalma gözlenmiştir. Sönüm oranlarının sonuçları güven aralığı değerleri ile birlikte Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4. 1. Sandviç numunelerin 1. sönüm oranları ve güven aralık değerleri

Numune Tipi	Sönüm Oranı (%)	Güven Aralığı
Katkısız	1.241	± 0.041
%1	1.631	± 0.04
%2	1.716	± 0.03
%3	1.573	± 0.043
%5	1.361	± 0.027
%10	1.296	± 0.023

Sandviç numunelerin 1. doğal frekanslar durumunda, %2 katkı oranına kadar doğrusal bir azalma gözlenirken, %3 katkı oranı için bir artış gözlenmiştir. Ayrıca %3 katkı oranından %10’a kadar doğrusal bir azalma olduğu görülmüştür. En düşük 1. doğal frekans değeri %10 Al_2O_3 katkılı numunelerde bulunmuştur. Tüm numuneler arasında en yüksek doğal frekans değerini katkısız numuneler göstermiş olup Al_2O_3 katkılı numuneler arasında en yüksek doğal frekans değerleri %3 katkılıda olmuştur. Sandviç numunelerinin 1. doğal frekans değerleri Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4. 6. Sandviç numunelerin 1. doğal frekansları

Sandviç numunelerin 1. doğal frekansları ve güven aralık değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

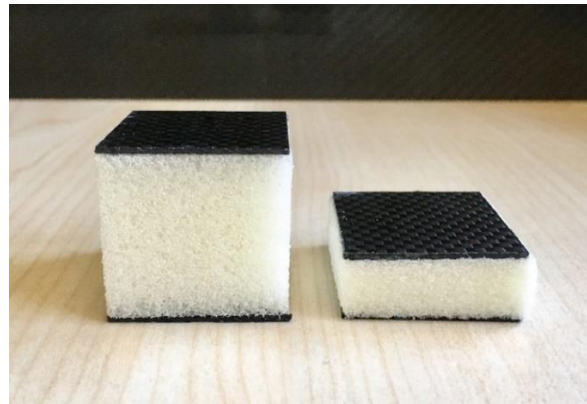
Çizelge 4. 2. Sandviç numunelerin 1. doğal frekansları ve güven aralık değerleri

Numune Tipi	1. Doğal Frekans (Hz)	Güven Aralığı
Katkısız	156.9	± 1.18
%1	147.34	± 0.92
%2	145.25	± 1.05
%3	148.1	± 0.95
%5	141.75	± 1.08
%10	140.2	± 1.15

Elde edilen test sonuçlarına göre, sandviç numunelerin doğal frekans değerleri katkı oranındaki artışla birlikte azalmıştır. Denklem 4.3'ten numunelerin doğal frekans değerlerinin malzemenin kütlesine ve rijitliğine bağlıdır. Numunelerin üretim sürecinde kütleleri sabit tutulduğundan dolayı katkı oranındaki artışla birlikte numunelerin rijitliklerinin azaldığı gözlenmiştir. Katkılı numunelerin doğal frekans değerlerinde çok küçük bir azalma olmasına rağmen, katkısız numunelerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

4.3. Basma Testi Sonuçları

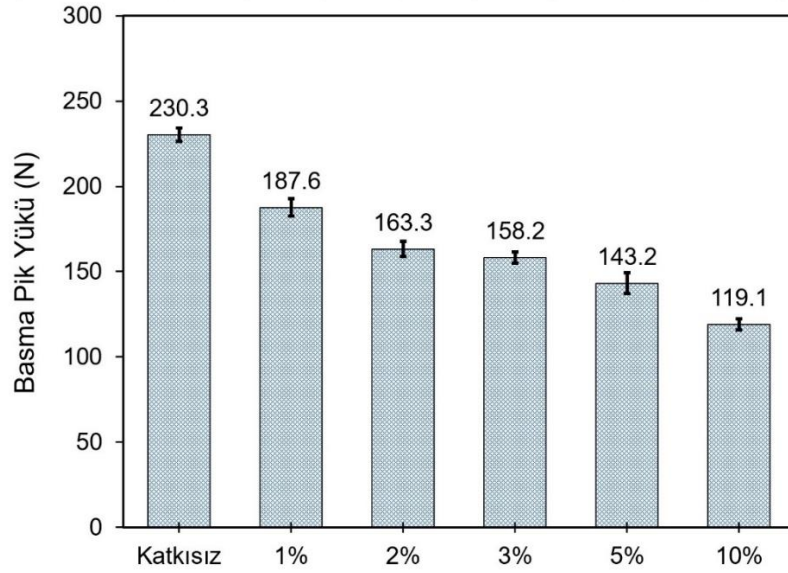
Bu çalışma kapsamında ASTM C365 test standardına göre basma testleri yapılmış ve her numune türü için en az 6 sandviç numunesi test edilmiştir. Test standardına göre, tüm testler için yükleme hızı 0.5 mm/dak. olarak sabit tutulmuş ve tüm sandviç numunelerde PU çekirdeğin hasarını gözlemleyebilmek için 8 mm'lik deformasyon gözönüne alınmıştır. Testlerde, pik basma yükü ve PU çekirdeklerin kırılma hasar modları da incelenmiş ve ilgili ASTM standardı tarafından kabul edilen hasar modu olan düzgün hasar modunun (uniform core failure mode) meydana geldiği gözlenmiştir. Sandviç bir numunenin basma testinden önceki ve sonraki görüntüleri Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4. 7. Sandviç numunenin basma testi öncesi ve sonrası görüntüleri

Şekil 4.7'de, poliüretan çekirdeğin hasarı açıkça görülmektedir. Sandviç numunelerinin Al_2O_3 katkı oranındaki artışla birlikte basma yükünde doğrusal bir azalma gözlenmiştir.

Sandviç numunelerinde ilk hasar başladığında tüm numuneler için pik yükler hesaplanmış ve ortalama değerler dikkate alınarak grafikler çizilmiş ve elde edilen sonuçlar için Denklem 3.1 kullanılarak güven aralığı değerleri hesaplanmış ve bu grafiklere dökülmüştür. Pik basma yükleri için grafikler Şekil 4.8'de görülmektedir. Pik yük değerleri, güven aralığı değerleri ile birlikte Çizelge 4.3'te verilmiştir.

