

**KÖPÜK DOLGULU BAL PETEĞİ SANDVIÇ  
KOMPOZİT YAPILARIN TİTREŞİM  
ANALİZİ**

**Muhammet Raci AYDIN**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Doç. Dr. Ömer GÜNDOĞDU  
2013**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KÖPÜK DOLGULU BAL PETEĞİ SANDVIÇ  
KOMPOZİT YAPILARIN TİTREŞİM ANALİZİ**

**Muhammet Raci AYDIN**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ERZURUM  
2013**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

KÖPÜK DOLGULU BAL PETEĞİ SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILARIN TİTREŞİM  
ANALİZİ

Doç. Dr. Ömer GÜNDOĞDU danışmanlığında, Muhammet Raci AYDIN tarafından hazırlanan bu çalışma .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği /oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan:Doç.Dr. Ömer GÜNDOĞDU

İmza :

Üye : Yrd.Doç.Dr. Gürkan ŞAKAR

İmza :

Üye : Yrd.Doç.Dr. Habib UYSAL

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU  
Enstitü Müdürü

**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

### KÖPÜK DOLGULU BAL PETEĞİ SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILARIN TİTREŞİM ANALİZİ

Muhammet Raci AYDIN

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Ana bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

Mühendislik uygulamalarında hafif yapıların kullanımı oldukça önemlidir. İki yüzey arasına çekirdek malzeme olarak yüksek sönümlenme kabiliyetine sahip farklı bir malzeme yerleştirilerek sandviç yapılar oluşturulabilir. Bu yapıların ağırlık/dayanım oranı genellikle diğer katı malzemelerden oldukça yüksektir. Sandviç yapıların bu özelliklerinden dolayı, birçok alanda olduğu gibi ulaşım araçlarında da kullanımı giderek artmaktadır. Bu çalışmada, farklı plaka ve çekirdek kalınlıklarıyla oluşturulan bal peteği sandviç yapılara poliüretan köpük dolgusu yapılarak, ankastre-serbest sınır şartında doğal frekansları ve sönüm oranları belirlenmiştir. Bu sandviç yapıyı oluşturan yüzey levha kalınlıklarının ve çekirdek malzemesi kalınlığının yanı sıra poliüretan köpüğün titreşim karakteristiklerine olan etkileri incelenmiştir. Nümerik analizler sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm üreten ANSYS paket programıyla yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlarla, nümerik olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

**2013, 55 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Bal peteği sandviç yapı, poliüretan köpük, titreşim, sönüm

## **ABSTRACT**

MS Thesis

### **VIBRATION ANALYSIS OF FOAM FILLED HONEYCOMB COMPOSITE SANDWICH STRUCTURE**

Muhammet Raci AYDIN

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

Supervisor: Assc. Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

In engineering applications, the use of lightweight structures is quite important. As the core material between two surfaces is capable of high damping, sandwich structures can be created by placing a different material. Weight to strength ratio of these structures is generally much higher than other solid materials. Because of these properties, use of sandwich structures, in transportation vehicles is increasing. In this study, polyurethane foam is filled to honeycomb sandwich structures produced at different plate and core thicknesses. Natural frequency and damping ratios are determined for fixed-free boundary conditions. Effect of surface layer thickness, core material thickness and the polyurethane foam to vibration characteristics is investigated. Numerical solutions are realized on ANSYS that uses finite element method for its solutions. Results obtained from experiments are compared with the ones from numerical results.

**2013, 55 pages**

**Keywords:** Honeycomb sandwich structure, polyurethane foam, vibration, damping

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve tez çalışmalarım boyunca her konuda yardım ve desteklerini benden esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Ömer GÜNDOĞDU, Sayın Doç. Dr. Mustafa YAMAN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Gürkan ŞAKAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Abdullah Tahir ŐENSOY, Arş. Gör. Recep ÇATAR, Arş. Gör. Rıza POLAT ve Mustafa Sabri AYDIN'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Muhammet Raci AYDIN

Eylül, 2013

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Kompozit Malzemeler.....	3
1.1.1. Kompozit malzemelerin olumlu yönleri.....	4
1.1.2. Kompozit malzemelerin olumsuz yönleri.....	5
1.1.3. Kompozit malzemelerin kullanım sebepleri.....	6
1.1.4. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	6
1.1.5. Kompozit malzemelerin kullanım alanları.....	9
1.2. Poliüretan Köpük.....	11
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>13</b>
2.1. Sandviç Yapılar.....	13
2.1.1. Sandviç yapıların avantajları.....	15
2.1.2. Sandviç yapıların dezavantajları.....	15
2.1.3. Sandviç kompozit yapıların uygulama alanları.....	16
2.2. Bal Peteği Çekirdek Malzemelerin Üretim Metotları.....	16
2.2.1. Uzatarak şekil verme metodu.....	17
2.2.2. Kıvrılarak şekil verme metodu.....	17
2.3. Bal Peteği Sandviç Yapıların Üretim Metotları.....	18
2.3.1. Sıcak basınç metoduyla şekil verme.....	19
2.3.2. Vakum metoduyla şekil verme.....	20
2.3.3. Kalıp metoduyla şekil verme.....	21
2.4. Alüminyum Bal Peteği Panellerin Genel Özellikleri.....	22
2.5. Sandviç Petek Yapıların Temel Kullanım Alanları.....	23
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>28</b>

3.1. Materyal .....	28
3.2. Yöntem .....	38
3.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi .....	38
3.2.2. Sonlu elemanlar yönteminin uygulama alanları .....	40
3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi analizleri .....	40
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>	<b>46</b>
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>53</b>
KAYNAKLAR .....	54
ÖZGEÇMİŞ .....	56

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alan
b	Genişlik
E	Elastisite Modülü
h	Yükseklik
I	Kütle Atalet Momenti
l	Uzunluk
m	Kütle
n	Periyot Sayısı
T	Periyot
t	Zaman
V	Hacim
x	Genlik
$\omega$	Doğal Frekans
$\rho$	Yoğunluk
$\nu$	Poisson Oranı
$\delta$	Logaritmik Azalma
$\zeta$	Sönüm Oranı
°C	Santigrad Derece

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 1.1.</b>	Tipik bir kompozit malzeme modeli .....	3
<b>Şekil 1.2.</b>	Takviye türlerine göre birkaç kompozit malzeme grubu .....	7
<b>Şekil 1.3.</b>	Farklı yönlerde elyaf takviye edilmiş kompozit yapılardan bazı örnekler.....	7
<b>Şekil 1.4.</b>	Kompozit malzemelerin bazı kullanım alanları .....	10
<b>Şekil 1.5.</b>	Kompozit yapıların kullanım alanlarına birkaç örnek.....	10
<b>Şekil 1.6.</b>	Poliüretan köpüğün oluşum safhaları .....	12
<b>Şekil 2.1.</b>	Tipik bir sandviç yapının görünüşü.....	13
<b>Şekil 2.2.</b>	Yaygın olarak kullanılan farklı bal peteği çekirdek tipleri .....	14
<b>Şekil 2.3.</b>	Bal peteği sandviç yapı .....	14
<b>Şekil 2.4.</b>	Deneylerde kullanılan ve sonlu elemanlar modeli oluşturulan petek yapının geometrisi .....	16
<b>Şekil 2.5.</b>	Uzatarak şekil verme metodu.....	17
<b>Şekil 2.6.</b>	Kıvrılarak ile şekil verme metodu.....	17
<b>Şekil 2.7.</b>	Farklı şekillerde imal edilmiş petek yapılar .....	18
<b>Şekil 2.8.</b>	Sıcak basınç metodu ile sandviç kompozit üretimi.....	19
<b>Şekil 2.9.</b>	Sıcak basınç metodu ile üretilmiş sandviç yapı örneği .....	19
<b>Şekil 2.10.</b>	Vakum metoduyla sandviç yapıların üretimi .....	20
<b>Şekil 2.11.</b>	Vakum metoduyla üretilmiş sandviç yapı örneği .....	20
<b>Şekil 2.12.</b>	Kalıp metoduyla sandviç kompozit yapıların üretimi .....	21
<b>Şekil 2.13.</b>	Kalıp metoduyla üretilmiş bir sandviç kompozit yapı .....	21
<b>Şekil 2.14.</b>	Sandviç kompozit yapıların bazı kullanım alanları.....	22
<b>Şekil 2.15.</b>	Alüminyum bal peteği sandviç yapılar .....	22
<b>Şekil 2.16.</b>	Yolcu uçağının dışyapısında kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri.....	24
<b>Şekil 2.17.</b>	Yolcu uçağının içyapısında kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri.....	24
<b>Şekil 2.18.</b>	Bir Holikopterde kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri.....	25
<b>Şekil 2.19.</b>	Türbin kanatlarında kompozit malzeme kullanımı .....	25
<b>Şekil 2.20.</b>	Prefabrik yapılarda sandviç kompozit malzeme kullanımı .....	26

<b>Şekil 2.21.</b>	Tren vagonlarında kompozit sandviç kullanılan bölgeler.....	26
<b>Şekil 2.22.</b>	Teknelerde kompozit sandviç kullanım bölgeleri.....	27
<b>Şekil 2.23.</b>	Yeni nesil bir yolcu otobüsünde kompozit malzeme kullanım bölgeleri.....	27
<b>Şekil 3.1.</b>	Poliüretan köpük ile doldurulacak içi boş alüminyum bal peteği çekirdeklerin şekil değişikliğine uğramaması için hazırlanmış kalıp .....	28
<b>Şekil 3.2.</b>	Deneylerde kullanılan içi boş ve içi poliüretan köpük ile doldurulmuş alüminyum bal peteği çekirdekler .....	29
<b>Şekil 3.3.</b>	Deneylerde kullanılmak üzere üretilen bal peteği sandviç numuneler .....	30
<b>Şekil 3.4.</b>	Serbest titreşim yapan bir sistem için genlik-zaman grafiği .....	31
<b>Şekil 3.5.</b>	Half-power bandwidth metodu .....	32
<b>Şekil 3.6.</b>	PULSE ölçüm sisteminden alınan rezonans frekansını ve sönüm oranını gösteren FRF grafiği .....	33
<b>Şekil 3.7.</b>	Deneyde kullanılan poliüretan köpüğün sönüm davranışı .....	34
<b>Şekil 3.8.</b>	Deney düzeneği .....	37
<b>Şekil 3.9.</b>	Etki ile titreşim ölçüm sistemlerinin genel çalışma prensibi.....	37
<b>Şekil 3.10.</b>	Freze tezgahının sonlu elemanlar ile modellenmesi .....	39
<b>Şekil 3.11.</b>	Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı vasıtasıyla bulunması.....	39
<b>Şekil 3.12.</b>	Solidworks programında çizilip ANSYS Workbenche alınan sandviç yapı.....	41
<b>Şekil 3.13.</b>	İçi poliüretan köpük doldurulan bal peteği çekirdek.....	42
<b>Şekil 3.14.</b>	Bal peteği çekirdek ve poliüretan köpüğün tam olarak birleştirilmesi.....	42
<b>Şekil 3.15.</b>	Programla tanımlanan petek ile yüzey levhalarının birleşme biçimleri.....	43
<b>Şekil 3.16.</b>	Sandviç kompozit yapının meshlenmesi .....	44
<b>Şekil 3.17.</b>	Bal peteğindeki sonlu eleman ağ örgüsü (Meshleme) .....	44
<b>Şekil 3.18.</b>	Meshlemede kullanılan bazı eleman tipleri.....	45
<b>Şekil 3.19.</b>	Ankastre-serbest sınır şartının uygulanması .....	45
<b>Şekil 4.1.</b>	Pulse titreşim ölçüm sisteminden alınan frekans ve sönüm oranını gösteren ekran görüntüsü.....	46
<b>Şekil 4.2.</b>	L numunesinin ANSYS modeli .....	47
<b>Şekil 4.3.</b>	L numunesinin ANSYS modelinin birinci mod şekli ve doğal frekansı.....	47
<b>Şekil 4.4.</b>	L numunesinin ANSYS modelinin ikinci mod şekli ve doğal frekansı .....	48
<b>Şekil 4.5.</b>	L numunesinin ANSYS modelinin üçüncü mod şekli ve doğal frekansı.....	48

<b>Şekil 4.6.</b>	İçi boş numunenin deneysel ve nümerik ilk üç doğal frekans değerleri .....	49
<b>Şekil 4.7.</b>	İçi poliüretan köpük ile dolu numunenin deneysel ve nümerik ilk üç doğal frekans değerleri .....	50
<b>Şekil 4.8.</b>	A, C ve E numunelerinin deneysel ve nümerik ilk doğal frekans değerleri.	50
<b>Şekil 4.9.</b>	0,6 mm levha kalınlığında, farklı çekirdek kalınlıkları için, içi boş ve içi poliüretan köpük ile dolu numunelerde çekirdek kalınlığının sönüm oranına etkileri.....	51
<b>Şekil 4.10.</b>	İçi poliüretan köpük ile dolu ve boş numunelerde, çekirdek kalınlığının sönüm oranına etkileri .....	52
<b>Şekil 4.11.</b>	İçi poliüretan köpük ile dolu numunelerde çekirdek ve plaka kalınlığının frekansa etkileri .....	52

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Bal peteği sandviç yapıların rijitlik, dayanım ve ağırlıklarının çekirdek malzemesinin kalınlığıyla değişimi .....	15
<b>Çizelge 3.1.</b> Boş ve dolu bal peteği çekirdeklerin kütleleri .....	29
<b>Çizelge 3.2.</b> Deneyde kullanılan numuneler .....	30
<b>Çizelge 3.3.</b> Ankastre-serbest sınır şartı için frekans parametresi ve mod şekilleri .....	31
<b>Çizelge 3.4.</b> Alt-üst levha ile çekirdek malzemenin mekanik özellikleri .....	36
<b>Çizelge 4.1.</b> Deneysel ve nümerik olarak belirlenen frekans değerleri ve hata oranları .....	49
<b>Çizelge 4.2.</b> Deneysel olarak tespit edilen sönüm oranları .....	51

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda hava, kara ve deniz ulaşım araçlarındaki hızlı ilerleme, bu araçlarda kullanılmak üzere hafif, dayanıklı, darbelere karşı sönüm oranı yüksek, ses ve ısı yalıtımı iyi, kolay şekillendirilebilir, ucuz malzemelere olan ihtiyacı arttırmıştır. Bu ihtiyaçları gidermek için en çok başvurulan malzemeler ise sandviç kompozit malzemeler olmuştur.

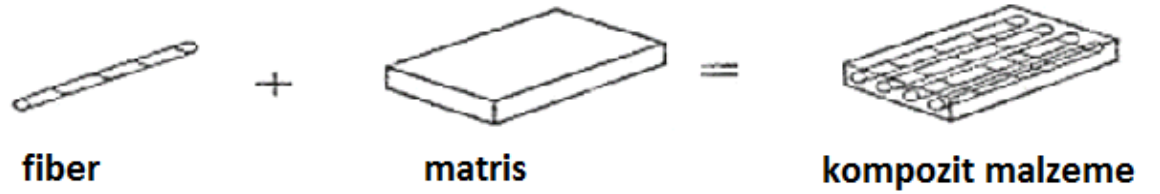
Sandviç kompozit yapılarla ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olmakla birlikte, konunun öneminden dolayı çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu çalışmalarda ekseriyetle, değişik sandviç yapıların mekanik ve dinamik davranışları incelenmiştir. 1950'li yılların sonlarından itibaren ise sandviç yapıların titreşimi ile ilgili araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Günümüze kadar üzerinde çalışılan modellerin çoğunda viskoelastik bir çekirdeğin karmaşık yapısındaki kayma gerilmelerinin sönümlenmeye katkısı incelenmiştir (Mead 1982). Li and Crocker (2006) sandviç yapıların sönümlenmesi için çeşitli teorik modelleri gözden geçirmiştir. Kâğıt balpeteği çekirdeğe poliüretan doldurarak, çekirdek ve yüzey levhası kalınlıklarının değiştirilmesiyle ürettikleri numunelerin bir kısmına delaminasyon uygulamışlardır. Sönümlenmeyi frekansa bağlı olarak incelemiştir. Yüzey levha kalınlığının artmasının, düşük ve yüksek frekans aralıklarında sönümlenmeyi düşürdüğünü, fakat orta frekans aralığında arttırdığını tespit etmişlerdir. Çekirdek kalınlığının artması durumunda, sönüm oranının, orta ve yüksek frekans aralıklarında arttığını bildirmişlerdir. Delaminasyonun, kompozit kiriş yapısında sürtünmeyi, dolayısıyla sönümlenmeyi arttırdığını fakat yapının sertlik ve doğal frekansını azalttığını tespit etmişlerdir. Nilsson and Nilsson (2002) balpeteği sandviç kompozit yapıların dinamik özelliklerini Rayleigh-Ritz yöntemi kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır. Adams and Maheri (2003) Rayleigh-Ritz metodunu kullanarak, serbest-serbest sınır şartı için, ortotropik malzemelerin sönüm kapasitelerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Berthelot (2006) farklı tabakalardan oluşan tek yönlü fiber kompozitlerde farklı sınır şartları için sönüm analizi yapmış ve deneysel olarak titreşim özelliklerini bulmuştur. Zhang and Chen (2006) enerji metodunu kullanarak viskoelastik tabakalı bir çekirdek malzemesinden oluşan bir