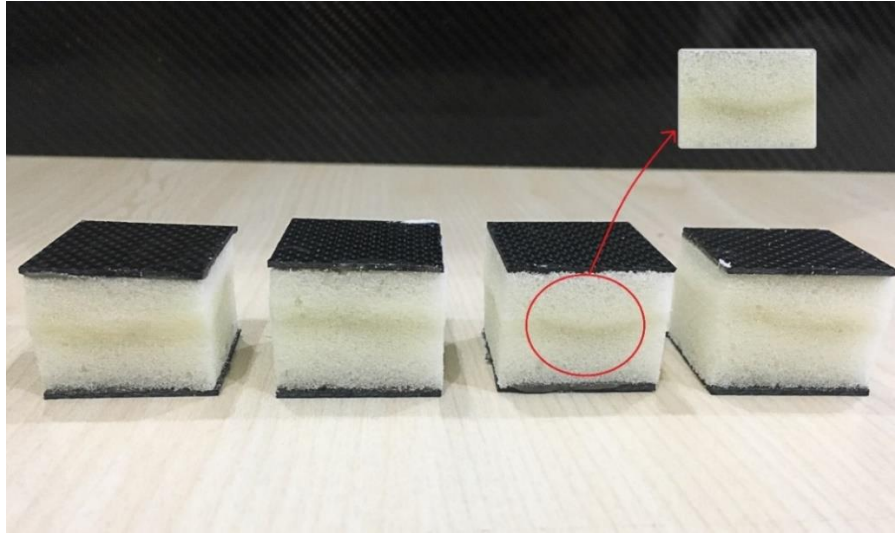


Şekil 4. 8. Sandviç numunelerin ortalama basma yükü değerleri

Çizelge 4. 3. Sandviç numunelerin ortalama basma pik yükü ve güven aralık değerleri

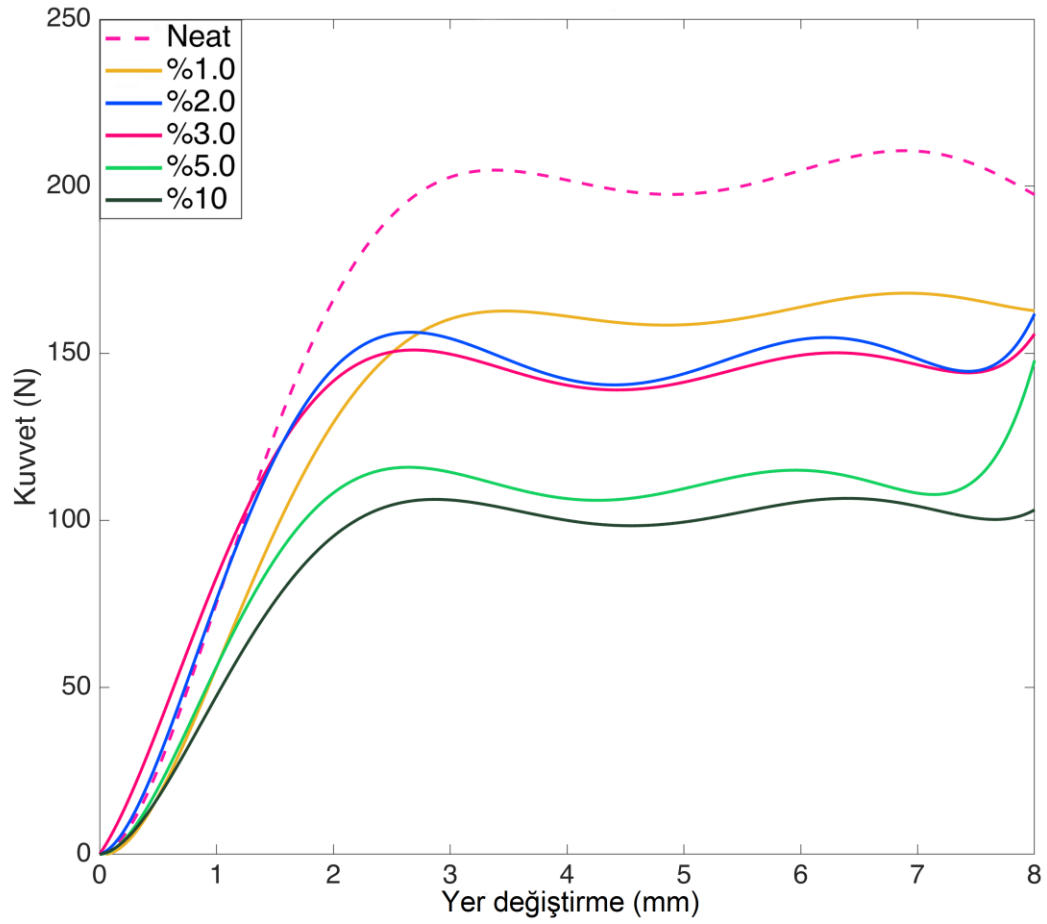
Numune Tipi	Basma Pik Yüğü (N)	Güven Aralığı
Katkısız	230.3	± 3.86
%1	187.6	± 5.03
%2	163.3	± 4.4
%3	158.2	± 3.31
%5	143.2	± 6.11
%10	119.1	± 3.25

Elde edilen test sonuçlarına göre, basma yükleri katkı oranındaki artışla orantılı olarak azalmıştır. Basma deneyinde en iyi performansı katkısız numuneler göstermiş olup, en düşük basma yükünün değeri %10 Al_2O_3 katkılı numunelerde gözlenmiştir. Basma testlerine tabi tutulmuş farklı numunelerdeki PU çekirdek hasarı Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4. 9. Basma yükü altındaki çekirdek hasarı

Şekil 4.9'dan görüleceği üzere, tüm numunelerde düzgün bir çekirdek hasarı olduğu anlaşılmaktadır. Basma testlerine göre çizilen eğrilerden numunelerin basma davranışları belirlenmiştir. Basma testi sonuçları ile ilgili çizilen eğriler Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4. 10. Bası kuvveti-deformasyon eğrileri

Şekil 4.10'da görülebileceği gibi, tüm sandviç numunelerin basma davranışları benzerlik göstermektedir. Grafiklerden anlaşıldığı gibi, ilk pik bası yükü noktasından sonra bası yükünde çok fazla bir değişiklik görülmemiştir. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda farklı partikül katkılı sandviç yapıların basma testlerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Adnan *et al.* (2013), CNT ile güçlendirilmiş PU çekirdek sandviç numunelerinin basma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, %1 ile %3 katkı oranları arasındaki bir artışla basma dayanımının azaldığını gözlenmiştir. Ayrıca, %3 CNT katkılı numuneler en düşük basma dayanımını göstermiştir. Bununla birlikte, %0.5 CNT katkılılarda basma yükünde

bir artış gözlenmiştir. Çalışmada, PU matrisindeki CNT partiküllerinin homojen olmayan karışımı ve topaklanma nedeniyle yüksek katkı oranlarında basma kuvvetinde azalma olduğu görülmüştür.

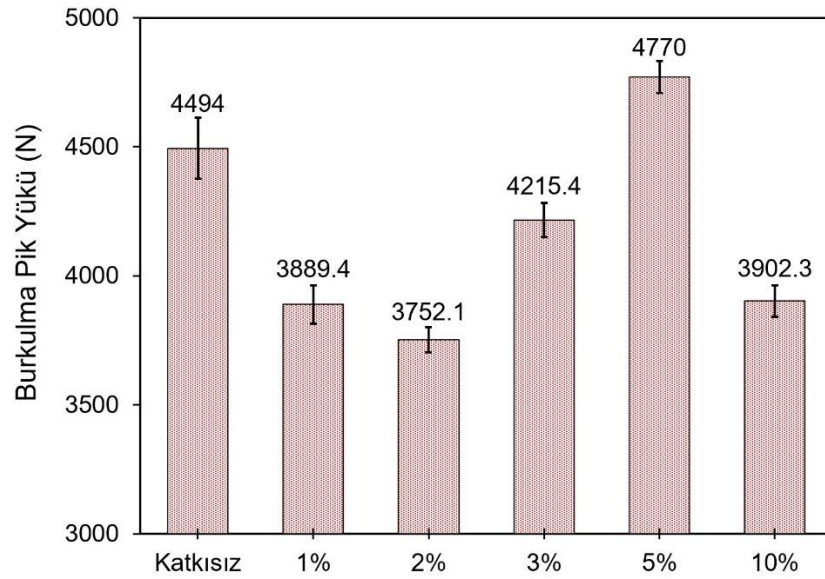
Benzer bir çalışma, Stewart *et al.* (2010) tarafından SiC nanopartiküller takviyeli PU çekirdek sandviç numunelerinin basma davranışını araştırmak amacıyla yapılmıştır. Nanopartikül katkısı ile sandviç numunelerinin kırılma tokluğunun azaldığı gözlenmiştir. Çalışmada, katkı oranı %0 ila 2 arasında değişmiştir. Sandviç numunelerin basma dayanımı %1'lik düşük katkı oranında artmıştır. Ayrıca, sandviç numunelerin basınç dayanımı nanopartiküllerin işlevsizleştirilmesiyle de arttırılmıştır.

Başka bir çalışmada, Wang and Li (2018), SiO₂ ve grafen oksit karışımıyla (SNGO) takviye edilmiş PUF'un basma davranışını araştırmışlardır. Bu takviyelere ek olarak, PUF'ye dimetil metil fosfonat (DMMP) da takviye edilmiştir. DMMP'nin takviye oranındaki artışla birlikte basma dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Basınç dayanımının düşmesine sebep olarak DMMP'nin PUF ile asidik reaksiyonu nedeniyle olduğu değerlendirilmiştir. SNGO'nun yüksek katkılı numunelerin basma kuvvetinde katkısız numunelere kıyasla azalma görülmüştür. Bu azalma yüksek takviye oranlarında daha büyük hücrelerin oluşumu nedeniyle olduğu mülahazası yapılmıştır.

Test sonuçları ve literatür analizlerine göre, PU çekirdek sandviç kompozitlerin basınç dayanımlarının, parçacıkların yüksek takviye oranları ile birlikte azaldığı sonucuna varılabilir. Bundan dolayı, katkısız numunelere kıyasla daha iyi basma özellikleri elde etmek için parçacıklar çok düşük takviye oranlarında PU çekirdeğe takviye edilebilir.

4.4. Burkulma Testi Sonuçları

Burkulma testleri, ASTM C364 test standardına göre gerçekleştirilmiş ve her numune tipi için 6 sandviç numune test edilmiştir. Test düzeneği bölüm 3.2.6'da ayrıntılı olarak verilmiştir. Burkulma testleri sırasında yük hücresinin hızı bütün testler için 1 mm / dak. olarak sabit tutulmuş ve bütün numuneler için hasar anındaki pik yükler hesaplanmıştır. Her numune tipi için bu pik yüklerin ortalama değerleri hesaplanmış ve güven aralığı değerleri kullanılarak burkulma pik yükü grafikleri oluşturulmuştur. Ortalama burkulma pik yükleri için ilgili grafik Şekil 4.11'de görülmektedir. Ayrıca ortalama pik yüklerin değerleri ve güven aralıkları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

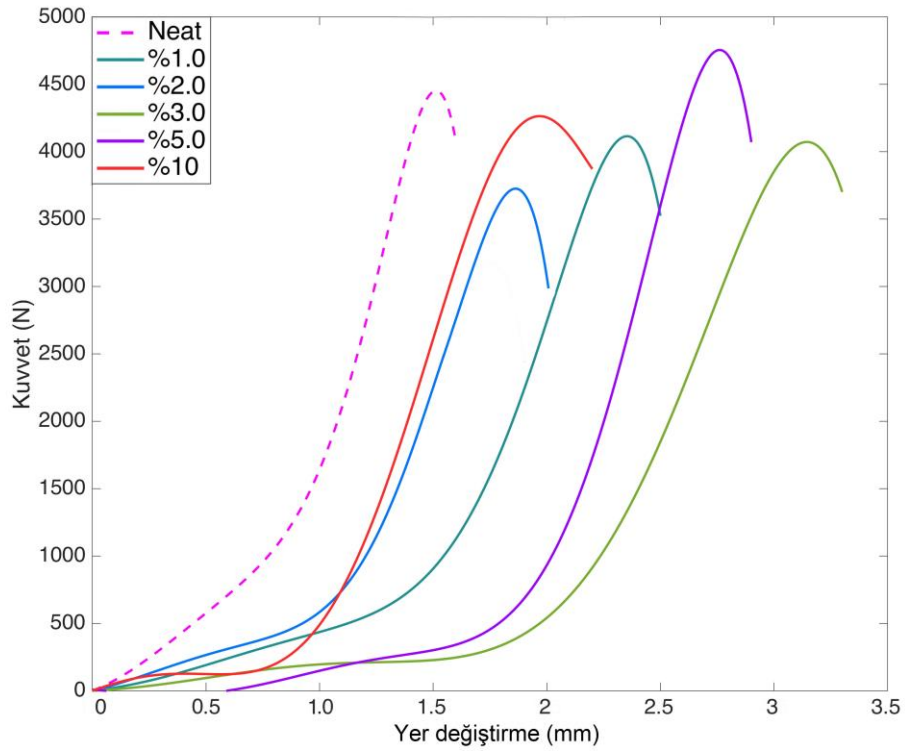


Şekil 4. 11. Sandviç numunelerin ortalama burkulma yükü sonuçları

Çizelge 4. 4. Sandviç numunelerinin ortalama burkulma pik yükü ve güven aralık değerleri