kompozit kirişin sönüm kapasitesini sonlu elemanlar yöntemi ile bulmuşlardır. Gibson (1994), bal peteği sandviç yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini hesaplamış ve bal peteği sandviç yapıların endüstriyel üretiminde yaygın olarak kullanılan bazı formüller geliştirmiştir. Aydınca (2007) bal peteği çekirdekli kompozit sandviç yapıları nümerik metodlarla analiz etmiştir. Salam and Bondok (2010), sandviç kirişlerin dinamik özelliklerini ve eğilme sertliklerini hesaplamak için genelleştirilmiş bir model sunmuşlardır. ANSYS 11 vasıtasıyla yazdıkları sonlu elemanlar kodunu kullanarak, sandviç numunelerin, çekirdek sayıları ve şekillerini değiştirip, bu yapıların doğal frekanslarını, mod şekillerini ve eğilme sertliğini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçların sandviç kirişler için sundukları genelleştirilmiş denklemlerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Jun and Aref (2003) yaptıkları çalışmalarda, bal peteği-köpük birleşiminden oluşan çekirdeklerle yapılan sandviç yapıların, tek tek bal peteği veya katı viskoelastik malzemelerden oluşan çekirdeklerden daha yüksek sönümlenmeye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Solmaz vd. (2010) petek yapılı sandviç yapılarda köpük dolgusunun kritik burkulma yüküne etkisini sayısal olarak tespit etmiş ve hücre boşluklarına köpük ilavesinin tüm hücre duvarı kalınlıkları ve boyutları için numunelerde kritik burkulma yükünü arttırdığını bildirmişlerdir. Şakar vd. (2010) petek yapılı sandviç kompozit yapıların farklı sınır şartlarında titreşim analizlerini yapmışlardır. Sandviç yapıyı oluşturan alt-üst yüzey levhaları ve çekirdek malzemesinin geometrik değişiminin, dinamik özelliklere olan etkisini hem nümerik yöntemlerle hem de deneysel olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada; 6-10-15 mm kalınlıklarında, alüminyumdan yapılmış bal peteği şeklinde çekirdek malzemeler deneylerde kullanılmak üzere uygun ebatlara (25 mm genişlik, 227 mm uzunluk) getirilmiştir. Bir kısım çekirdekler boş bırakılıp, diğerleri poliüretan köpükle doldurulmuştur. Üretilen çekirdek malzemelerin alt ve üst yüzeyleri 0,6-1,3-1,6 mm kalınlıklarda alüminyum levhalarla kaplanmıştır. PULSE titreşim ölçüm seti ile farklı konfigürasyonlarda oluşturulan sandviç kompozit yapıdaki numunelerin ankastre-serbest sınır şartı için titreşim deneyleri yapılmış, doğal frekansları ve sönüm oranları tespit edilmiştir. Bu sandviç numunelerin nümerik analizleri ise, sonlu elemanlar yöntemini esas alarak çözüm üreten ANSYS paket programı kullanılarak yapılmıştır.

### 1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, istenen özellikleri elde etmek için kimyasal bileşenleri farklı birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin makro seviyede birleştirilmesiyle meydana getirilen malzemelerdir. Kompozit malzemelerde, farklı özellikteki malzemelerin üstün özelliklerinden faydalanmak esas amaçtır. Şekil 1.1’de tipik bir kompozit malzeme modeli gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Tipik bir kompozit malzeme modeli

İlk kompozit malzeme örnekleri çok eski çağlara dayanmaktadır. Kompozit malzemelerin oluşturulmasında, insan anatomisi ve tabiattaki doğal örnekler, insanlar için ilham kaynağı olmuştur. İnsan vücudundaki çoğu dokular, yüksek eğilme kabiliyeti gösteren liflerden meydana gelmiştir. Bu lifler zorlama ve yüklemelere karşı koyabilmek için düzene konmuştur ve bunlar birbirlerinin üzerinde kayarak dokunun dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Ahşap, kemik gibi malzemeler, doğal kompozit malzemelerdir. Doğal kompozit yapılar çam ağacı da örnek olarak verilebilir. Çam ağacının gövdesi içindeki, yaz ve kış mevsimlerinde meydana gelen yaş halkaları iç içe görünümündedir. Kış halkaları sert fakat kırılabilir, yaz halkaları ise daha yumuşak fakat esneklerdir. Çam ağacı bu kompozit özelliğinden dolayı bu yapıda olmayan diğer ağaçlara göre daha yüksek bir mukavemete sahiptir.

İnsanoğlu ilk çağlardan beri kırılabilir malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak kırılabilirlik özelliğinin giderilmesine çalışmıştır. Kerpiç buna güzel bir örnektir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, kerpiçin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır.

Kompozitlerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamaların çok yeni olmadığı yapılan araştırmalardan ortaya çıkmıştır. M.Ö. 1600 yıllarında Mısır'da ince cam liflerinin yapımının bilindiği, o yıllardan kalan, farklı renkte cam lifleri kullanılmış çeşitli eşyalardan anlaşılmaktadır. Özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar üst üste konularak yapılan ok yayları başka bir kompozit örneği olarak verilebilir. Hidrolik bağlayıcılar ve elyaf malzeme kullanılarak yapay taş plakaların üretim yöntemi hakkında 1800'lü yılların başlarında alınmış patentler mevcut olmasına rağmen, kompozit malzeme kavramının ortaya atılması ve konunun bir mühendislik konusu olarak ele alınması ancak 1940'lı yılların başlarında gerçekteşmiştir.

Plastik malzemeler kompozit yapıların geliştirilmesinde önemli görevler yapmışlardır. İlk modern sentetik plastikler 1900'lerin başlarında geliştirilmiştir. 1930'larda plastik malzemelerin bazı özellikleri, diğer geleneksel malzemeler ile boy ölçüşür düzeyde gelişmeye başlamıştır. Kolay biçim verilebilmesi, yoğunluklarının düşük olması, üstün yüzey kalitesi, korozyona karşı dayanım gibi üstün özelliklerinin yanında düşük sertlik, düşük dayanım gibi olumsuz özelliklerinin olması, plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına sebep olmuştur. Bu eksikliklerinin giderilmesi amacıyla 1950'lilerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Elyaf takviyeli polimer esaslı kompozitlerin üretimiyle birlikte yüksek mukavemet, termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanım gibi pek çok üstün özellikler elde edilmiştir. Diğer taraftan, elyaf takviyeli sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmıştır. Bu malzemelerin en iyi bilinenleri cam elyaf takviyeli polyesterlerdir. Yurdumuzda fiberglas olarak bilinen bu malzemeler, 1950'li yılların sonlarından itibaren sıvı tankları, çatı levhaları, küçük ebatlı deniz teknelerinin yapımında kullanılmaya başlamıştır. Son yıllarda, spor ekipmanlarından yapı malzemelerine, ev aletlerinden ulaşım araçları ve uzay teknolojisine kadar çok farklı kullanım alanları bulunan kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç gittikçe artmaktadır.

### **1.1.1. Kompozit malzemelerin olumlu yönleri**

- Kompozit malzemelerin, dayanıklılık ve elastisite modülünün yoğunluğa oranları ve yorulma dayanımları diğer mühendislik malzemelerine göre daha yüksektir.
- Farklı mekanik özellikler elde etmek için farklı katmanlarda farklı malzemeler kullanılarak çeşitli kompozit malzemeler üretilebilir.
- Kimyasallara, korozyona ve hava şartlarına dayanıklılık gösterirler.
- Karmaşık parçaların tek olarak üretilebilmesinden dolayı parça sayısı ve üretim süresi kısadır.
- Hammaddesi pahalı olmasına karşın, bağlantı elemanlarındaki azalış ve ağırlık azalması gibi etkenler göz önüne alındığında toplam maliyette düşüş sağlamaktadır (Hexcell 2012).

### **1.1.2. Kompozit malzemelerin olumsuz yönleri**

- En genel biçimiyle malzeme heterojen ve anizotropdur. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler olumlu ya da olumsuz özelliklerini ana malzemeye yansıtır. Örneğin; bileşenlerden matris, ısı ve neme karşı duyarlı ise kompozit malzeme de, ısı ve neme karşı duyarlıdır.
- Hammaddenin pahalı olması; uçaklarda kullanılacak kalitede karbon elyafının bir metrekaresine kumaşının maliyeti yaklaşık 50 \$'dır.
- Tabakalandırılmış kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve tabakalar arası düşük kesme dayanıklılığı özelliği bulunmaktadır.
- Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.
- Bazı kompozitler gevrek malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarımları farklı problemlere yol açabilir.
- Bazı türlerinin sınırlı raf ömürleri vardır. Bu tür kompozitlerin soğutularak saklanmaları gerekmektedir.
- Kompozitler onarılmadan önce çok iyi olarak temizlenmeli ve kurutulmalıdır. Sıcak kurutma gerekebilir ve bu da uzun zaman alabilmektedir.

-Kompozitler için geri dönüşüm veya yeniden kazanım mümkün fakat pahalı bir yöntemdir (Hexcell 2012).

### **1.1.3. Kompozit malzemelerin kullanım sebepleri**

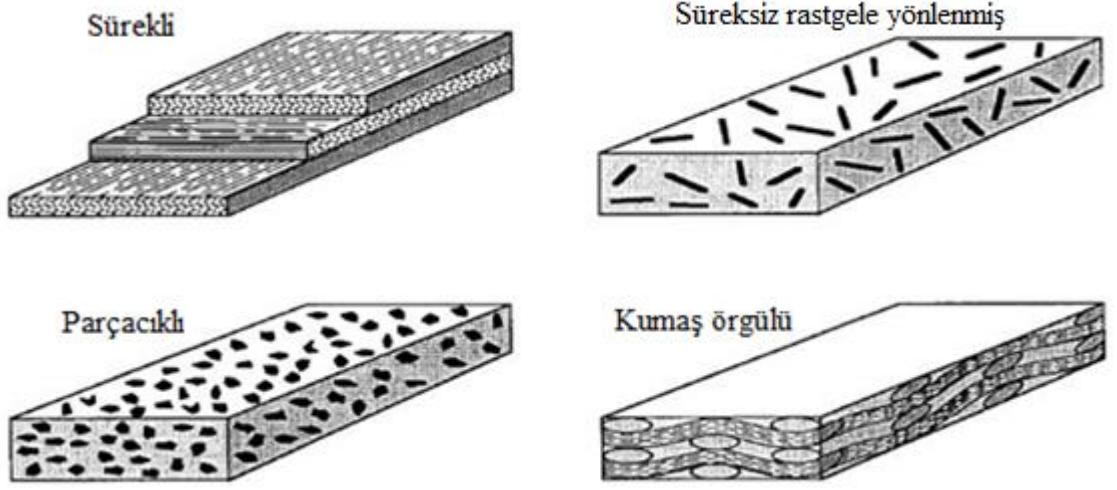
Kompozit malzemeler diğer malzemelere göre, bünyesinde barındırdığı yüksek özelliklerden dolayı daha çok tercih edilirler. Kompozit malzemeler kullanılarak; hafiflik, mukavemet, aşınma dayanımı, yorulma dayanımı, korozyon dayanımı, kırılma tokluğu, termal özellikler, ısı iletkenlik, elektrik iletkenliği, akustik iletkenlik, ekonomiklik gibi özelliklerden biri veya birkaç tanesinin geliştirilmesi amaçlanır.

Kompozit malzemelerin kullanım sebeplerine daha önce bahsedilen kompozit malzemelerin olumlu yönlerine ilave olarak aşağıdaki ifadeler kullanılabilir. Kompozit malzemeler metallere oranla daha hafif malzemelerdir. Çelikten üretilmiş bir profil, benzer ebatlarda üretilmiş kompozit malzemedan ortalama 4 kat daha ağırdır. Kompozit malzemelerin, yapıları gereği mekanik özellikleri değişkenlik arzederler. İhtiyaç duyulan yerlerde çelikten daha yüksek çekme mukavemetine sahip kompozit malzemeler kullanılabilir. Kompozit malzemeler işletme maliyeti bakımından çevre şartlarına uzun süre dayanabilme kabiliyeti, tüketiciye sağladığı avantajların başında gelmektedir. Yüksek kimyasal direnç kabiliyeti sayesinde, kimyasal korozyon riski taşıyan alanlarda yaygın olarak kullanılabilir. Çoğu kompozit malzemeler ısıya maruz sistemlerde sorunsuz çalışabilme özellikleri sayesinde, ısı değişikliklerinden çok az etkilenirler. Isı iletimleri düşük olduğu için, yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirler. Kompozit malzemelerin çoğu, yalıtım özellikleri iyi olduğu için elektriği iletmezler. Bu nedenle elektrik-elektronik sektöründe trafo, kablo, plaka gibi elemanlarda yaygın olarak kullanılırlar.

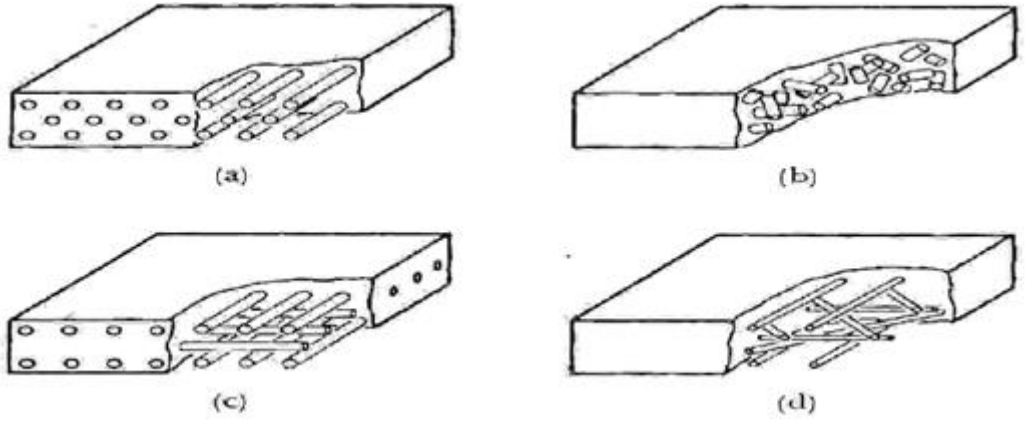
### **1.1.4. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması**

Yapılarında farklı malzeme kullanılabilen kompozit malzemeleri net olarak sınıflandırmak çok zordur. Şekil 1.2’de takviye türlerine göre birkaç kompozit malzeme

grubu gösterilmiştir. Şekil 1.3'te ise; (a)'da sürekli tek yönlü fiberler, (b)'de rastgele yönlü sürekli fiberler, (c)'de enine-boyuna fiberler ve (d)'de açılı yerleştirilmiş fiberler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Takviye türlerine göre birkaç kompozit malzeme grubu



Şekil 1.3. Farklı yönlerde elyaf takviye edilmiş kompozit yapılardan bazı örnekler

**Elyafli kompozitler:** Bu kompozit çeşitinde matris yapının içinde ince elyaflar yer alır. Elyafın matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her

iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk-çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır. Nem emilimi de elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

**Parçacıklı kompozitler:** Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler.

**Tabakalı kompozitler:** Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler. Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örnekleridir.

**Karma kompozitler:** Aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunmasıyla oluşurlar. Bu tip kompozitlere hibrit kompozitler de denir. Bu kompozit türü, yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki farklı elyaftan oluşan yeni

kompozitin tokluğu grafit kompozitden iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemetide kevlar elyafli kompozitden daha yüksek olmaktadır.

#### **1.1.5. Kompozit malzemelerin kullanım alanları**

Kompozit malzemeler, yapıları ve özellikleri sayesinde Şekil 1.4 ve Şekil 1.5’de gösterildiği gibi çok çeşitli alanlarda kullanılır. Her sektörün farklı ihtiyaçları ve beklentileri olduğundan, kompozit malzemelerin, ürün esneklikleri önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı başlıca sektörler; hava ve uzay endüstrisi, denizcilik, spor malzemeleri, tıbbi cihazlar, robot yapımı, kimya sanayi, otomotiv sanayi, elektrik-elektroteknik, müzik aletleri gibi alanlardır.

Kompozit malzemelerin popüler olduğu yeni sektörler arasında yer alan spor araç ve gereçleri her geçen gün daha da öne çıkmaktadır. Özellikle ağırlığın azalması, dolayısıyla hareket kabiliyetinin artması ve dayanıklılığın artmasına neden olan cam ve karbon elyafı takviyeli kompozitler kullanılmaktadır. Kompozitlerde, korozyona dayanım, şok emme ve sağlamlık gibi üstün özellikler mevcuttur. Daha küçük bir motora ve daha az benzine ihtiyaç duyan hafif otomobiller daha çabuk hızlanabilir ve daha çabuk durabilirler. Dağ bisikletleri en iyi dayanım-ağırlık oranı ve en düşük ağırlık özellikleri kazanmak için karbon elyafı ile üretilmektedir. Ayrıca golf sopası, tenis raketi gibi spor ürünlerinde ağırlığı düşürmek için karbon elyafı takviyeli kompozit malzemelerden üretilmektedirler. London College of Furniture ve diğer bazı yerlerde ileri kompozit malzemelerle müzikal enstrümanlar yapılması üzerine çalışmalar bulunmaktadır.



Şekil 1.4. Kompozit malzemelerin bazı kullanım alanları



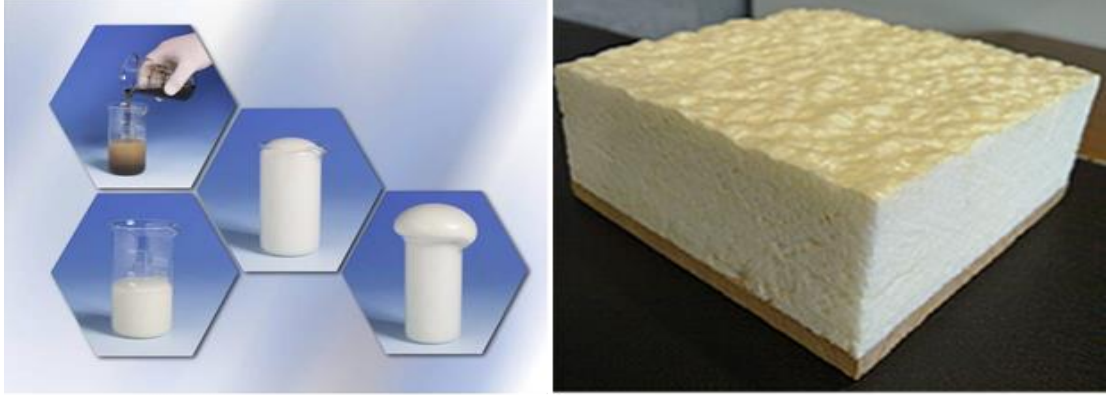
Şekil 1.5. Kompozit yapıların kullanım alanlarına birkaç örnek

## 1.2. Poliüretan Köpük

1937 yılında Otto Bayer ve çalışma arkadaşları tarafından (Leverkusen, Almanya) bulunan, karbamat bağlantıları içeren organik üniteler zincirinden oluşan polimerlerdir. İlk sert poliüretan köpük 1947 yılında, esnek poliüretan köpükler 1954 yılında üretilmiştir. 1960'lı yılların başında ise otomobil sanayinde yarı sert poliüretan köpükler üretilerek oldukça yaygınlaşan ve sanayileşen hammaddenin, günümüzde bilinen yaklaşık 11.000 türevi üretilmektedir. Günlük hayatımızda hemen elimizin altında bile kullanılmasına karşın farkında olmadığımız poliüretan artık otomotiv, sünger, ayakkabı, taşıma, soğutma, yalıtım, mobilya, tekstil, gıda, elektronik, boya, sanayi parçaları üretimi ve sağlık sektörü gibi alanların değişmez parçası olmakla birlikte inşaat ve yapı sektöründe henüz yerini tam olarak bulamamıştır. Poliüretan düzgün bir köpük yapısına sahiptir, yapısındaki hücrelerin %90-95'i kapalıdır. Bu durum poliüretanların yalıtkanlık özelliğini çok iyi olmasını sağlar. Dünyada bilinen en iyi yalıtkan malzemelerden birisidir. Kullanım yoğunluğu  $30-40 \text{ kg/m}^3$  ile  $1200 \text{ kg/m}^3$  arasında değişebilmektedir. Poliüretanlar iyi bir yapışma özelliğine sahiptirler. Uygulanan hemen her yüzeye yapışırlar. Sıvılar gibi uygulanan her kalıbın şeklini alabildiklerinden ürün alternatifleri çok fazladır. B3 yanmazlık sınıfında olmalarına karşın bazı katkılarla B2 ve B1 ve hatta A sınıfı yanmazlık düzeyine yükseltilebilirler. Poliüretanlar yüksek boyutsal kararlılığa sahiptirler.  $-30$  ile  $+80^\circ\text{C}$  arasında hiçbir genleşme göstermediği gibi yapıştığı yüzeyden ayrılmazlar. Poliüretanlar bakteri üretmeyen, çürümeyen, koku yapmayan, sağlığa uygun çağdaş ve teknolojik ürünlerdir. Bu anlamda bu ürünler çevre dostu ürünlerdir (Şekil 1.6.). Hücrelerin içerisinde hapsolan şişirme alanının düşük ısı geçirgenliği sayesinde, soğuk hava depolarının yalıtımında en çok tercih edilen malzemedir.

Poliüretan sert köpük kullanma sebeplerinin başında, maliyet olarak uygunluk, tek enjeksiyon ile değişik şekildeki kalıbın içerisini tamamen doldurarak kalıbın şeklini alması, sert yapı oluşturarak yapısal destek sağlaması, iyi izolasyon değerlerine sahip olması gibi özellikler sayılabilir. Poliüretanlar kullanım yerine ve cinsine bağlı olarak sıvı haldeki hacimlerinin 100 katına kadar genişletilebilir. Boyutsal kararlılığı

yüksektir. Su emme özelliği bulunmaz. Kullanım sıcaklığı maksimum 70-80°C olmalıdır. Maksimum dayanım sıcaklığı 100-110°C'dir. Bu sıcaklıklardan sonra özelliklerini kaybederler.



**Şekil 1.6.** Poliüretan köpüğün oluşturulma safhaları (Hexcel 2013)

Köpüklerin oluşum reaksiyonu:

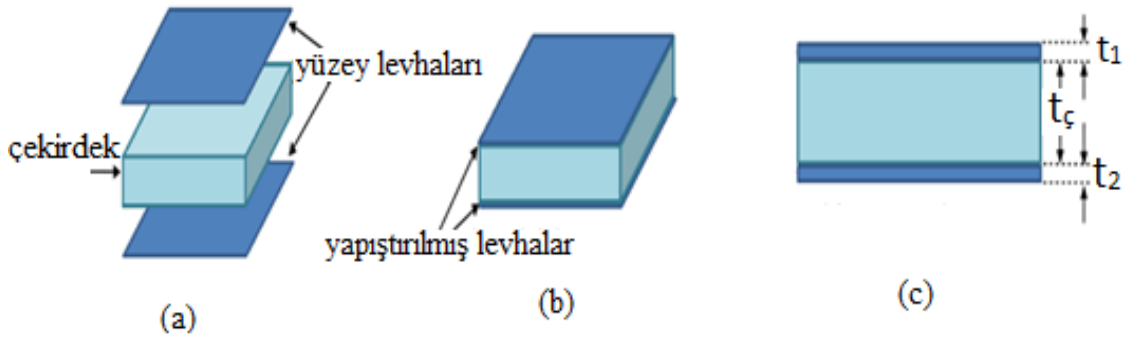
Poliol sistem + İzosiyanat + Kabartıcı  $\Rightarrow$  Reaksiyon  $\Rightarrow$  Poliüretan Köpük+ Isı + Gaz

Poliüretan köpükler, poliol sistem ile ona uygun izosiyanatın belli oranda karışımı ve bu karışımın bir kabartıcı yardımıyla genişlemesinden oluşur. Kabartıcılar ya poliol sistemin içerisine önceden katılır ya da uygulama sırasında karıştırılır. Kabartıcı miktarı arttıkça genişleme artar ve köpüğün yoğunluğu düşer (Antpanel 2012).

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Sandviç Yapılar

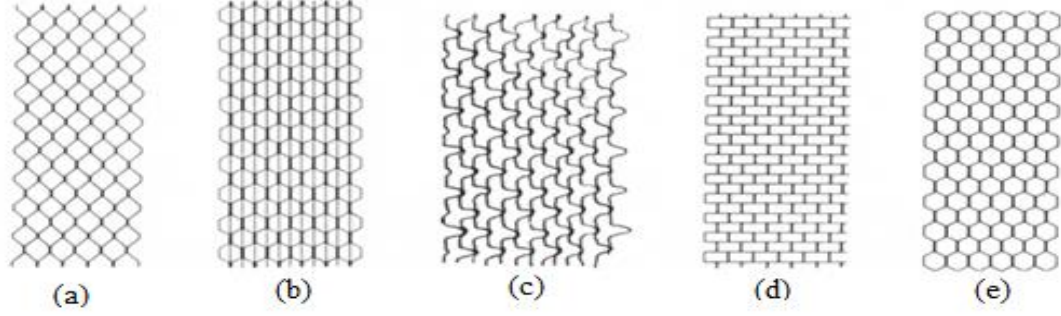
Bir sandviç kompozit yapı; yüzey plakası, çekirdek ve ara yüzeyler arasındaki yapıştırıcı olmak üzere üç temel elemandan oluşur. Şekil 2.1’de tipik bir sandviç yapının (a)’da bileşenleri, (b)’de birleşmiş hali, (c)’de yandan görünüşü gösterilmiştir. Burada,  $t_c$  çekirdek malzeme kalınlığı,  $t_1$  üst yüzey levha kalınlığı ve  $t_2$  alt yüzey levha kalınlığıdır. Sandviç yapıların en büyük avantajı, ihtiyaca göre farklı çekirdek ve yüzey elemanları seçilerek, farklı geometrilerde uygulama yapmaya imkân tanınmasıdır. İki yüzey arasına hafif bir çekirdek malzemesi kullanılarak üretilen sandviç yapının, bükülme sertliği, mukavemeti ve sönüm oranı artırılabilir. Sandviç yapılarda yüzey levhası olarak çoğunlukla, alüminyum, paslanmaz çelik, ahşap tabanlı malzemeler ve karbon-camelyaf-aramid epoksi kullanılır. Çekirdek malzemesi olarak ise genelde alüminyum, kevlar, aramid veya polypropylene gibi plastik tabanlı malzemeler kullanılmaktadır.



**Şekil 2.1.** Tipik bir sandviç yapının görünüşü

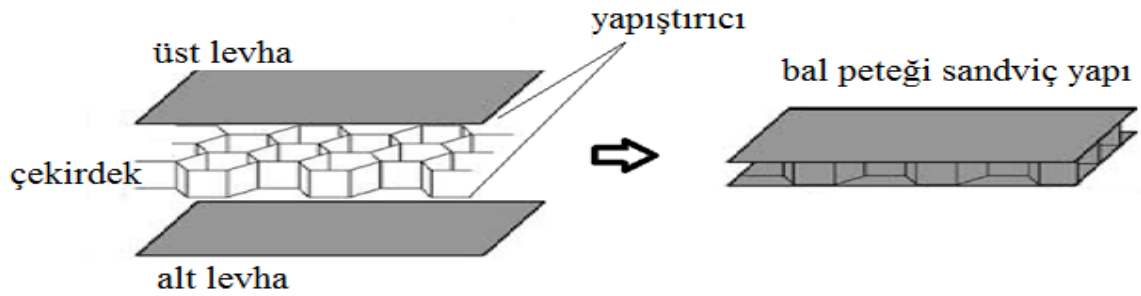
Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise; çekirdek olarak, viskoelastik malzemelerle beraber bal peteği çekirdekli yapılar üzerinde yoğunlaşmıştır. Şekil 2.2’de yaygın olarak kullanılan bal peteği çekirdek tipleri gösterilmiştir. (a)’da kare, (b)’de takviye

edilmiş altıgen, (c)'de bükülmüş çekirdek, (d)'de dikdörtgen, (e)'de altıgen şeklinde çekirdek yapılar gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Yaygın olarak kullanılan farklı bal peteği çekirdek tipleri

Sandviç malzemeler, diğer malzemelere nispeten sahip oldukları hafiflik, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve diğer pozitif özellikleri sayesinde toplu taşıma araçlarından havacılık ve uzay sanayisine, yapı endüstrisinden denizcilik ve otomotive, spor ekipmanlarından müzik aletlerine kadar değişen pek çok sahada geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle havacılık ve uzay sanayisinde çok geniş uygulama alanları bulunmaktadır. Sandviç kompozit malzemeler hem hafif hem de üstün mekanik özelliklere sahip oldukları için son zamanlarda uçak ve helikopterlerde oldukça fazla miktarda kullanılmaktadır. Bu yapıların en büyük avantajı, farklı kullanım alanları için çekirdek ve alt-üst yüzey tabakalarının farklı malzeme ve geometrik yapılardan seçilerek daha uygun yapılar elde etmeye imkân tanınmasıdır. Şekil 2.3'te gösterilen, sandviç kompozit malzemelerin özel bir şekli olan, bal peteği sandviç kompozit yapıların kullanımını giderek artmaktadır.

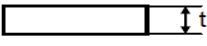




**Şekil 2.3.** Bal peteği sandviç yapı

### 2.1.1. Sandviç yapıların avantajları

Çizelge 1.1’de bal peteği sandviç yapılarda çekirdek malzemesinin kalınlığıyla sandviç yapının rijitlik, dayanım ve ağırlık değişimi gösterilmiştir.

**Çizelge 1.1.** Bal peteği sandviç yapılarda çekirdek malzemesinin kalınlığıyla sandviç yapının rijitlik, dayanım ve ağırlık değişimi (Hexcel 2013)

	Katı malzeme (Tek parça)	Petek kalınlığı t	Petek kalınlığı 3t
			
Rijitlik	1	7	37
Dayanım	1	3.5	9.2
Ağırlık	1	1.03	1.06

- Gereksinim duyulan özelliklere göre imal edilebilmektedir.
- Çekirdek ve yüzey malzemesi olarak için çok fazla alternatif düşünülebilir.
- Sandviç yapılar düşük yoğunluktadır.
- Yüksek eğilme sertliğine sahiptirler.
- Yüksek hasar toleransları vardır.
- Yerinde imalata elverişlidirler.
- İyi titreşim sönümlenme kabiliyetine sahiptirler.

### 2.1.2. Sandviç yapıların dezavantajları

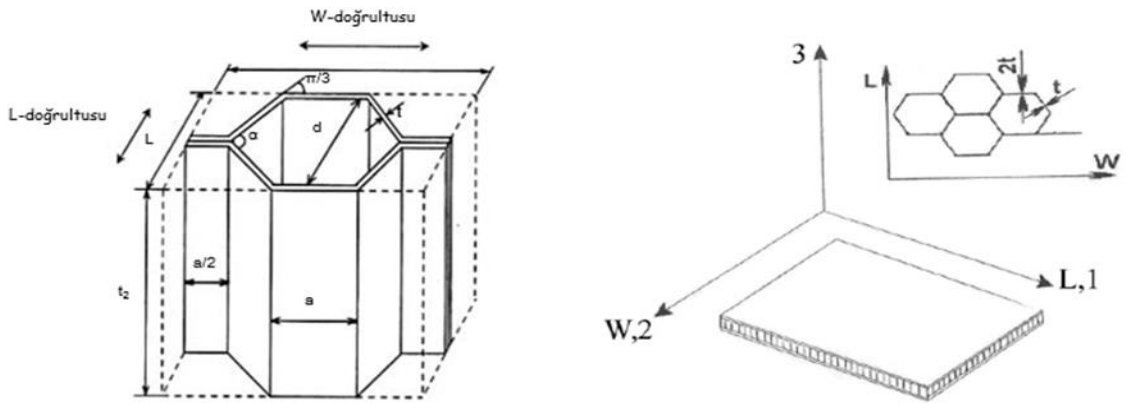
- Kalınlıkları fazladır.
- Geleneksel malzemelere göre üretilmeleri daha yüksek maliyetlidir.
- Birleştirilmeleri zordur.
- Hasarlı kısımların tamiri zordur.

### 2.1.3. Sandviç kompozit yapıların uygulama alanları

- Yapısal uygulamalar (uçak, uzay, denizaltı, gemi ve tekneler, ulaşım araçları, yapı malzemeleri...)
- Ambalaj malzemeleri
- Isı ve elektrik yalıtımı
- Depolama tankları vs.

### 2.2. Bal Peteği Çekirdek Malzemelerin Üretim Metotları

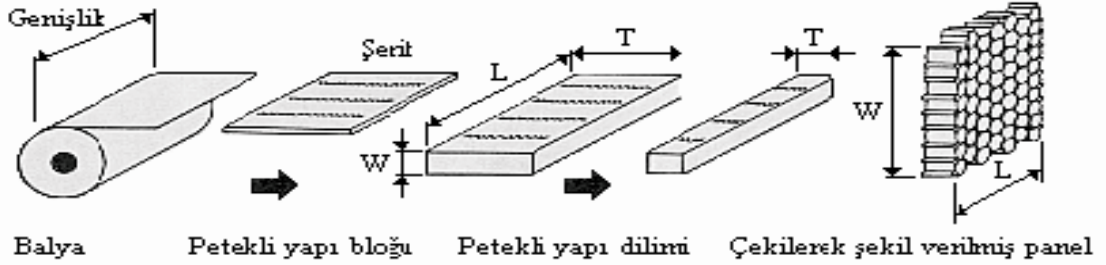
Çekirdek malzeme olarak seçilen bal peteği çekirdeklerin altıgenlerden oluşmasıyla, küçük yüzey alanlarında geniş kaplama yapılması sağlanır. Altıgen yapılarda arada boşluk kalmaz. Düzgün altıgenlerden oluşmuş bölmeler arasında boşluk kalmadığı için kullanılan alanın verimliliği artar. Ayrıca altıgen yapılar kare veya dikdörtgen yapılara göre daha mukavimdir, daha az hasar görürler. Şekil 2.4’de deneylerde kullanılan ve sonlu elemanlar modeli oluşturulan petek yapının geometrisi gösterilmiştir.



**Şekil 2.4.** Deneylerde kullanılan ve sonlu elemanlar modeli oluşturulan petek yapının geometrisi (Paik *et al.* 1999)

Petekli yapıların üretiminde en temel iki metot; Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da gösterildiği gibi uzatma ve kıvrılarak şekil verme metotlarıdır.