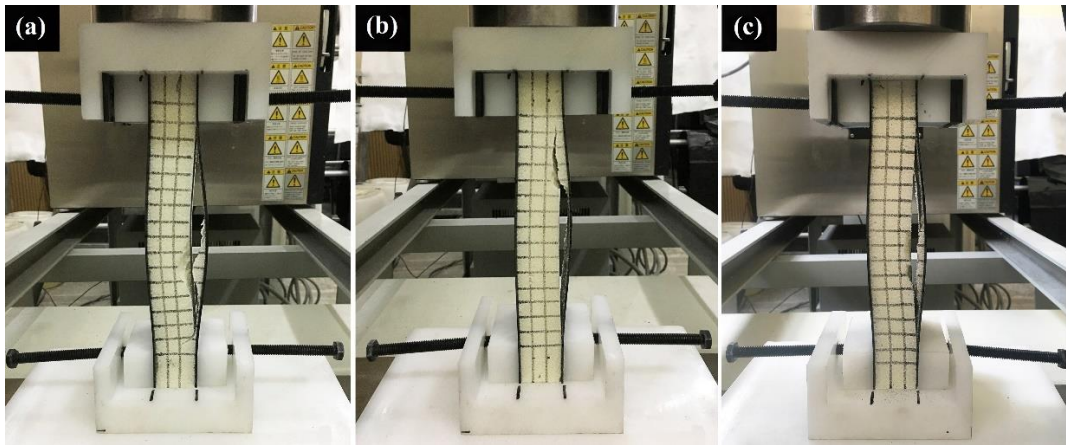
Numune Tipi	Burkulma Pik Yüğü (N)	Güven Aralığı (N C-I)
Katkısız	4494.0	118.25
%1	3889.4	74.63
%2	3752.1	48.49
%3	4215.4	66.94
%5	4770.0	62.21
%10	3902.3	61.63

Ayrıca, test sonuçları kullanılarak burkulma yükleri için eğriler çizilmiştir. Bu eğriler Şekil 4.12'de görülmektedir.

**Şekil 4. 12.** Burkulma testi sonuçlarının ortalama eğrileri

Test sonuçlarından görülebileceği gibi, katkısız numunelere kıyasla %1, %2 ve %3 Al_2O_3 katkılı sandviç numuneleri için azalmışken %5 katkılı numuneler için burkulma pik yükü artmıştır. Ayrıca, %10 Al_2O_3 katkılı numuneler için pik yükünde bir azalma gözlenmiştir. Bu sonuçlar, sandviç numuneler için gözlenen farklı hasar modlarından kaynaklanmıştır.

Literatürde yer alan partikül katkılı PU çekirdekli sandviç kompozitlerde, nanopartikül katkısının ara yüzey yapışma özelliğini iyileştirdiği ve çekirdek / yüzey malzemesi arasında daha iyi bir yapışma durumuna neden olduğu belirtilmiştir (Saha *et al.* 2016). Dolayısıyla, Al_2O_3 katkısının ara yüzeyde iyileştirmelere neden olması beklenmiş ve bu iyileşmenin ancak belirli katkı oranlarında meydana geldiği görülmüştür. Burkulma testi sonucunda katkısız numuneler ve düşük katkı oranına sahip %1 ve %2 Al_2O_3 katkılı numuneler ara yüzey ayrılması (delaminasyon) hasar modunu göstermişlerdir. Bütün bu sandviç numunelerinin yüzey tabakaları ve çekirdek malzemesi arasında zayıf bir yapışma davranışı görülmüştür. Ayrıca, test sonuçlarından %1 ve %2 Al_2O_3 içeren sandviç numunelerin katkısız numunelere kıyasla daha düşük burkulma pik yükü değerleri gösterdiğini görülmüştür. Bu numunelerde çatlak ara yüzeyde oluşmuş ve çatlağın ilerlemesi arayüzey boyunca devam ederek kırılma meydana gelmiştir. Bu tip numuneler için gözlenen tipik delaminasyon hasar modu, Şekil 4.13'te görülmektedir.

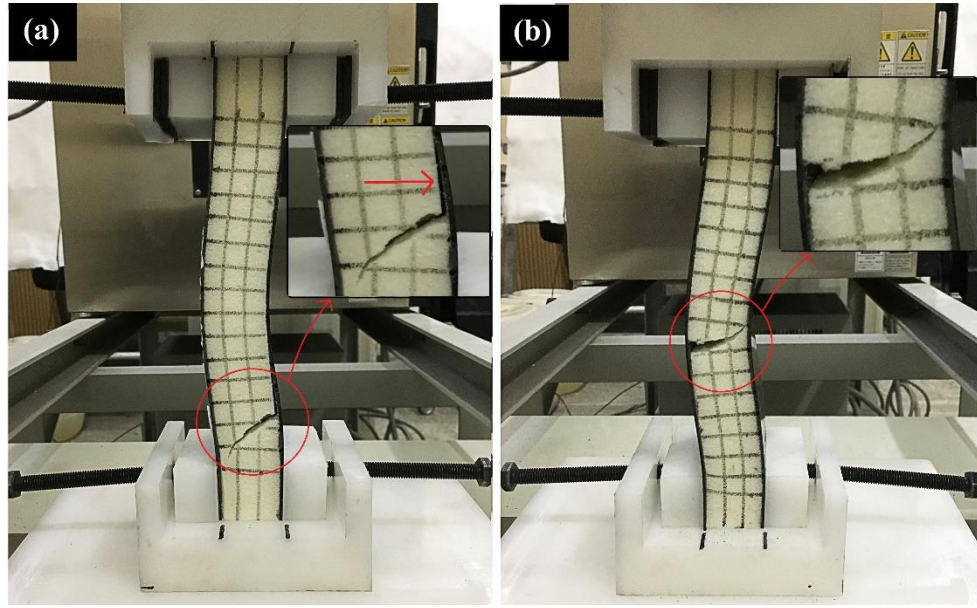


Şekil 4. 13. Düşük katkı oranındaki numunelerin ara yüzey kırılma hasarı, a) katkısız, b) %1 Al_2O_3 katkılı, c) %2 Al_2O_3 katkılı