### 2.2.1. Uzatarak şekil verme metodu

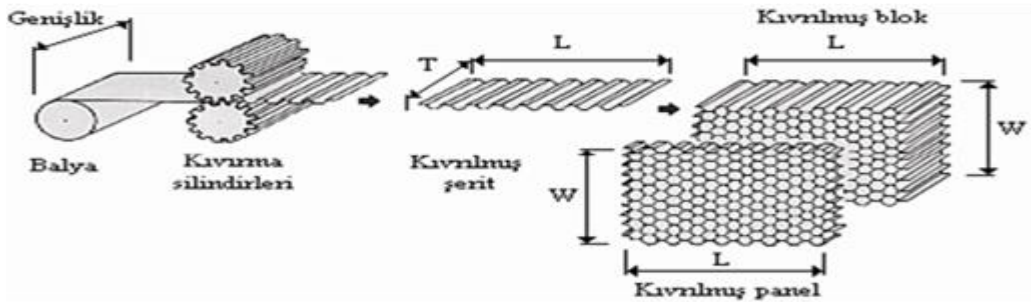


Şekil 2.5. Uzatarak şekil verme metodu (Hexcel 2012)

Bu metod; genellikle metal ve metal olmayan hücre imalatında kullanılır. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi sırasıyla, şerit halinde levhaların kesilmesi ve yapıştırıcının sürülmesi, levhaların üst üste dizilmesi ve petekli yapı bloğunun belli sıcaklıkta basınç altında işlenmesi işlemleri neticesinde elde edilir.

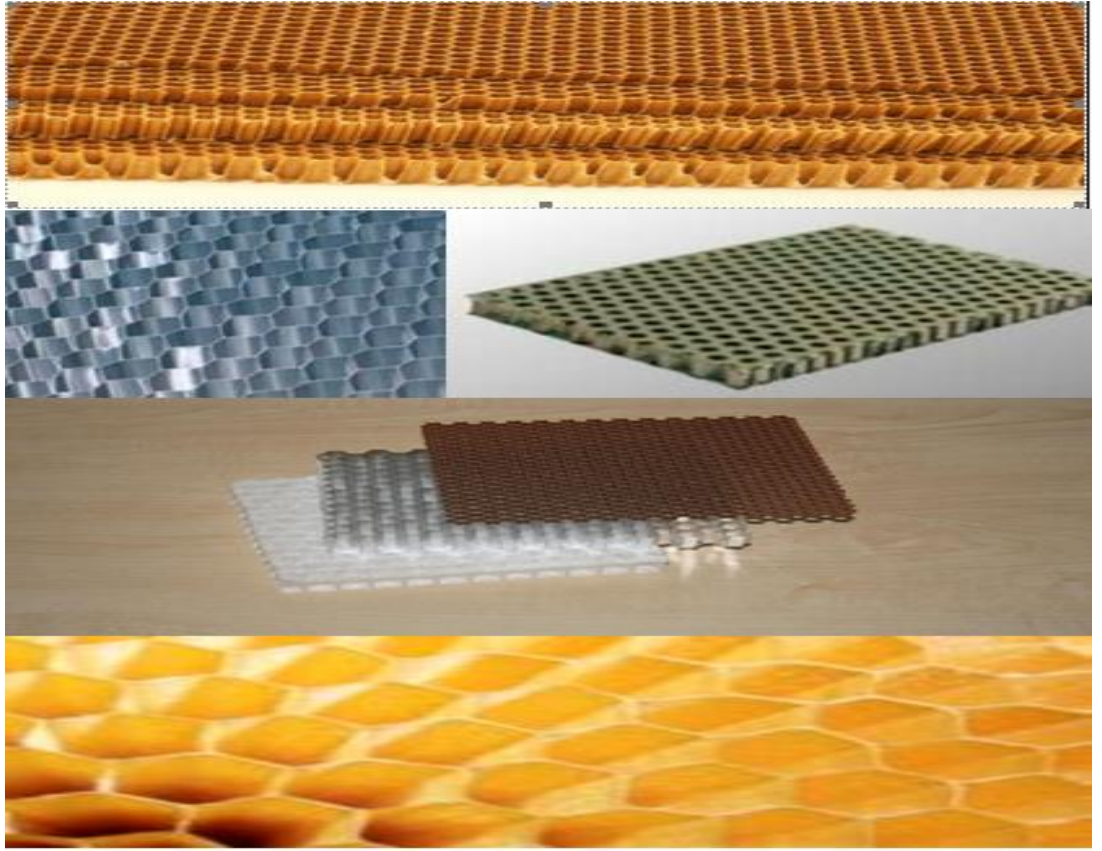
### 2.2.2. Kıvrılarak şekil verme metodu

Kıvrılarak şekil verme metodu yüksek sıcaklıkta çalışan, cidar kalınlığı ve yoğunluğu çok fazla olan petekli yapıların üretilmesinde kullanılır. Şekil 2.6’da gösterildiği gibi, bu metotla şerit levhalar ihtiyaç duyulan şekilde kıvrılarak düğüm noktalarından yapıştırılırlar. Müteakiben şerit levhalar üst üste konur ve kıvrılmış bloklar belli sıcaklıkta bekletilir. Daha sonra bloktan istenilen kalınlıkta dilimler kesilerek bal peteği çekirdek malzeme elde edilir.



Şekil 2.6. Kıvrılarak ile şekil verme metodu (Hexcel 2012)

Deneysel çalışmada kullanılan numuneler kıvrılarak şekil verme metoduyla üretilmiştir. Uzatarak ve kıvrılarak şekil verme metotları ve diğer üretim yöntemleri kullanılarak, üretimi gerçekleştirilen petekli yapılar, kullanılacak yerin özelliklerine göre, temizleme, kesme, şekil verme ve ekleme işlemlerinden geçerler. Şekil 2.7’de farklı şekillerde imal edilmiş petek yapılar gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** Farklı şekillerde imal edilmiş petek yapılar

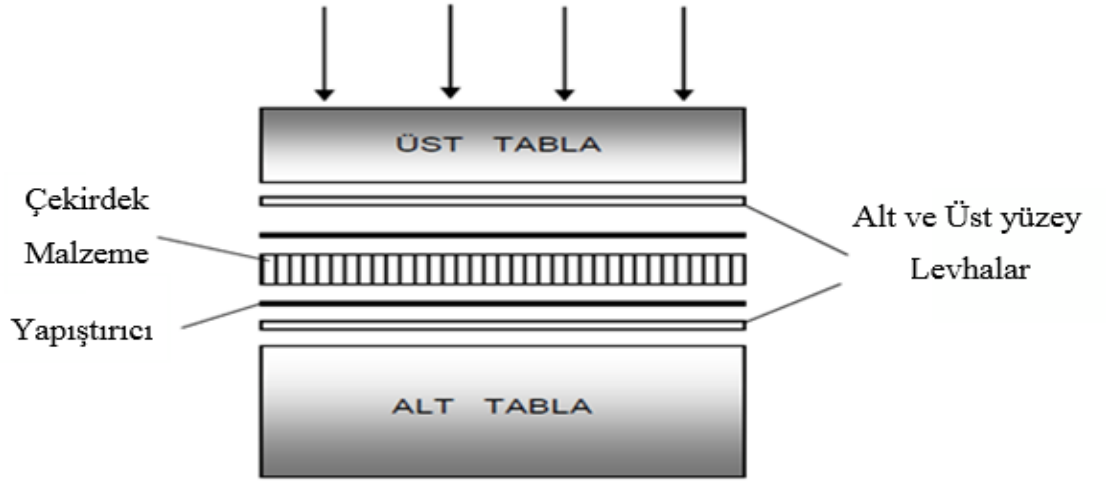
### **2.3. Bal Peteği Sandviç Yapıların Üretim Metotları**

Bal peteği sandviç kompozit malzemeler genel olarak üç farklı metotla üretilirler.

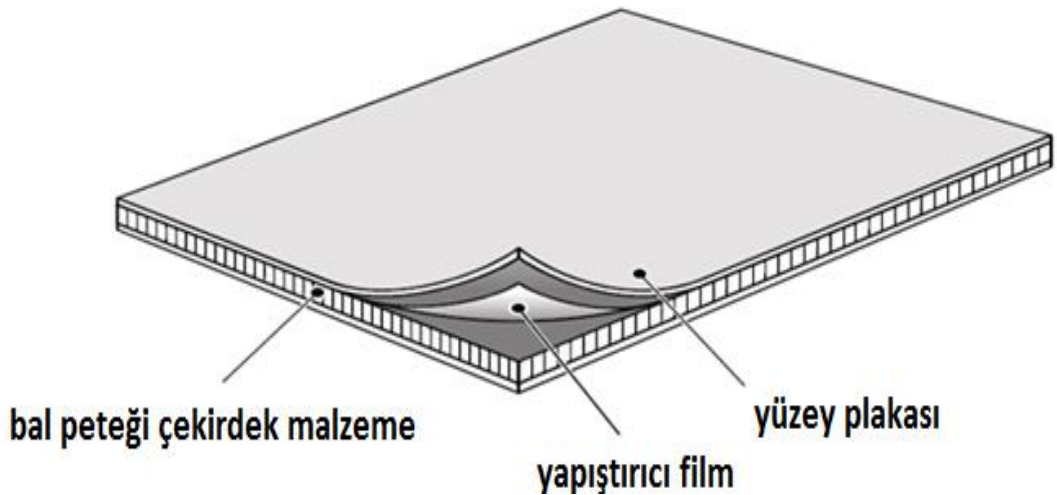
1. Sıcak basınç metodu,
2. Vakum metodu
3. Kalıp metodu

### 2.3.1. Sıcak basınç metoduyla şekil verme

Çoğunlukla düzgün yüzeyli levhaların petek yapı ile birleştirilmesinde kullanılır. Parça tek seferde elde edilecek şekilde imal edilir. Bu metot, metal ve prepreg yüzeylerde yaygın olarak kullanılır. Reçine emdirilmiş malzemenin (prepreg), yüzey tabakaları basınç altında önceden ısıtılarak yapıştırıcı ile birleştirilir. Bu yöntemin uygulama şekli Şekil 2.8’de ve bu yöntemle üretilmiş bir sandviç yapı örneği Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



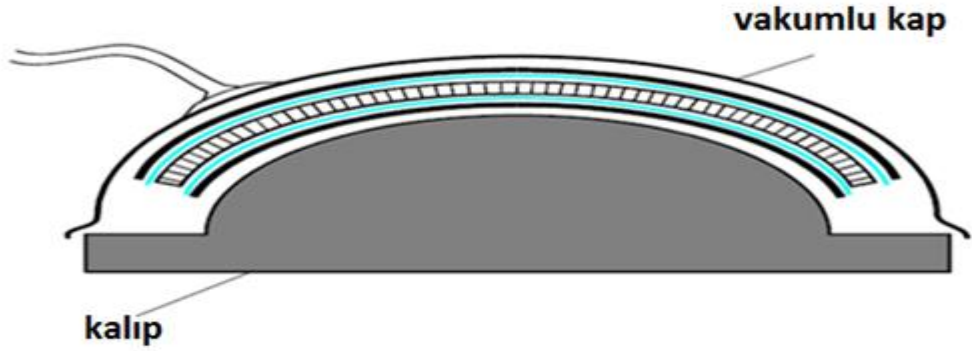
Şekil 2.8. Sıcak basınç metodu ile sandviç kompozit üretimi (Hexcell 2013)



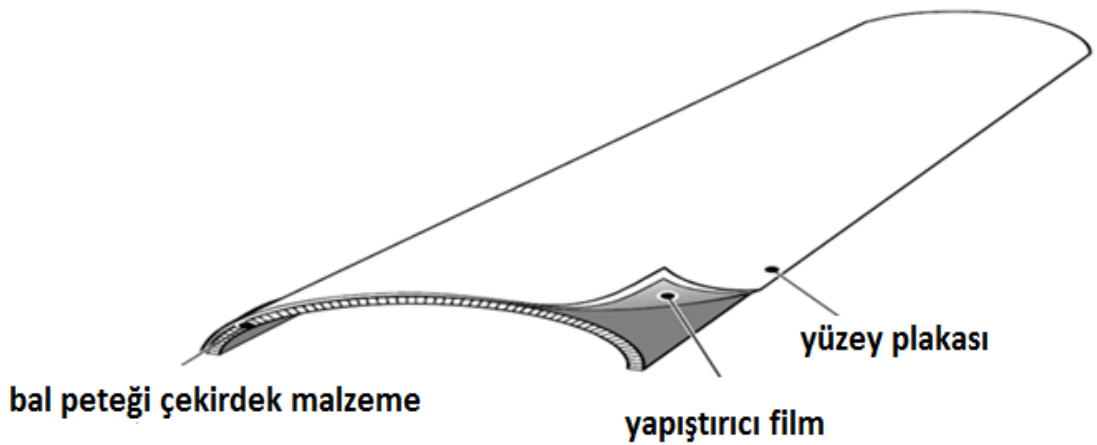
Şekil 2.9. Sıcak basınç metodu ile üretilmiş sandviç yapı örneği (Hexcell 2013)

### 2.3.2. Vakum metoduyla şekil verme

Bu yöntemle üretilmesi zor olan karmaşık yapıları parçalar üretilir. Üretilmesi düşünülen parçalar ısıtılarak bir defada üretilecek şekilde monte edilir. İlk olarak parça fırında ısıtılır ve bütün üretim sürecinde negatif basınç oluşması sağlanır. Vakum metodu ile üretimde, önceden şekil verilmiş el yatırması kompozit malzemeler (prepreg) veya metal tabakalı sandviç yapılar üretilir. Bu üretim metoduyla bal peteği ve yapıştırıcı film tabakaları kullanılarak karmaşık şekilli kompozit parçaların üretimi sağlanabilir. Bu yöntemin uygulama şekli Şekil 2.10'da ve bu yöntemle üretilmiş bir sandviç yapı örneği Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



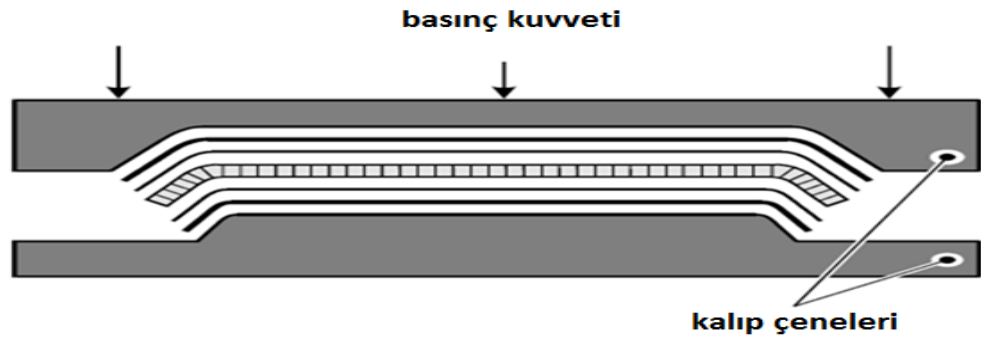
Şekil 2.10. Vakum metoduyla sandviç yapıların üretimi (Hexcell 2013)



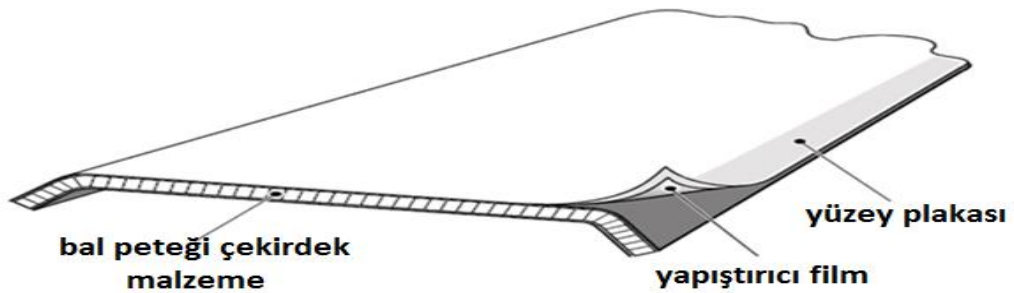
Şekil 2.11. Vakum metoduyla üretilmiş sandviç yapı örneği (Hexcell 2013)

### 2.3.3. Kalıp metoduyla şekil verme

Kalıp metoduyla şekil vermede amaç; imal edilecek parçayı hassas bir şekilde imal etmek ve yüzey iyileştirilmesi yaparak tek seferde sonuç almaktır. Bu metotla çoğunlukla tek kullanımlık malzeme üretimi yapılmaktadır. Bu metotla parça üretmek için çeşitli işlemler uygulanarak sıcaklık ve basınç ayarı yapmak gereklidir. Isıtıcı kullanmak mümkün değilse ya da üretilecek yapı çok büyükse oda sıcaklığında soğuk yapıştırma işlemi ile de imal edilebilir. Bu yöntemin uygulama şekli Şekil 2.12’de ve bu yöntemle üretilmiş bir sandviç yapı örneği Şekil 2.13’de gösterilmiştir. Ayrıca, sandviç yapıların kullanıldığı bazı uygulama alanları Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Kalıp metoduyla sandviç kompozit yapıların üretimi (Hexcell 2013)



Şekil 2.13. Kalıp metoduyla üretilmiş bir sandviç kompozit yapı örneği (Hexcell 2013)



**Şekil 2.14.** Sandviç kompozit yapıların bazı kullanım alanları

#### **2.4. Alüminyum Bal Peteği Panellerin Genel Özellikleri**

Alüminyum bal petekli kompozit yapılar, yüksek mekanik dayanım gerektiren konstrüksiyonlarda kullanılır. Şekil 2.15’de alüminyum bal peteği sandviç yapılardan oluşmuş levha örnekleri gösterilmiştir. Oldukça hafif sistemler elde etmek için, sandviç yapıların iç ve dış tabakaları arasına bu petekli yapılar yerleştirilir. Tabakalar arasına petekli yapının yerleştirilmesi, yapının atalet momentinin ve eğilme dayanımının artmasını sağlar. Yüksek rijitlik ve dayanım-ağırlık oranına sahip olan sandviç yapılar son derece hafif konstrüksiyonlardır.



**Şekil 2.15.** Alüminyum bal peteği sandviç yapılar

İçerisindeki petek yapıdaki binlerce odacıkta hapsolan hava sayesinde, mükemmel ısı ve ses yalıtımı sağlar. Cephe giydirmede, komple taş kullanımından hem çok daha hafif hemde çok daha sağlamdır. Taş yapının aksine kırılmaya dayanıklıdır. Nakliyesi çok daha kolaydır ve nakliye esnasında meydana gelen taş kırılmalarının önüne geçilmiş olur. Hafifliği nedeniyle kolay montaj imkânı sağlar. Montaj ve yenileme maliyeti düşüktür. Olumsuz bir yönleri ise alüminyum petek yapıli kompozitler, diğer sandviç yapı ara malzemelerine oranla daha pahalıdır ve sandviç yapı haline dönüştürülmesi daha özel işçilik gerektirmektedir.

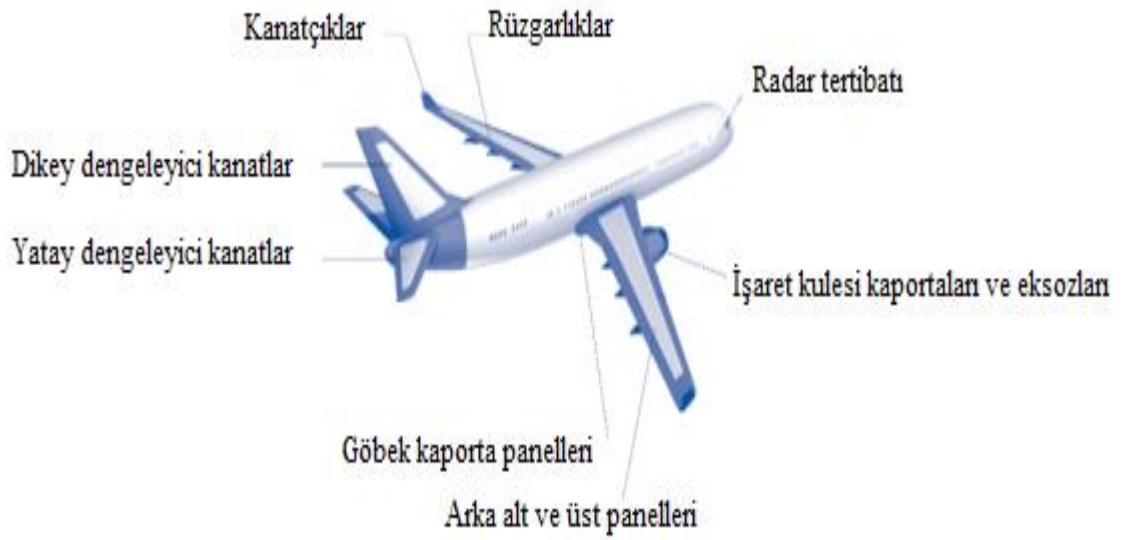
## **2.5. Sandviç Petek Yapıların Temel Kullanım Alanları**

Sandviç kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç her geçen gün daha da artmaktadır. Havacılık ve uzay sanayisine yönelik uygulamalarda, hafif ve mukavemetli yapıların kullanılması önem taşımaktadır. Genellikle uçağın taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi gibi parçalar sandviç kompozit yapılardan oluşmaktadır. Bu yapılardaki kullanıma ilave olarak, petekli yapılar enerji sönümleme, radyo dalgası kalkanı, uyduların güneş panelleri ve hava akımı doğrultucusu vb. olarak da yaygın bir kullanıma sahiptir.

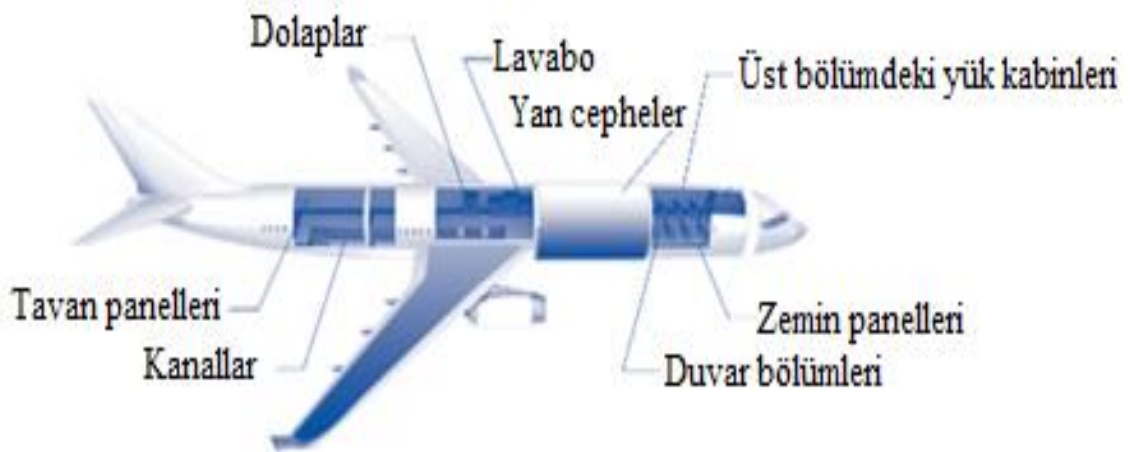
İlk yapılan uçakların arka kısmında balsa ağacı çekirdek kısmı olmak üzere cam fiber takviyeli paneller kullanılmaktaydı. 1960'lı yıllarda ise petek yapıların kullanımı yaygınlaşmaya başladı. O yıllarda özellikle İngilizler tarafından önce grafit-fiber sonra Amerikalılar tarafından boron-fiber takviye elemanlarının geliştirilmesi petek yapı kullanımını hızlandırdı. 1970'li yıllarda özellikle askeri uçaklarda petek yapıların kullanımı yaygınlaşmıştır. F-111 uçağının yatay kuyruğu, F-4 uçağının dikey kuyruğu, F-15 uçağının ise hem yatay hem dikey kuyruğu petek yapıdan yapılmıştır.

1970'li yılların ortalarında grafit epoksi ağırlıklı olarak petek yapılarda kullanılmaya başlandı. F-16 uçağının tüm kuyruk yüzeyleri, kanatlardaki ve gövdedeki diğer kumanda yüzeyleri ve F/A-18 uçağının kanat ve kuyruk kısımları petek yapı kullanımına örneklerdir (Hoskin and Baker 1986). Şekil 2.16, Şekil 2.17 ve Şekil

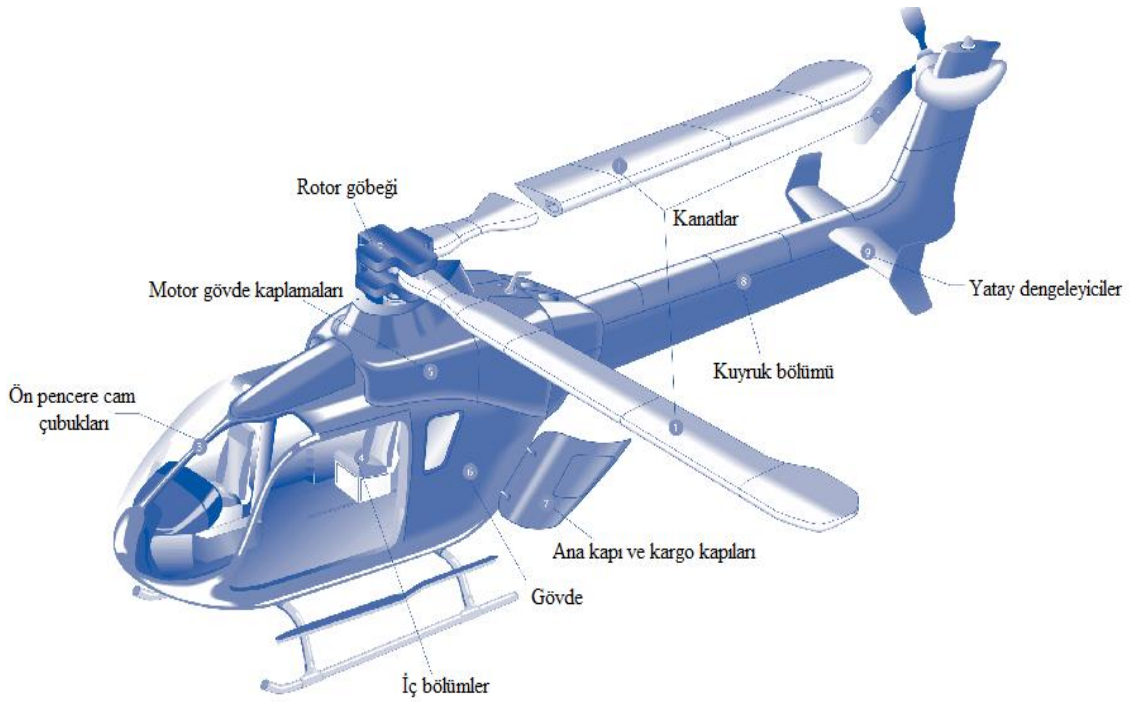
2.18’de kompozit malzeme kullanılan hava aracı örnekleri mevcuttur. Şekillerde de görüldüğü gibi bir uçağın burun, ön-arka kanat, gövde ve motor bölümlerinin ayrılmasında kullanılan malzemelerin birçoğunda sandviç yapıli kompozit malzemeler kullanılmıştır.



**Şekil 2.16.** Yolcu uçağının dış yapısında kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013)



**Şekil 2.17.** Yolcu uçağının iç yapısında kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013)



**Şekil 2.18.** Bir helikopterde kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013)

Son yıllarda otomobillerin tavan ve gövdesinin birçok kısımlarında, spor aletlerinde, rüzgâr türbini pervaneleri, birçok alet ve makine imalatında petekli yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.19’da gösterilen rüzgâr türbini ve türbin kanadı sandviç kompozit malzeme kullanılarak yapılmıştır.



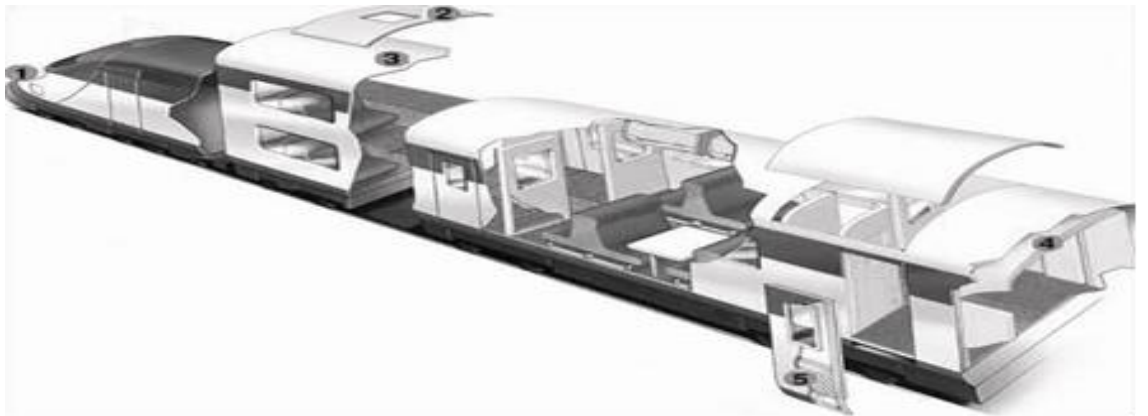
**Şekil 2.19.** Türbin kanatlarında kompozit malzeme kullanımı (Hexcel 2012)

İnşaat ve yapı sektöründe de gittikçe artan bir şekilde sandviç kompozit malzeme kullanımına rastlanmaktadır. Şekil 2.20’de prefabrik yapılarda sandviç kompozit malzeme kullanım örnekleri mevcuttur.



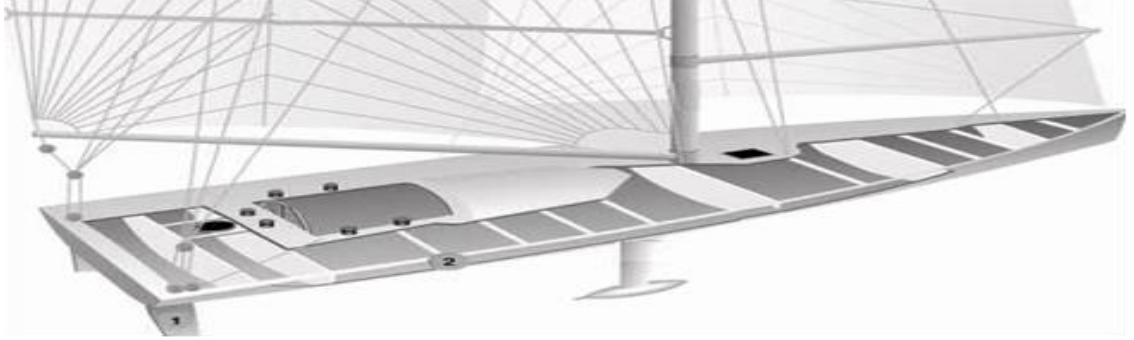
**Şekil 2.20.** Prefabrik yapılarda sandviç kompozit malzeme kullanımı

Tren konstrüksiyonlarında maliyeti ve ağırlığı düşürmek amacıyla, sandviç kompozit türleri artan oranlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.21’de tren vagonlarında kompozit yapı kullanılan bölgeler gösterilmiştir. İskelette ağırlığın düşürülmesi enerji tasarrufu sağlamakla beraber daha hızlı araçların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca trenlerde malzemelerin yüksek rijitliğe sahip olmalarıyla, iskeletin desteklenmesine gerek kalmamakta böylece yolcu taşıma bölümü artırılabilir.



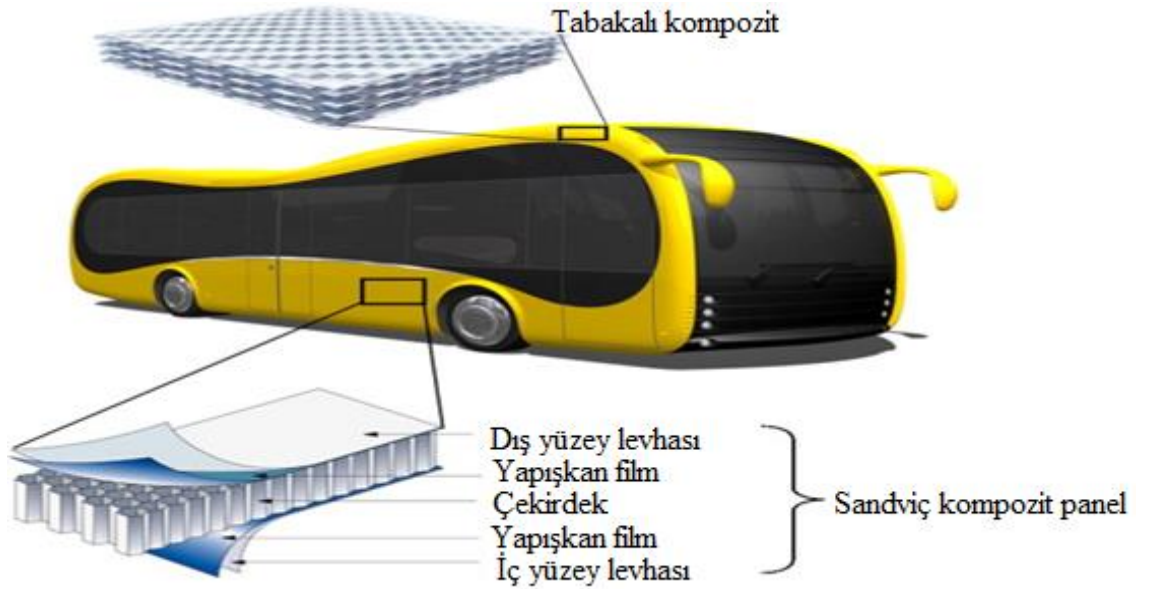
**Şekil 2.21.** Tren vagonlarında kompozit yapı kullanılan bölgeler (Hexcel 2012)

Denizcilik sektöründe, tekne imalatı sırasında sandviç tekniği kullanılarak, teknenin mekanik dayanımı artırılmaktadır. Şekil 2.22’de teknelerde kompozit sandviç kullanım bölgeleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.22.** Teknelerde kompozit sandviç kullanım bölgeleri (Hexcel 2012)

Şekil 2.23’de yeni nesil bir yolcu otobüsünde bal peteği sandviç ve tabakalı kompozit yapının kullanım yerleri gösterilmiştir.