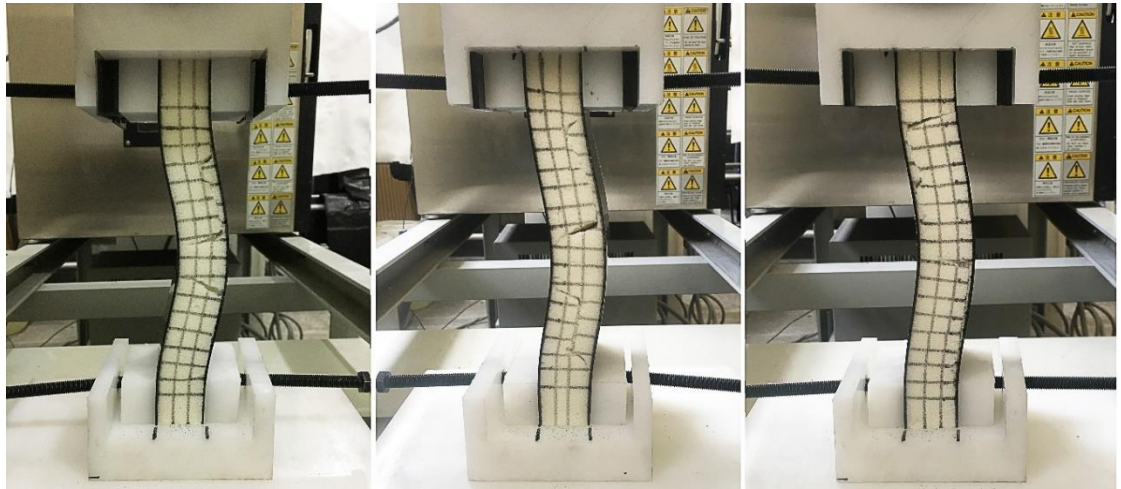
Daha önce bahsedildiği gibi, Al_2O_3 katkı oranındaki artış ile birlikte, yüzey tabakaları ve çekirdek malzemeler arasındaki yapışma özelliği giderek artmıştır. Bundan dolayı, %3 Al_2O_3 katkılı sandviç yapıların ara yüzey dayanımının %1 ve %2 katkılı numunelerden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.14-a'da da görüldüğü gibi, %3 katkılı numunelerde ara yüzey yapışma özelliklerinde gözle görülür bir iyileşme meydana gelmiştir. Fakat bununla birlikte ara yüzeyde bir miktar delaminasyon oluşmuş ve kırılma PU çekirdeklerinin merkezinde meydana gelmiştir. Bu numunelerde artan ara yüzey dayanımı ile birlikte çatlağın delaminasyona sebep olduğu fakat kırılmanın PU çekirdek içinde gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu nedenle, %3 Al_2O_3 katkılı sandviç yapıların ortalama burkulma pik yükü değerlerinde, %1 ve %2 katkılı sandviç yapılara göre bir miktar artış meydana geldiği görülmüştür.

Burkulma testi sonuçlarından, %5 Al_2O_3 katkılı sandviç numunelerin tüm numunelere kıyasla en yüksek pik burkulma yükünü gösterdiği görülmüştür. %5 ve Al_2O_3 katkılı sandviç numunelerin ortalama burkulma pik yüklerinde katkısız numunelere göre %6'lık bir artış meydana gelmiştir. Şekil 4.14-b'de görüldüğü gibi, iyileşmiş bir ara yüzey yapışması nedeniyle ara yüzeyde delaminasyon hasarının oluşmadığı, çatlağın ara yüzeyden başlayarak merkeze doğru ilerlediği ve kırılmanın merkezde meydana geldiği anlaşılmıştır. Bu numunelerde PU çekirdeklerinde kırılma hasar modu gözlenmiştir. %10 Al_2O_3 katkılı sandviç numunelerin ortalama burkulma pik yükünde ise yeniden bir düşüş meydana gelmiştir. Artan ara yüzey dayanımı ile delaminasyon hasarının gözlemlenmediği bu numunelerde birden fazla yerde PU çekirdek kırılma hasar modu gözlenmiştir. %5 katkı oranı ile burkulma yüklerinde oluşan artış trendinin %10 katkılı numunelerde gözlemlenmemesinde bu hasar modunun etkili olduğu düşünülmektedir. %10 Al_2O_3 katkılı numuneler için PU kırılma modu Şekil 4.15'te görülmektedir. Modifiye PU numunelerin mikro görüntülerinde, %10 katkılı numunelerinde homojen olmayan Al_2O_3 dağılımına ve topaklanma belirtilerine rastlanılmıştır (Şekil 4.2). Topaklanma ve heterojen dispersiyon nedeniyle, PU çekirdek içinde birçok yerde çatlak oluşumu ve ilerlemesinin yaşandığı ve farklı noktalardaki kırılmaların meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca bu konudaki

literatür araştırmalara bakıldığında, artan katkı oranının çekirdeğin gözenekliliğinde (porozite) artışa sebep olduğu ve bu durumun pik burkulma yüklerinde düşüşe sebebiyet verebileceği rapor edilmiştir (Li *et al.* 2018). %10 katkı oranında elde edilen sonuçlar için topaklanma ve heterojen dağılımın sebep olduğu olumsuzlukların yanı sıra bu fenomenin neden olduğu bir düşüşün meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 4. 14. PU çekirdek kırılma hasarları, a) %3 Al_2O_3 katkılı, b) %5 Al_2O_3 katkılı