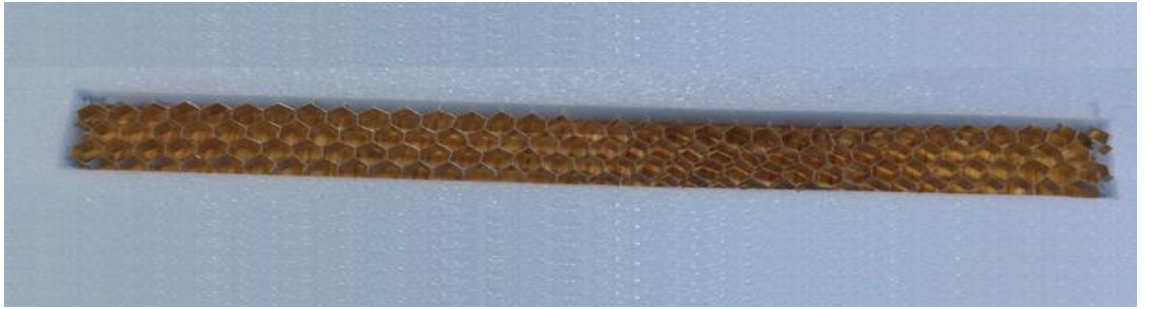


**Şekil 2.23.** Yeni nesil bir yolcu otobüsünde kompozit malzeme kullanım bölgeleri (Shin *et al.* 2008)

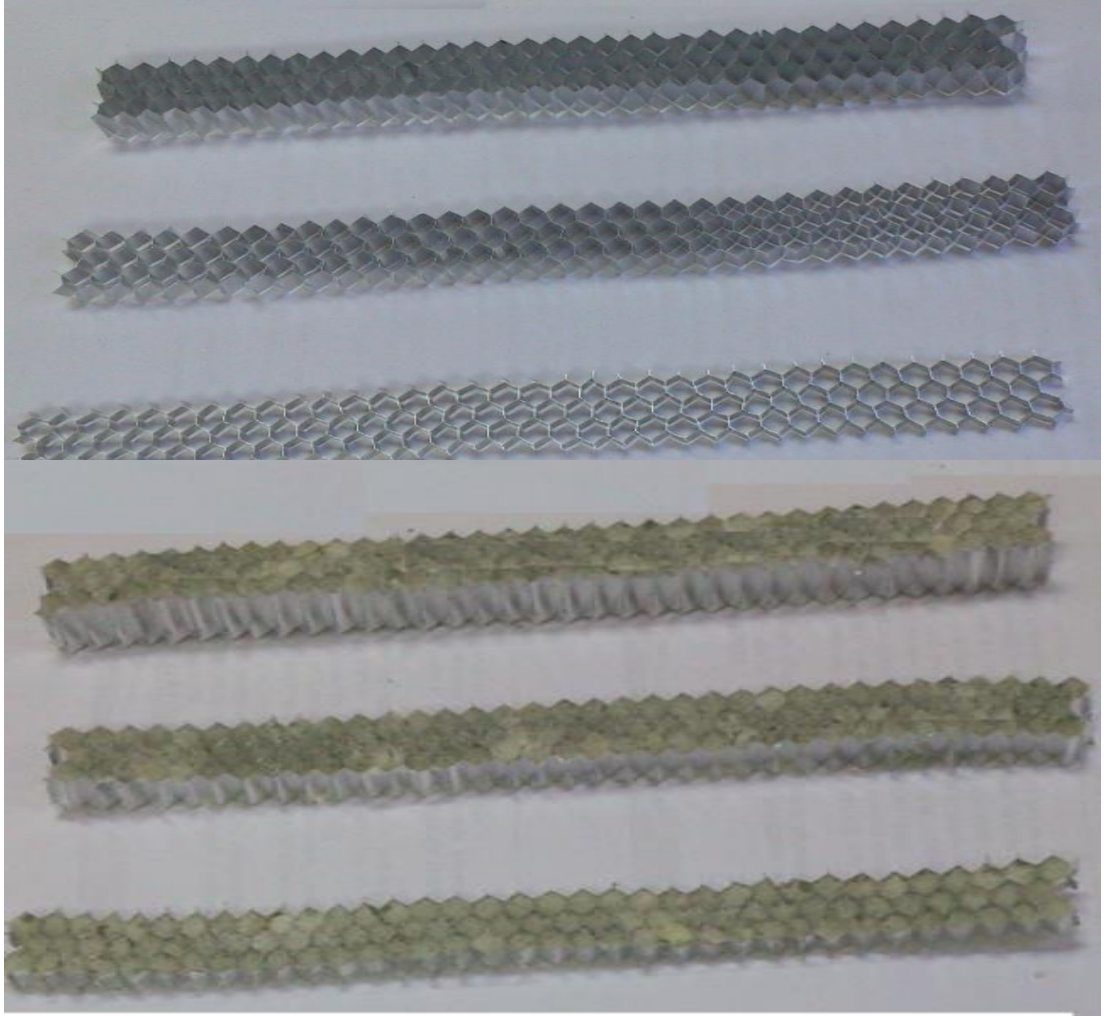
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, alt ve üst levhaları farklı kalınlıklarda (0,6-1,3-1,6 mm) alüminyum levhalar ile farklı kalınlıklarda (6-10-15 mm) alüminyum bal peteği çekirdek malzemeler kullanılarak, 25 mm genişliğinde ve 227 mm uzunluğunda olacak şekilde sandviç kompozit numuneler imal edilmiştir. Poliüretan köpükle doldurulacak olan alüminyum bal peteği çekirdeklerin, köpük sertleşinceye kadar geometrik olarak şekil değişikliğine uğramaması için Şekil 3.1’de gösterilen kalıplar kullanılarak poliüretan köpük doldurma işlemi yapılmıştır. Poliüretan köpük kuruduktan sonra numuneler kalıptan çıkarılarak fazlalıklar tıraşlanıp sandviç yapının çekirdeği olarak kullanıma hazır bir vaziyete getirilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere üretilen, içi boş ve köpük dolgu çekirdekler Şekil 3.2’de gösterilmiştir, bu çekirdeklerin ortalama kütleleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir. Levha ve çekirdekler, Araldite AW 106 TU ve HV 953 U marka yapıştırma elemanları ağırlıkça birebir oranda karıştırılmasıyla elde edilen yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. Yapıştırıcı, yüzeylere çok ince bir film tabaka oluşturacak şekilde tatbik edilmiştir. Numuneler yapıştırıldıktan sonra üzerlerine ağırlıklar konularak bir gün boyunca basınç altında bekletilmişlerdir. Oluşturulan numunelerden bazıları Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Çizelge 3.2’de ise deneyde kullanılan numunelerin özellikleri verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Poliüretan köpük ile doldurulacak içi boş alüminyum bal peteği çekirdeklerin şekil değişikliğine uğramaması için hazırlanmış kalıp



**Şekil 3.2.** Deneylerde kullanılan içi boş ve içi poliüretan köpük ile doldurulmuş alüminyum bal peteği çekirdekler

**Çizelge 3.1.** Boş ve dolu bal peteği çekirdeklerin kütleleri

6 mm Çekirdek		10 mm Çekirdek		15 mm Çekirdek	
Boş Kütle (gr)	Dolu Kütle (gr)	Boş Kütle (gr)	Dolu Kütle (gr)	Boş Kütle (gr)	Dolu Kütle (gr)
1,62	2,42	2,62	3,92	3,94	5,74

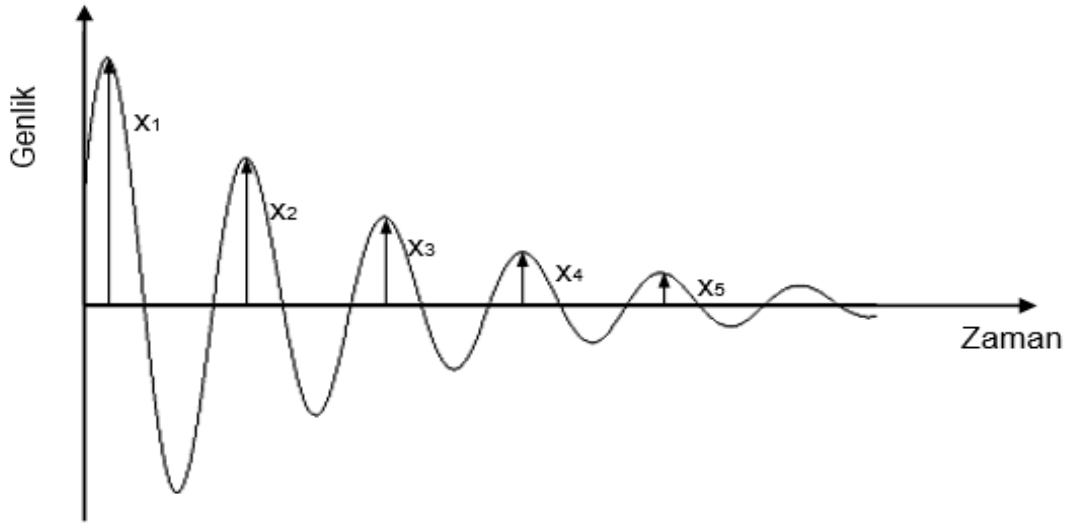
**Çizelge 3.2.** Deneyde kullanılan numuneler

Numune Adı	Plaka Kalınlığı (mm)	Çekirdek Kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Poliüretan Köpük
A	0,6 mm	6 mm	227 mm	25 mm	Yok
B	0,6 mm	6 mm	227 mm	25 mm	Var
C	0,6 mm	10 mm	227 mm	25 mm	Yok
D	0,6 mm	10 mm	227 mm	25 mm	Var
E	0,6 mm	15 mm	227 mm	25 mm	Yok
F	0,6 mm	15 mm	227 mm	25 mm	Var
G	1,3 mm	6 mm	227 mm	25 mm	Yok
H	1,3 mm	6 mm	227 mm	25 mm	Var
I	1,3 mm	10 mm	227 mm	25 mm	Yok
J	1,3 mm	10 mm	227 mm	25 mm	Var
K	1,3 mm	15 mm	227 mm	25 mm	Yok
L	1,3 mm	15 mm	227 mm	25 mm	Var
M	1,6 mm	6 mm	227 mm	25 mm	Yok
N	1,6 mm	6 mm	227 mm	25 mm	Var
O	1,6 mm	10 mm	227 mm	25 mm	Yok
P	1,6 mm	10 mm	227 mm	25 mm	Var
R	1,6 mm	15 mm	227 mm	25 mm	Yok
S	1,6 mm	15 mm	227 mm	25 mm	Var

Boş ve dolu bal peteği çekirdekler arasında, yaklaşık olarak %40-50 kütle artışı olduğu görülmüştür. Bu durum sandviç yapının genelinde yaklaşık olarak %2-3 kütle artışına sebep olmaktadır.

**Şekil 3.3.** Deneylerde kullanılmak üzere üretilen bal peteği sandviç numuneler

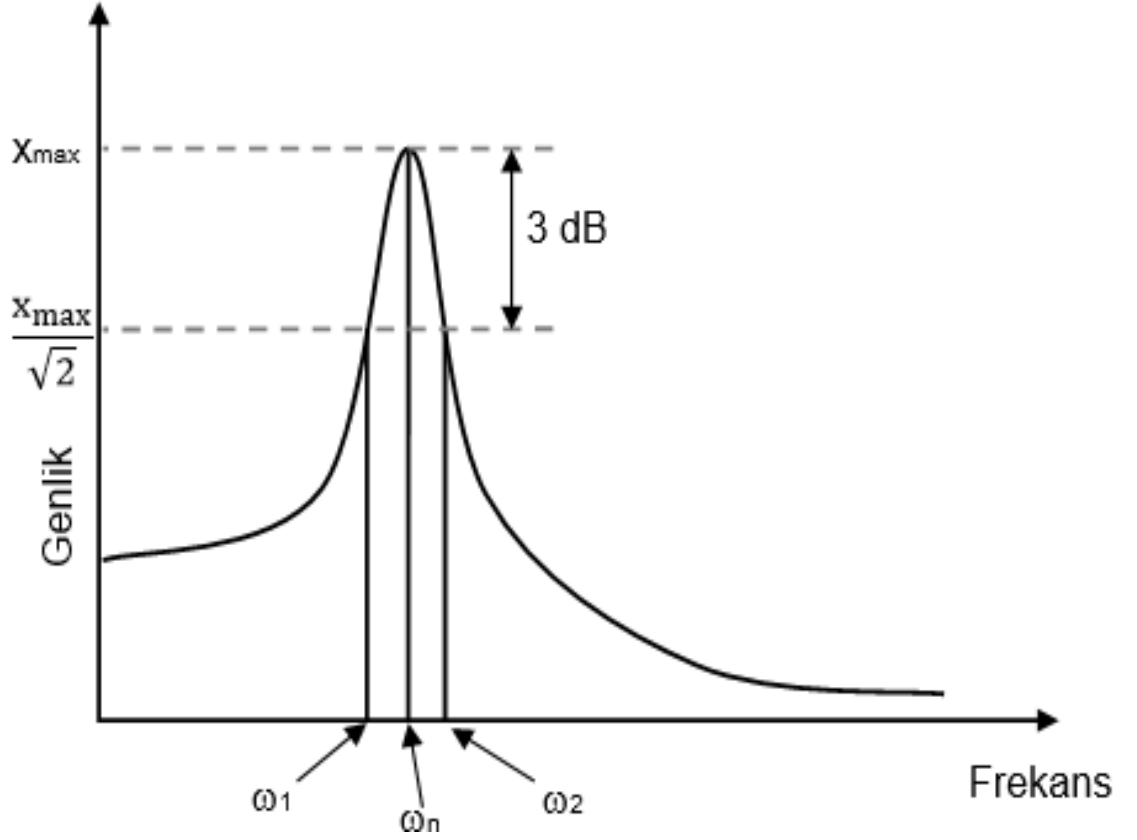
Sönüm oranını ölçmek için faydalandığımız yöntemlerinden birisi logaritmik azalma metodudur. Logaritmik azalma metodu, sönüm oranını, genlik-zaman aralığında ölçmek için kullanılır. Şekil 3.4'te serbest titreşim yapan bir sistem için genlik-zaman grafiği gösterilmiştir. Bu metotta sistem üzerine uygulanan bir başlangıç şartı sonucu sistemin aşağıda gösterildiği serbest titreşim cevabı alınır ve kaydedilir. Logaritmik azalma, bu eğriden elde edilen ardışık iki genliğin oranının logaritması olarak ifade edilir.



**Şekil 3.4.** Serbest titreşim yapan bir sistem için genlik-zaman grafiği

Yukarıdaki gibi elde edilen bir grafikten herhangi iki tepeye ait genlik oranları okunarak aşağıdaki denklemler yardımıyla ilgili malzemeye ait sönüm oranı belirlenir. Deneyde kullandığımız poliüretan köpüğün sönüm oranı bu metotla belirlenmiştir.

Sandviç yapıların sönüm özellikleri belirlediğimiz diğer bir metot da deneylerde kullandığımız bilgisayar tabanlı ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Bu analiz programı bize doğrudan malzemelerin rezonans frekanslarına karşılık gelen sönüm oranlarını vermektedir. Analiz programı, sönüm oranını, aşağıda anlatılan ve yarı güç bant genişliği (half-power bandwidth) adı verilen bir metot kullanarak genlik-frekans aralığında belirlemektedir (Şekil 3.5.).



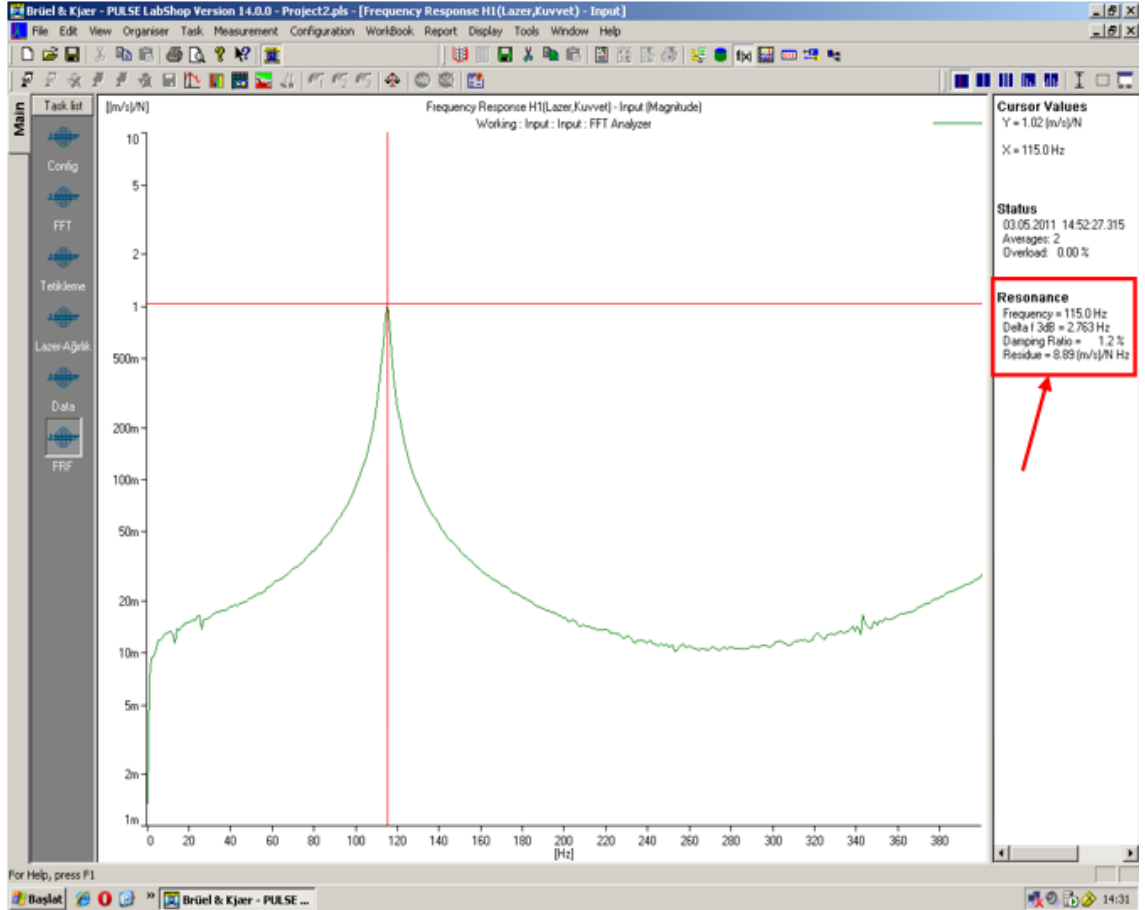
Şekil 3.5. Yarı güç bant genişliği metodu