Şekil 4. 15. %10 katkılı numunelerin PU çekirdek kırılma hasarı

Sandviç numunelerin burkulma hasar modları açısından literatürdeki bir başka çalışmada da benzer sonuçlar gözlenmiştir. Birman *et al.* (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, analitik yaklaşım kullanılarak alüminyum partiküllerle güçlendirilmiş PU çekirdekli sandviç numunelerin hasar modlarını incelenmiştir. Alüminyum partikül katkısının yüzey tabakalarına mekanik stabilite sağladığı ve ara yüzey özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Bundan dolayı, katkısız numunelere kıyasla yüzey tabakalarının buruşturmasında (wrinkling) iyileşme ile birlikte burkulma yükünde artış gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada, Saha *et al.* (2006), sandviç numunenin yüzey tabakaları ve TiO_2 katkılı PU çekirdek arasındaki ara yüzey kırılmasını soyma (peeling) testi ile incelemiştir. Test sonuçlarından TiO_2 ile güçlendirilmiş sandviç numunelerin daha iyi ara yüzey özellikleri sergilediği görülmüştür. Katkısız numunelere kıyasla küçük boyutlu TiO_2 parçacıkları ile takviye edilmiş sandviç numunelerin ara yüzey özelliklerinde neredeyse %50 iyileşme gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, partikül takviyesinin sandviç malzemede yüzey tabakaları ve PU çekirdek arasındaki ara yüzey yapışmasını iyileştirdiğini göstermiştir. Tez çalışması kapsamında ortaya çıkan sonuçlar, sandviç kompozitlerin burkulma analizi için literatürden elde edilen sonuçlar ile uyumluluk göstermiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Al_2O_3 seramik tozu katkılı poliüretan çekirdekli sandviç kompozitlerin burkulma, basma ve titreşim davranışları incelenmiştir. Al_2O_3 katkılı sandviç numunelerin burkulma pik yükü ve sönüm oranlarında önemli gelişmeler gözlenmiştir. Optik mikroskopi analizleri, Al_2O_3 partiküllerinin PU matris içindeki dağılımını ve polimer zincir üzerindeki etkilerini anlamakta yardımcı olmuştur. Bu tez kapsamında elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibidir;

1. PU numunelerin mikro görüntüleri incelediğinde, Al_2O_3 katkılı sandviç numunelerde hücre yapısının bozulduğunu görülmüştür. Katkı oranının artması ile zayıf hücre yapısının daha çok gözlemlendiği anlaşılmıştır. Hücre yapısındaki bu hasar, katkılı sandviç numunelerin düşük basma performansına neden olan sebeplerden biri olduğu düşünülmektedir. Ayrıca %10 Al_2O_3 katkısının heterojen dispersiyon ve topaklanmaya neden olduğu gözlemlenmiştir.
2. %2 Al_2O_3 katkılı sandviç numunelerin katkısız numunelere kıyasla %38,3'lük bir artış ile sönüm oranı açısından en iyi performansı gösterdiği anlaşılmıştır.
3. Sandviç numunelerinin doğal frekansı katkı oranının artması ile azalmıştır. Doğal frekanstaki düşüş ihmal edilebilir olsa da, katkısız sandviç numunelerde en yüksek doğal frekans değerleri gözlemlenmiştir. Bu düşüşün, PU çekirdeğin rijitliğinde meydana gelen düşüş nedeniyle ortaya çıktığı anlaşılmıştır.
4. Basma testlerinde pik yükün katkı oranının artması ile doğrusal olarak azaldığı gözlenmiştir. Bu düşüşün, Al_2O_3 partiküllerinin heterojen dağılımı ve topaklanmasının yanı sıra artan katkı miktarlarının sebep olduğu zayıf hücre yapısı ile PU çekirdeğin rijitliğinde meydana gelen düşüş nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir.

5. Burkulma testi sonuçlarında, sandviç numunelerin üç farklı tipte hasar modu gösterdiği görülmüştür. Katkısız ve düşük Al_2O_3 takviyesine sahip sandviç numuneleri yüzey tabakalarının delaminasyon hasar modunu göstermiştir. Katkı oranındaki artış ile ara yüzey yapışmanın iyileştiğini gözlenmiştir. Bundan dolayı, Al_2O_3 'ün daha yüksek katkı oranına sahip olan sandviç numunelerinde, daha iyi ara yüzey yapışması ve PU çekirdek hasar modu ortaya çıkmıştır. En iyi burkulma performansı, %5 Al_2O_3 katkılı sandviç numunelerinde gözlenmiş ve tüm numunelere kıyasla en yüksek pik yükleri elde edilmiştir.
6. Çalışma sonuçları incelendiğinde, %1 ile %10 arasında değişen katkı oranlarının titreşim testleri açısından verimli bir tercih olduğu anlaşılırken, basma ve burkulma gibi mekanik özellikler açısından genel olarak düşük performans ortaya koyduğu anlaşılmıştır. Modal özelliklerde elde edilen iyileştirmeler, çalışma açısından önemli bir nokta olarak değerlendirilmekle birlikte, mekanik özelliklerdeki performans kayıpları ve iyileştirmeler için %0 ile %1 gibi daha küçük bir aralıktaki katkılama oranlarının denenmesi ileri çalışmalar için önem taşımaktadır. Bununla birlikte, topaklanma ve heterojen dağılım gibi faktörlerin önüne geçilebilmesi için partiküllerin katkılama işlemi öncesinde aseton vb. solventler ile ayrıştırılması da ileri çalışmalar açısından önemli bir sonuç olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdi, B., Azwan, S., Abdullah, M.R., Ayob, A., Yahya, Y., and Xin, Li., 2014. Flatwise compression and flexural behavior of foam core and polymer pin-reinforced foam core composite sandwich panels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 88, 138-144.
- Abdi, B., Azwan, S., Abdullah, M.R., Ayob, A., and Yahya, Y., 2016. Comparison of foam core sandwich panel and through-thickness polymer pin-reinforced foam core sandwich panel subject to indentation and flatwise compression loadings. *Polymer Composites*, 37(2), 612-619.
- Abidin, M.H.Z., Mohamad, M.A.H., Zaidi, A.M.A., and Mat V.A.V., 2013. Experimental study on ballistic resistance of sandwich panel protection structure with kenaf foam as a core material against small arm bullet. *Applied Mechanics and Materials*, 315, 612-615.
- Adams, A., 2013. Aluminum Oxide, Al_2O_3 Ceramic Properties. Accuratus, <https://accuratus.com/alumox.html> (13.09.2018)
- 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.
- Amancio-Filho, S.T., and Dos Santos, J.F, 2009. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: recent developments and trends. *Polymer Engineering and Science*, 49(8), 1461-1476.
- Ameri, E., Sadeghi, M., Zarei, N., and Pournaghshband, A., 2015. Enhancement of the gas separation properties of polyurethane membranes by alumina nanoparticles. *Journal of Membrane Science*, 479, 11-19.
- Aydin, M.R., and Gundogdu, O., 2018. Vibration analysis of honeycomb sandwich composites filled with polyurethane foam by Taguchi Method. *STEEL AND COMPOSITE STRUCTURES*, 28(4), 461-470.
- Aziz, M., Halim, Z., and Othman, M., 2018. Effect of different concentration of sodium hydroxide [NaOH] on kenaf sandwich structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 290.
- Baba, B.O., 2012. Free vibration analysis of curved sandwich beams with face/core debond using theory and experiment. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 19(5), 350-359.
- Baba, B. O, and Thoppul, S., 2009. Experimental evaluation of the vibration behavior of flat and curved sandwich composite beams with face/core debond. *Composite Structures*, 91, 110-119.
- Barbieri, N., Barbieri, R., and Winikes, L.C., 2010. Parameters estimation of sandwich beam model with rigid polyurethane foam core. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, 406-415.