Bilindiği üzere titreşim yapan bir sistem için her modun kendine has bir sönüm oranı vardır. Buna göre herhangi bir mod için sönüm oranı,

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_n} = 2\zeta \quad (3.1)$$

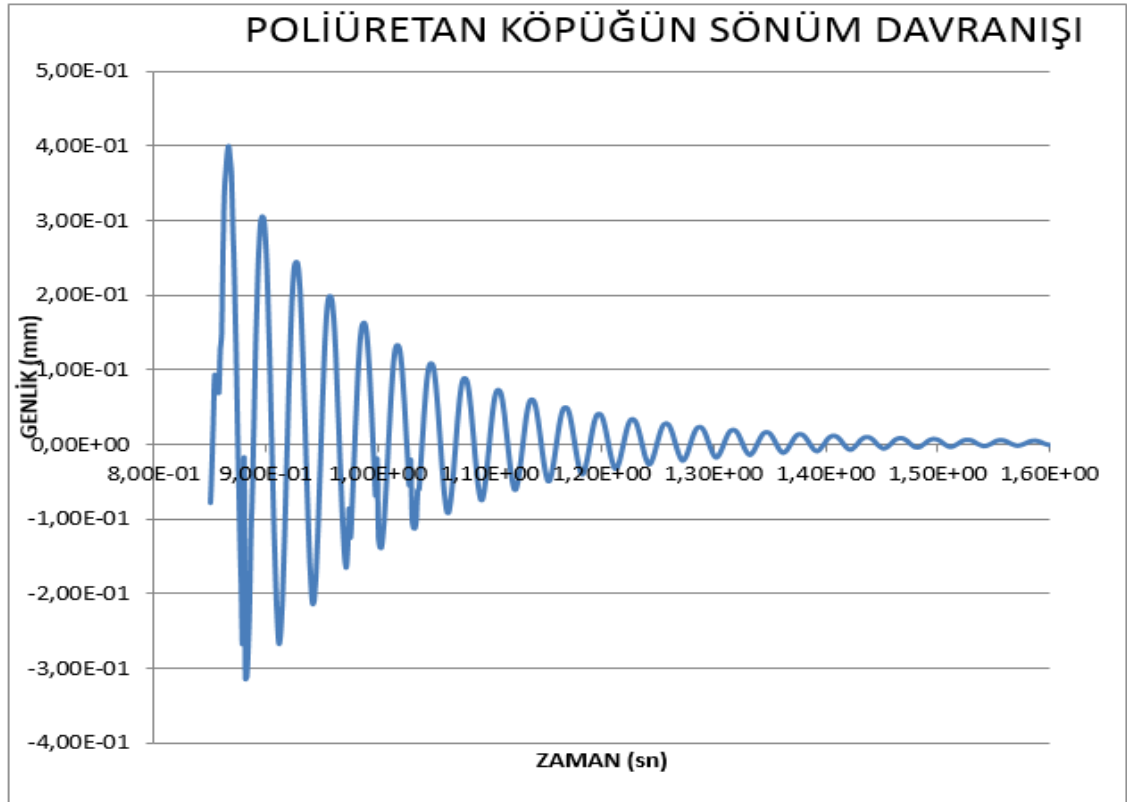
formülü yardımıyla belirlenebilmektedir. Burada  $\omega_2 - \omega_1$  rezonans genliğinin  $\sqrt{2}$  değerine bölünmesiyle elde edilen genliğe karşılık gelen frekans farkını gösterirken,  $\omega_n$  ifadesi rezonans frekansına karşılık gelmektedir. Bu metot ile doğru ölçümler yapabilmek için elde edilen FRF fonksiyonlarındaki maksimum genliklerin doğru olarak ölçülmesi şarttır. Dolayısıyla çekiç testi yapılırken yüksek frekans çözünürlüğünde işlemler yapılmalıdır. Şekil 3.6'da PULSE ölçüm sisteminden alınan rezonans frekansını ve sönüm oranını gösteren FRF grafiği gösterilmiştir. Bu grafik vasıtasıyla doğrudan frekans değeri ve sönüm oranı okunabilir. Deneysel çalışmada

hazırlanan bal peteği sandviç kompozit numunelerin doğal frekansları ve sönüm oranları bu şekilde belirlenmiştir.



**Şekil 3.6.** PULSE ölçüm sisteminden alınan rezonans frekansını ve sönüm oranını gösteren FRF grafiği (Şakar vd. 2011)

Deneylerde kullandığımız sertleşmiş poliüretan köpükten, genişliği  $b=1,9$  mm, yüksekliği  $h=1$  mm ve uzunluğu  $l=11,4$  mm olan dikdörtgenler prizması şeklinde bir numune alınarak, ankastre-serbest sınır şartında, Pulse titreşim ölçüm seti vasıtasıyla sönüm davranışı Şekil 3.7’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



**Şekil 3.7.** Denede kullanılan poliüretan köpüğün sönüm davranışı

Yukarıdaki grafikten yararlanarak hazırladığımız numunenin periyodunu, frekansını, sönüm oranını ve elastisite modülünü bulmak için aşağıdaki işlemler yapılmıştır.

Grafikten salınım sayısı,  $n = 23$

ilk genlik,  $x_0 = 0,305613 \text{ mm}$

son genlik,  $x_n = 0,004851 \text{ mm}$

ilk genlik geçen süre,  $t_0 = 0,89686 \text{ sn}$

ve son genlik için geçen süre,  $t_n = 1,58686 \text{ sn}$  olarak okunmuştur.

Periyot ,

$$T_d = \frac{t_n - t_0}{n} \quad (3.2)$$

formülü ile ve frekans,

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T_d} \quad (3.3)$$

formülü vasıtasıyla bulunur.

Poliüretan köpüğün logaritmik azalması,

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{x_0}{x_n} \right) \quad (3.4)$$

formülünden  $\delta = 0,180136$  olarak bulunur.

Sönüm oranı ise,

$$\zeta = \frac{\delta^2}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (3.5)$$

formülünden  $\zeta = 0,028658$  olarak bulunmuştur.

Ayrıca numunenin kütlesi,  $m = 0,89 \text{ gr}$ ,

hacmi,  $V = 21.66 \text{ cm}^3$  olarak ölçülmüştür.

Dolayısıyla deneylerde kullandığımız poliüretanın yoğunluğu,  $\rho = 41 \text{ kg/m}^3$  olarak bulunmuştur.

Atalet momenti,

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.6)$$

formülünden  $I = 1,5833 \times 10^{-9} m^4$  olarak hesaplanmıştır.

Ankastre-serbest sınır şartı için, frekans parametresi ve mod şekilleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Burada  $\beta^2$  frekans parametresi olup değeri sınır koşullarına ve mod şekillerine göre değişmektedir. Deneylerde kullandığımız numunelerde,

$$\omega = \frac{\beta^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.7)$$

doğal frekans formülünden elastisite modülü,  $E = 2\,950\,930,181 Pa$  olarak bulunmuştur.

**Çizelge 3.3.** Ankastre-serbest sınır şartı için frekans parametresi ve mod şekilleri (Rao 1990)

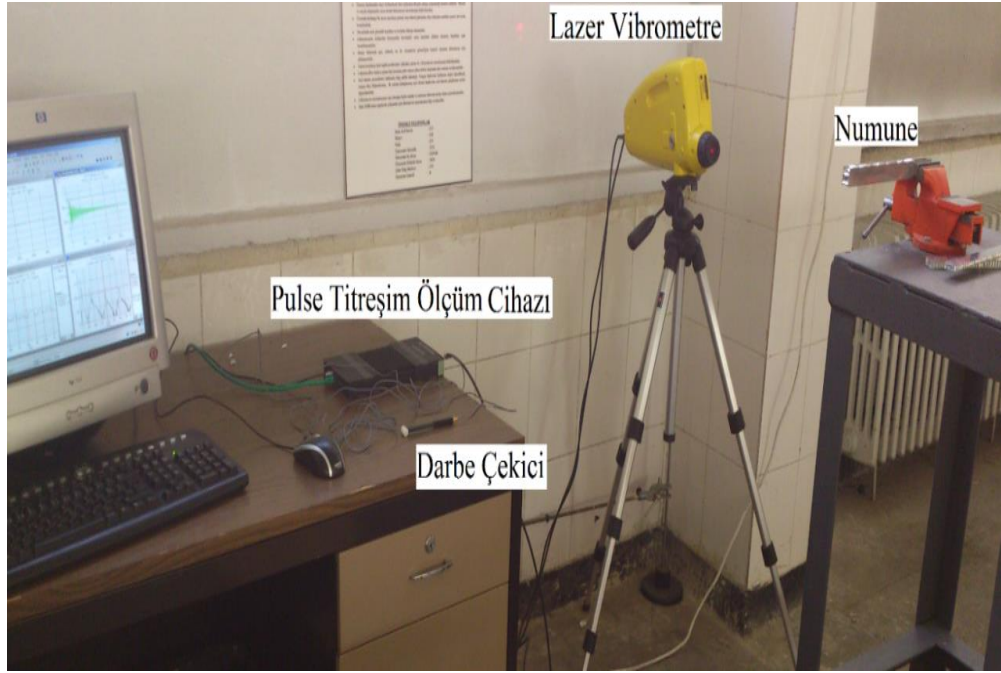
Sınır Şartları	Modlar	$\beta^2$	Ankastre-Serbest
Ankastre-Serbest	I.mod	3.52	
	II.mod	22.03	
	III.mod	61.7	

Çizelge 3.4'te alt ve üst levha ile çekirdek malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir. Üretici firma kataloglarından plaka ve çekirdeğin özellikleri, deneysel sonuçlardan ise poliüretan köpüğün elastisite modülü ve yoğunluğu tespit edilmiştir. Poliüretan köpüğün poisson oranı literatürden alınmıştır (Target 2010; Widdle 2008).

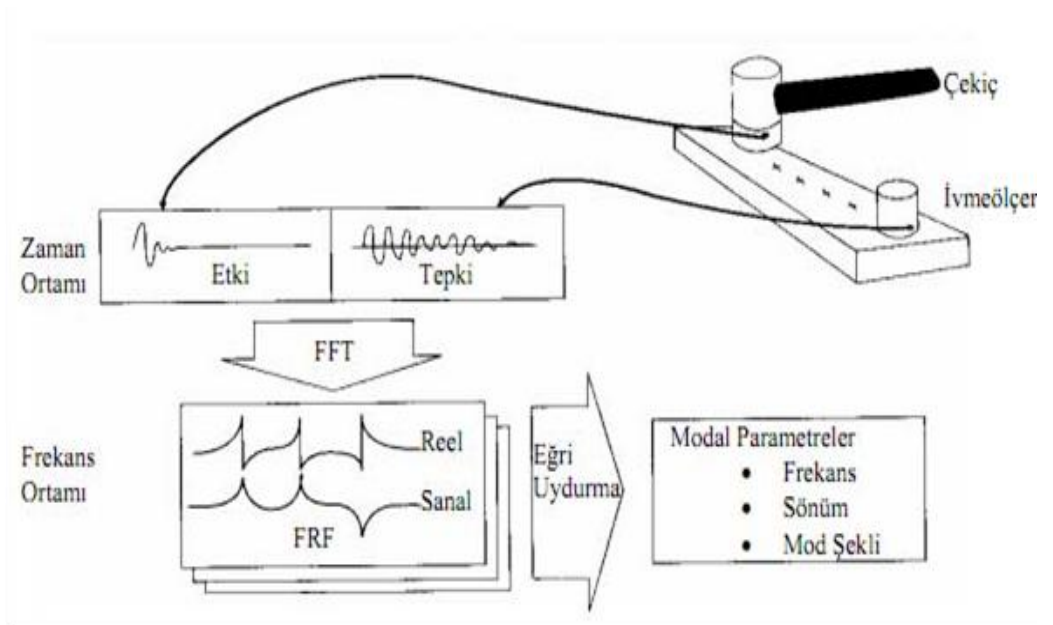
**Çizelge 3.4.** Alt-üst levha ve çekirdek malzemenin mekanik özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )	Poisson Oranı
Alüminyum Levha	71 000	2 770	0,33
Alüminyum Bal peteği Çekirdek	69 000	2 870	0,3
Poliüretan Köpük	2,9513	41	0,432

Şekil 3.8’de ankastre-serbest sınır şartı için numunelerin doğal frekans ve sönüm oranlarını belirlediğimiz deney düzeneği gösterilmiştir. Şekil 3.9’da ise Pulse titreşim ölçüm sisteminin çalışma şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Deney düzeneği



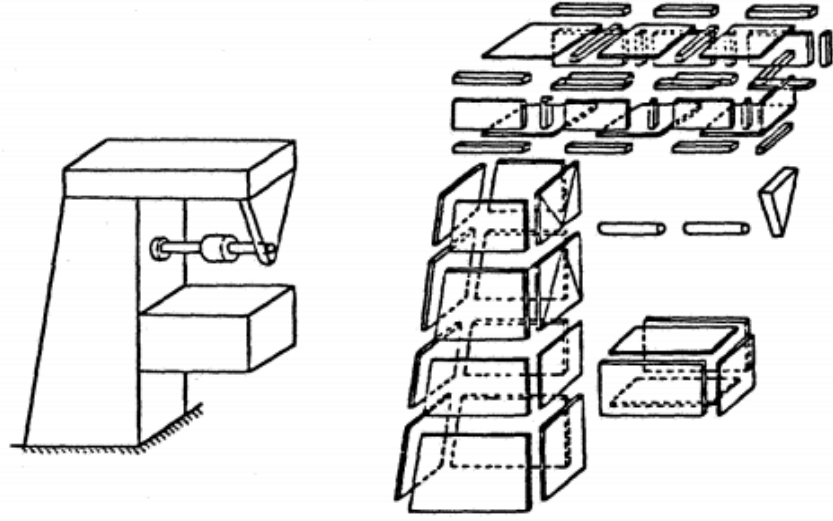
Şekil 3.9. Etki ile titreşim ölçüm sistemlerinin genel çalışma prensibi (Schwarz and Richardson 1999)

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi

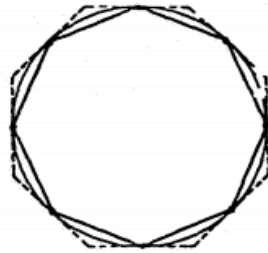
Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal methodur. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu methodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarıyla kullanılabilceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar methodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi methodlardan birisi olmuştur. Methodun değişik mühendislik alanları için bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir. Bu yöntem ile bir problemi çözerken sınır şartları, kuvvetler ve malzeme özellikleri gibi değişkenler rahatlıkla değiştirilebilir.

Sonlu elemanlar methodundaki temel düşünce, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olmasından dolayı kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir. Bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Mevcut klasik matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalmaları durumunda ise sonlu elemanlar methodu kullanılabilcek tek method olmaktadır. Sonlu elemanlar methodunda, çözüm bölgesi, çok sayıda, basit, küçük, birbirine bağlı, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Bu methodun, freze tezgâhı gibi karmaşık bir geometrik şekli modellemek için nasıl kullanılabilceği Şekil 3.10'da verilmiştir. Örneğin böyle bir tezgâhının çalışması esnasında oluşacak olan deplasmandan, gerilmeleri kesin olarak bulmak hemen hemen imkânsız olduğundan, tezgâh şeklinde görülen parçalara ayrılarak modellenmiştir.



**Şekil 3.10.** Freze tezgâhının sonlu elemanlar ile modellenmesi (Arıkan 2010)

Metoda sonlu elemanlar isminin verilmesi yeni ise de, sonlu elemanlar düşüncesi gerçekte günümüzden birkaç yüzyıl önce kullanılmıştır. İlk matematikçiler bir dairenin çevresini, Şekil 3.11’de görüldüğü gibi, daireyi çokgene indirgeyerek (problemi basitleştirerek) hesaplamışlardır. Günümüzün deyişi ile bu çokgenin her kenarı bir sonlu elemandır. Bu basit çözümün incelenmesi sonucunda genel sonlu eleman uygulamalar için de geçerli olan iki özellik ortaya çıkmaktadır. Dairenin dışındaki ve içindeki çokgenlerin çevreleri, dairenin çevresinin üst ve alt sınırlardır. Çokgenin kenar sayısının artırılması ile, bu yöntemle bulunacak olan yaklaşık çözüm yukarıdan veya aşağıdan gerçek çözüme ulaşacaktır.