- BASF, 2018. <http://www.polyurethanes.basf.com/pu/solutions/en/system/startpage/index> (11.10.2018)
- Birman, V., Chandrashekhara, K., Hopkins, M.S., & Volz, J.S., 2013. Effects of nanoparticle impregnation of polyurethane foam core on the performance of sandwich beams. *Composites Part B: Engineering*, 46, 234-246.
- Boccaccio, A., Casavola, C., Lamberti, L., and Pappalettere, C., 2013. Structural response of polyethylene foam-based sandwich panels subjected to edgewise compression. *Materials*, 6, 4545-4564.
- Carradò, A., Sokolova, O., Ziegmann, G., and Palkowski H., 2010. Press joining rolling process for hybrid systems. *Key Engineering Materials*, 425, 271-281.
- Castro, O., Silva, J.M., Devezas, T., Silva, A., and Gil, L., 2010. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials and Design*, 31, 425-432.
- Çelik, E., 2002. Preparation and characterization of Al_2O_3 - TiO_2 powders by chemical synthesis for plasma. *Journal of Materials Processing Technology*, 128, 205-209.
- Chen, C.H., Wang, J.J., and Yen, F.S., 2010. Preparation and tribological properties of polyurethane/ α -aluminum oxide hybrid films. *Thin Solid Films*, 518, 7515-7518.
- Chen, C., Li, Y., Gu, Y., Li, M., and Zhang, Z., 2017. Effect of MWCNTs added by electrostatic flocking method on adhesion of carbon fiber prepreg/Nomex honeycomb sandwich composites. *Materials and Design*, 127, 15-21.
- Correia, J.R., Garrido, M., Gonilha, J.A., Branco, F.A., and Reis, L.G., 2012. GFRP sandwich panels with PU foam and PP honeycomb cores for civil engineering structural applications: Effects of introducing strengthening ribs. *International Journal of Structural Integrity*, 3, 127-147.
- Davies, J.M., and Hakmi, R., 1991. Postbuckling behaviour of foam-filled, thin-walled steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 20, 75-83.
- Frank, D., Romanoff, J., and Remes, H., 2013. Fatigue strength assessment of laser stake-welded web-core steel sandwich panels. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 36, 724-737.
- Gianchandani, P.K., Casalegno, V., Salvo, M., Bianchi, G., Ortona, A., and Ferraris, M., 2018. SiC foam sandwich structures obtained by Mo-wrap joining. *Materials Letters*, 221, 240-243.
- Grafen Ankara, 2019. <https://www.grafen.com.tr/product.php?id=131> (06.03.2019)
- Harhash, M., Carradò, A., and 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.
- Herrmann, A.S., Zahlen, P.C., and Zuardy, I., 2005. Sandwich structures technology in commercial aviation. In *Sandwich structures 7: Advancing with sandwich structures and materials*, 13-26.
- Hosur, M.V., Mohammed, A.A., Zainuddin, S., and Jeelani, S., 2008. Impact performance of nanophased foam core sandwich composites. *Materials Science and Engineering: A*, 498(1-2), 100-109.
- Jamil, A., Guan, Z.W., and Cantwell, W.J., 2017. The static and dynamic response of CFRP tube reinforced polyurethane. *Composite Structures*, 161, 85-92.

- Jia, L.X., Sun, Y.J., Yang, X.Y., and Wang, R., 2012. Influence of reinforcing materials on the properties of woven spacer fabric composite sandwich panels. In *Advanced Materials Research*, 418, 165-168.
- Jin, M., Hu, Y., and Wang, B., 2015. Compressive and bending behaviours of wood-based two-dimensional lattice truss core sandwich structures. *Composite Structures*, 124, 337-344.
- Kausar, A., 2018. Polyurethane composite foams in high-performance applications: A review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(4), 346-369.
- Kyocera Global, 2018. Alumina (Aluminum Oxide, Al_2O_3), <https://global.kyocera.com/prdct/fc/list/material/alumina/alumina.html> (05.01.2019)
- Lee, J.H., Kang, S.H., Ha, Y.J., and 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(1), 21.
- Li, Q., Wu, D., Chen, X., Liu, L., Yu, Y., Gao, W., 2018. Nonlinear vibration and dynamic buckling analyses of sandwich functionally graded porous plate with graphene platelet reinforcement resting on Winkler–Pasternak elastic foundation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 148, 596-610.
- Liu, J., Liu, J., Mei, J., and 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.
- Mahato, K. K., Dutta, K., and Ray, B. C., 2019. Assessment of mechanical, thermal and morphological behavior of nano- Al_2O_3 embedded glass fiber/epoxy composites at in-situ elevated temperatures. *Composites Part B*, 166, 688-700.
- Mahfuz, H., Uddin, M. F., Rangari, V. K., Saha, M. C., Zainuddin, S., and Jeelani, S., 2005. High strain rate response of sandwich composites with nanophased cores. *Applied Composite Materials*, 12(3-4), 193-211.
- Dhar Malingam, S., Jumaat, F. A., Ng, L. F., Subramaniam, K., and Ab Ghani, A. F., 2018. Tensile and impact properties of cost-effective hybrid fiber metal laminate sandwich structures. *Advances in Polymer Technology*, 37(7), 2385-2393.
- Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M.B., and Papapostolou, D.P., 2005. On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: experimental. *Composite Structures*, 71(2), 246-257.
- Manujesh, B.J., Rao, V., and Aan, M.S., 2014. Moisture absorption and mechanical degradation studies of polyurethane foam cored E-glass-reinforced vinyl-ester sandwich composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(5), 479-492.
- Mathieson, H., and Fam, A., 2014. Axial loading tests and simplified modeling of sandwich panels with GFRP skins and soft core at various slenderness ratios. *Journal of Composites for Construction*, 19(2), 04014040.
- Mirzapour, A., Beheshty, M. H., and Vafayan, M., 2005. The response of sandwich panels with rigid polyurethane foam cores under flexural loading. *Iranian polymer journal*, 14(12), 1082-1088.

- Mohammadi, M.S., and 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*, 122, 165-172.
- Mohseni, E., Kazemi, M.J., Koushkbaghi, M., Zehtab, B., and Behforouz, B., 2019. Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nano-alumina. *Construction and Building Materials*, 209, 532-540.
- Mousa, S., Scheirer, N., and 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.
- Nacas, A.M., Vidotti, S.E., Chinellato, A.C., and Santos, D.D., 2018. The role of poliol reaction catalysts in the cure kinetics and mechanical behavior of polyurethane adhesives. *The Journal of Adhesion*, 94(11), 880-892.
- Nasirzadeh, R., and Sabet, A.R., 2014. Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 63, 129-139.
- Nayak, R. K., Mahato, K. K., Routara, B. C., and Ray, B. C., 2016. Evaluation of mechanical properties of Al_2O_3 and TiO_2 nano filled enhanced glass fiber reinforced polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(47).
- Prociak, A., Malewska, E., Kurańska, M., Bąk, S., and Budny, P., 2018. Flexible polyurethane foams synthesized with palm oil-based bio-poliols obtained with the use of different oxirane ring opener. *Industrial crops and products*, 115, 69-77.
- Reyno, T., Marsden, C., and Wowk, D., 2018. Surface damage evaluation of honeycomb sandwich aircraft panels using 3D scanning technology. *NDT and E International*, 97, 11-19.
- Rostamiyan, Y., and Norouzi, H., 2016. Flatwise compression strength and energy absorption of polyurethane foam-filled lattice core sandwich panels. *Strength of Materials*, 48(6), 801-810.
- Scalici, T., Fiore, V., and 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.
- 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.
- Shams, A., Stark, A., Hoogen, F., Hegger, J., and Schneider, H., 2015. Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane. *Composite Structures*, 121, 271-279.
- Sharaf, T., Shawkat, W., and Fam, A., 2010. Structural performance of sandwich wall panels with different foam core densities in one-way bending. *Journal of composite materials*, 44(19), 2249-2263.
- Sharma, R.S., and Raghupathy, V.P., 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(21), 3226-3236.

- Sharma, S.C., Murthy, H.N., and Krishna, M., 2004. Interfacial studies in fatigue behavior of polyurethane sandwich structures. *Journal of reinforced plastics and composites*, 23(8), 893-903.
- Sharma, S.C., Murthy, H.N., and Krishna, M., 2004. Effect of foam density and skin material on the damping behavior of polyurethane sandwich structures. *Journal of reinforced plastics and composites*, 23(12), 1259-1266.
- Sharma, S.C., Krishna, M., and Murthy, H.N., 2004. Buckling response of stitched polyurethane foam composite sandwich structures. *Journal of reinforced Plastics and Composites*, 23(12), 1267-1277.
- Song, Z.W., Sun, H.L., Nie, B.X., Yang, Z.J., and Lv, Z., 2015. The preparation and research of alumina powder by the electrical discharge machining method. *Materials Research Innovations*, 19(sup1), S1-320.
- Song, J.G., Wang, R.H., Wang, X.Q., Xu, M.H., and Ma, M.L., 2017. Preparation of superfine alumina powders via hydrothermal method. In *Key Engineering Materials*, 726, 184-188.
- Stewart, J.K., Mahfuz, H., and Carlsson, L.A., 2010. Enhancing mechanical and fracture properties of sandwich composites using nanoparticle reinforcement. *Journal of materials science*, 45(13), 3490-3496.
- Suresh, E., and Padmanabhan, K., 2018. Prediction of flexural behaviour of rigid foam sandwich composites through Mode 1, Mode 2 and Mixed Mode failures. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12091-12097.
- Suzuki, T., and Mahfuz, H., 2018. Fatigue characterization of GFRP and composite sandwich panels under random ocean current loadings. *International Journal of Fatigue*, 111, 124-133.
- Uday, C., Varma, C.T., Varma, B.K., Ramya, M., and Padmanabhan, K., 2014. The influence of rigid foam density on the flexural properties of glass fabric/epoxy-polyurethane foam sandwich composites. *International Journal of ChemTech Research*, 6(6), 3314-3317.
- Uzal, A., Sonmez, F.O., Oz, F.E., Cinar, K., and Ersoy, N., 2018. A composite sandwich plate with a novel core design. *Composite Structures*, 193, 198-211.
- Vaidya, A.S., Uddin, N., and Vaidya, U.K., 2009. Vibration response of 3-D space accessible sandwich composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(13), 1587-1599.
- Vinson, J.R., 2005. Sandwich structures: past, present, and future. In *Sandwich structures 7: advancing with sandwich structures and materials*. Springer, Dordrecht, 3-12.
- Wang, L., 2017. Preparation and sintering behaviour of alumina powder by ammonia precipitation method. In *MATEC Web of Conferences*, 109, 02002.
- Wang, J., Waas, A.M., and Wang, H., 2013. Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. *Composite Structures*, 96, 298-311.
- Wang, Z., and Li, X., 2018. Mechanical properties and flame retardancy of rigid polyurethane foams containing SiO₂ nanospheres/graphene oxide hybrid and dimethyl methylphosphonate. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(9), 884-892.

- Xiong, J., Ma, L., Pan, S., Wu, L., Papadopoulos, J., and Vaziri, A., 2012. Shear and bending performance of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores. *Acta Materialia*, 60(4), 1455-1466.
- Xiong, J., Vaziri, A., Ghosh, R., Hu, H., Ma, L., and 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.
- Yadav, S.M., Arun, K.V., Basavarajappa, S., and Kumar, S., 2011. Collapse mechanism of foam cored sandwich structures under compressive load. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50(13), 1351-1356.
- Yan, C., Song, X., Jing, C., and Feng, S., 2018. Effects of epoxy resin liquidity on the mechanical properties of aluminum foam sandwich. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(6), 673-691.
- Zhang, X., Li, P.Y., Guo, X.D., and Yan, T., 2016. Preparation of alumina powders through pyrocatechol, resorcinol mediated sol-gel method. In *Materials Science Forum*, 850, 742-747.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Pakistan'ın Haripur şehrinde doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Pakistan'ın Abbottabad şehrinde tamamladı. 2011 yılında KPK University of Engineering and Technology, Peshawar Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 2015 yılında bu bölümden mezun oldu. 2016 yılında Atatürk Üniversitesinde bir sene Türkçe hazırlık okuduktan sonra 2017 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.