**Şekil 3.11.** Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı vasıtasıyla bulunması (Arıkan 2010)

### 3.2.2. Sonlu elemanlar yönteminin uygulama alanları

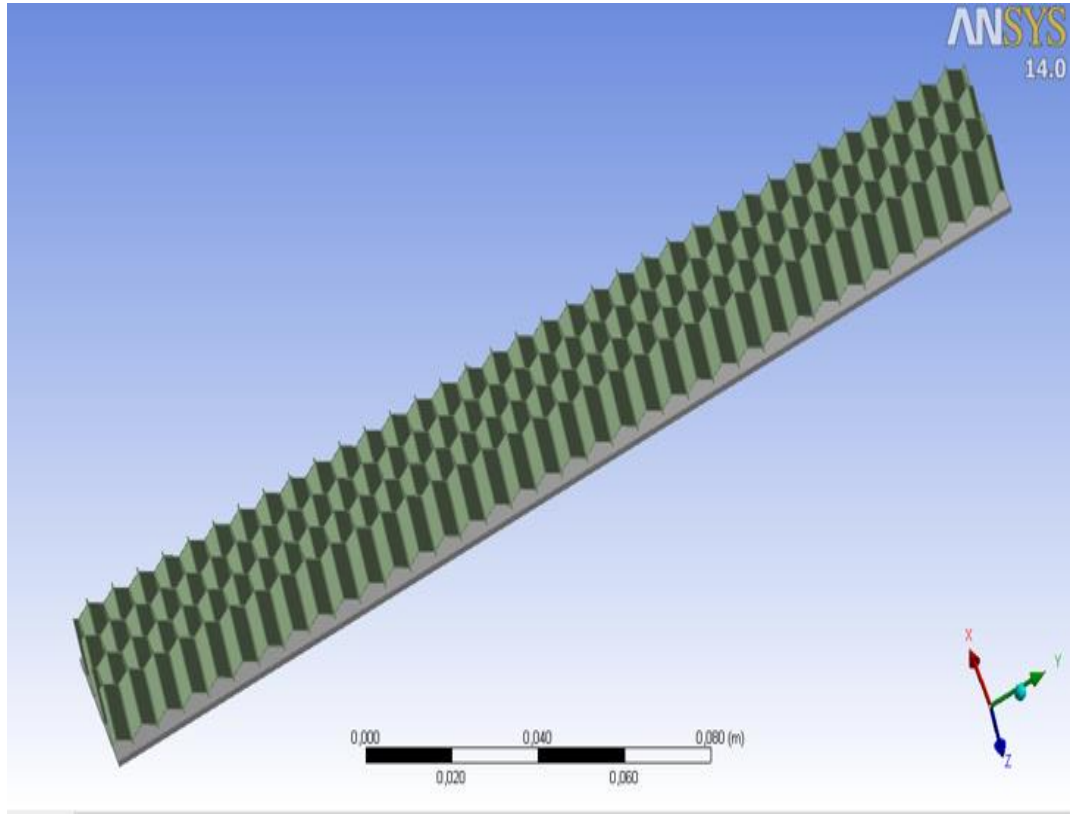
Sonlu Elemanlar Yöntemi, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Mühendislik sistemlerindeki karmaşık problemlerin sıradan yöntemlerle çözümü oldukça zor olduğundan, sonlu elemanlar yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizi, harmonik analiz, modal analiz, akustik analiz gibi bir çok mühendislik analizlerini Rayleigh-Ritz, Potansiyel enerji, Galarkin, Gauss eliminasyon metodu gibi yaklaşımlarla gerçekleştirilmektedir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi, lineer ve lineer olmayan statik-dinamik yapısal analizler, mekanik problemleri, ısı transferi ve akış problemleri ile elektromanyetik alanlar ile ilgili mühendislik problemlerinin çözümü için de kullanılmaktadır. Yöntemin bu kadar çok uygulama alanı bulmasının nedenlerinden birisi, değişik mühendislik problemlerinin arasındaki benzerliklerdir.

### 3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi analizleri

Deneysel olarak incelediğimiz numunelerin nümerik analizlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi bu tür yapıların titreşim analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada nümerik analizler sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan ANSYS 14 paket programı kullanılmıştır.

ANSYS yazılımı mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan etkileşimlerini simule etmekte (benzeştirmekte) kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının simule edilmesine olanak sağlayan ANSYS, ürünlerin henüz ilk örnekleri üretilmeden sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlar. Ayrıca sanal ortamda üç boyutlu simülasyonlar neticesinde yapıların zayıf noktaların tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır (Figs 2013).

Deneyleerde kullandığımız numunelerin birebir geometrik şekli Solidworks programında çizilip, ANSYS programının daha kullanışlı bir arayüzü olan Workbench vasıtasıyla titreşim analizleri yapılmıştır. Dolu ve boş olmak üzere toplam 18 adet farklı model oluşturulmuştur. Numunelere uygulanan işlemler birbirleriyle benzerlik gösterdiği için; yüzey levha kalınlığı 1,3 mm, bal peteği çekirdek kalınlığı 15 mm, uzunluğu 227 mm, genişliği 25 mm ve içi poliüretan köpük doldurulan L numunesi ele alınmıştır. Şekil 3.12’de Solidworks programında çizilip ANSYS Workbench’e alınan sandviç yapı gösterilmiştir.

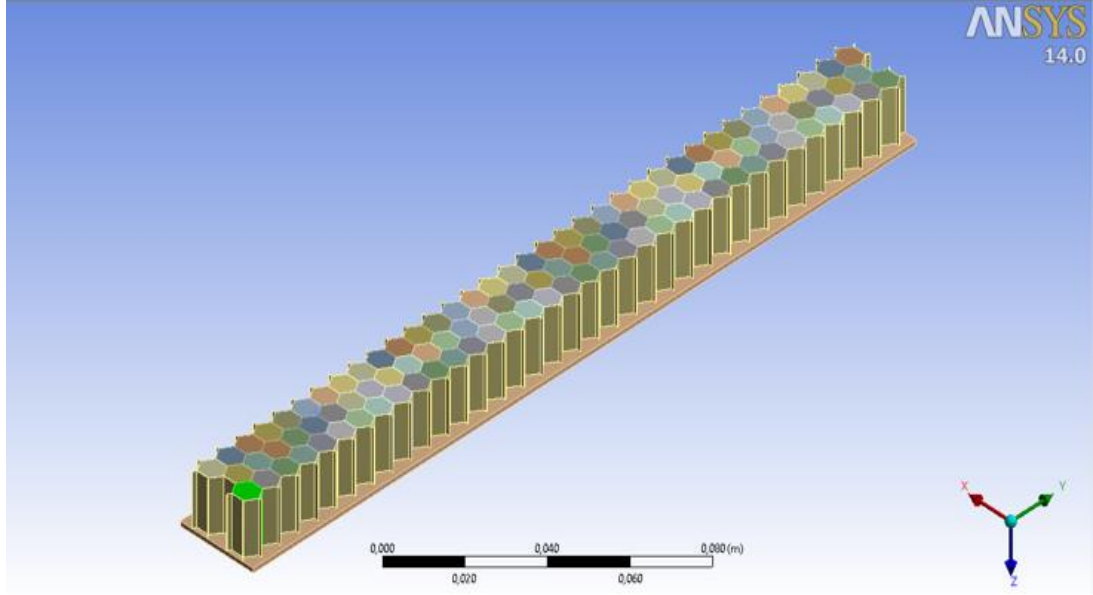


**Şekil 3.12.** Solidworks programında çizilip ANSYS Workbench’e alınan sandviç yapı

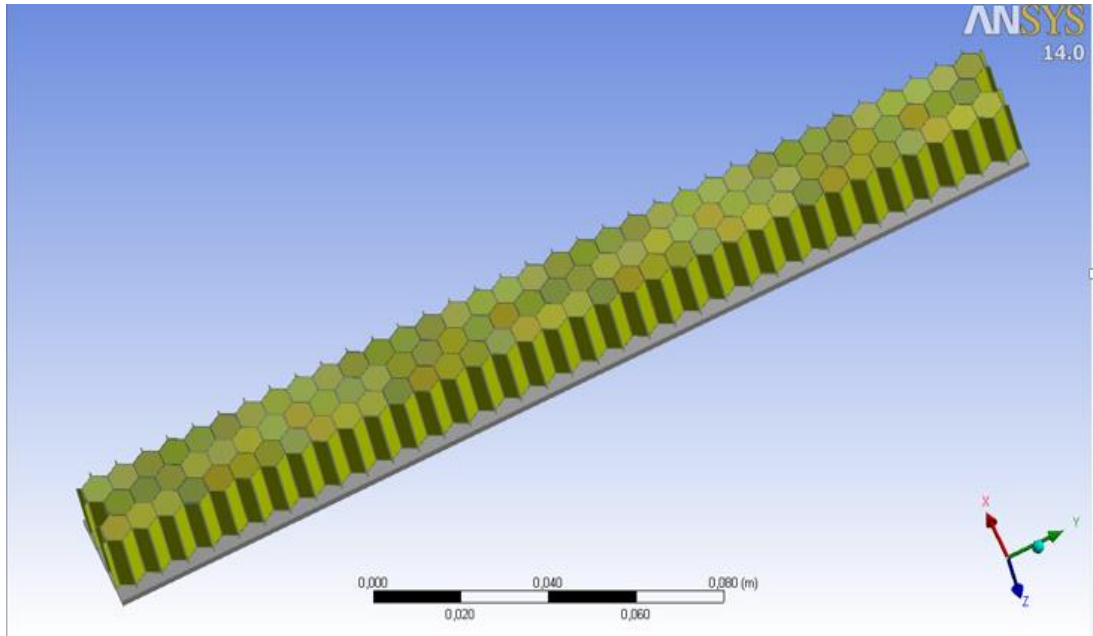
Şekil 3.13’de Workbench’in araç menüsünde “Fill” aracı kullanılarak, sandviç yapının boş olan petek içleri doldurulmuştur.

Şekil 3.14’de poliüretan köpük, içine doldurulduğu bal peteği çekirdekle sıkı bir şekilde yapıştığı için, sonlu eleman ağ yapısını (mesh) daha kolay örebilmek amacıyla bu iki

malzemenin tam olarak birleştigi kabul edilmiştir.

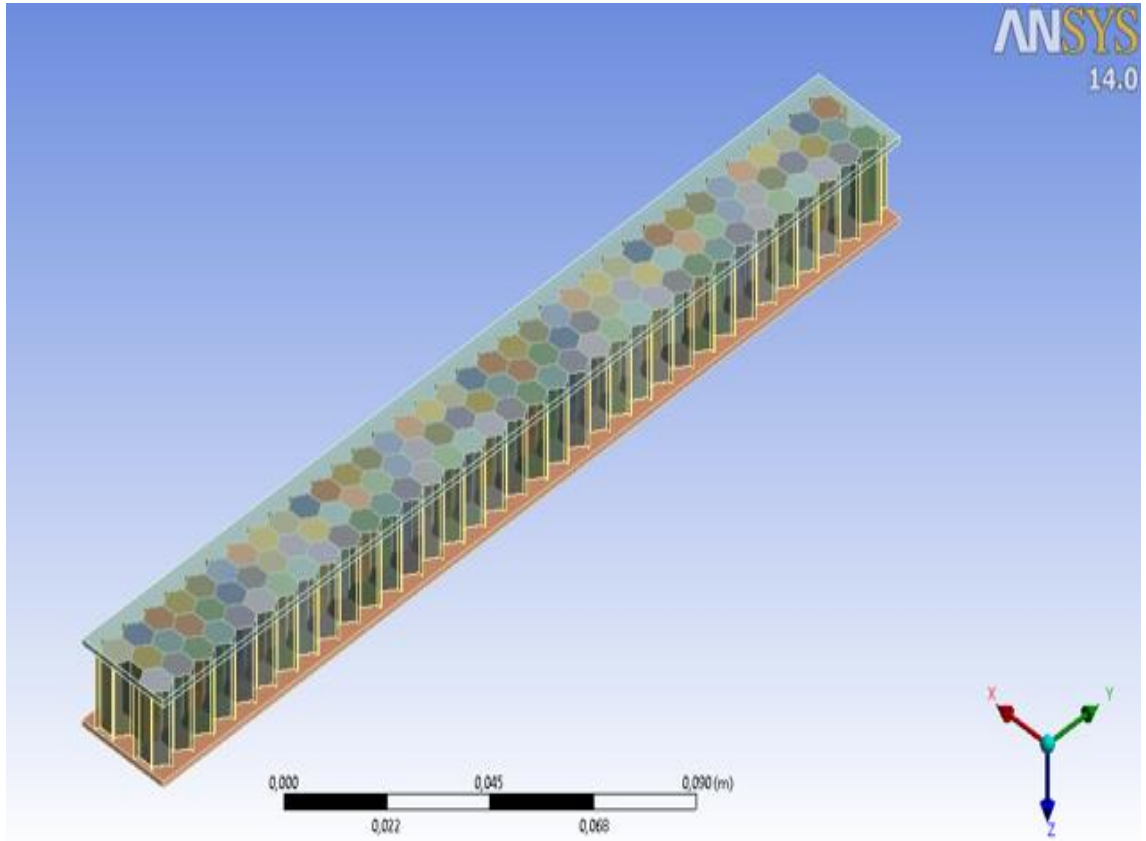


Şekil 3.13. İçi poliüretan köpük doldurulan bal peteği çekirdek

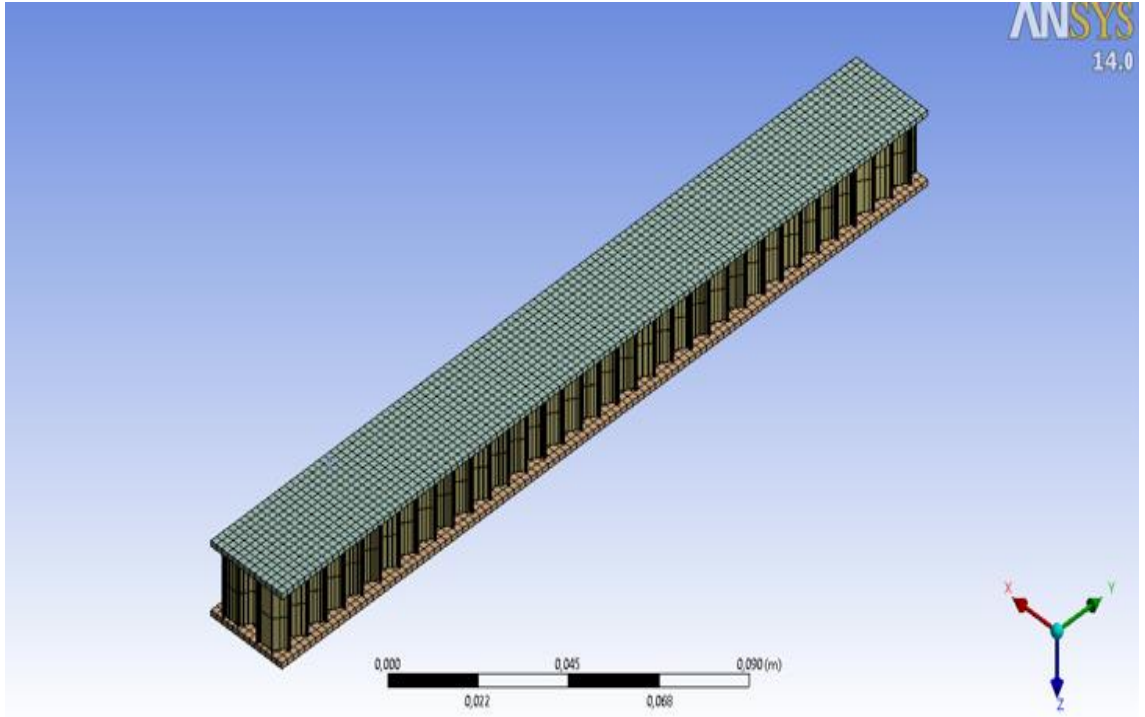


Şekil 3.14. Bal peteği çekirdek ve poliüretan köpüğün tam olarak birleştirilmesi

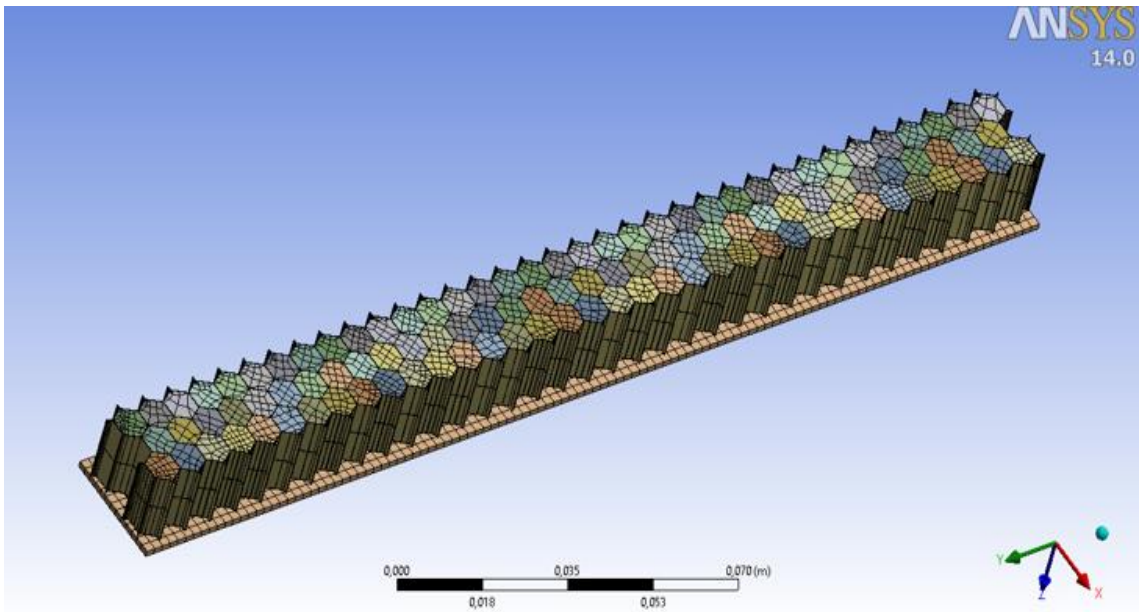
Şekil 3.15'te ANSYS Workbench'te petek ile yüzey levhalarının birleşme biçimleri tanıtılmıştır. Şekil 3.16'da Sandviç kompozit yapının meshleme yapılmış hali ve Şekil 3.17'de sonlu eleman ağ örgüsü (meshleme) gösterilmiştir.



**Şekil 3.15.** ANSYS Workbench'te petek ile yüzey levhalarının birleşme biçimleri



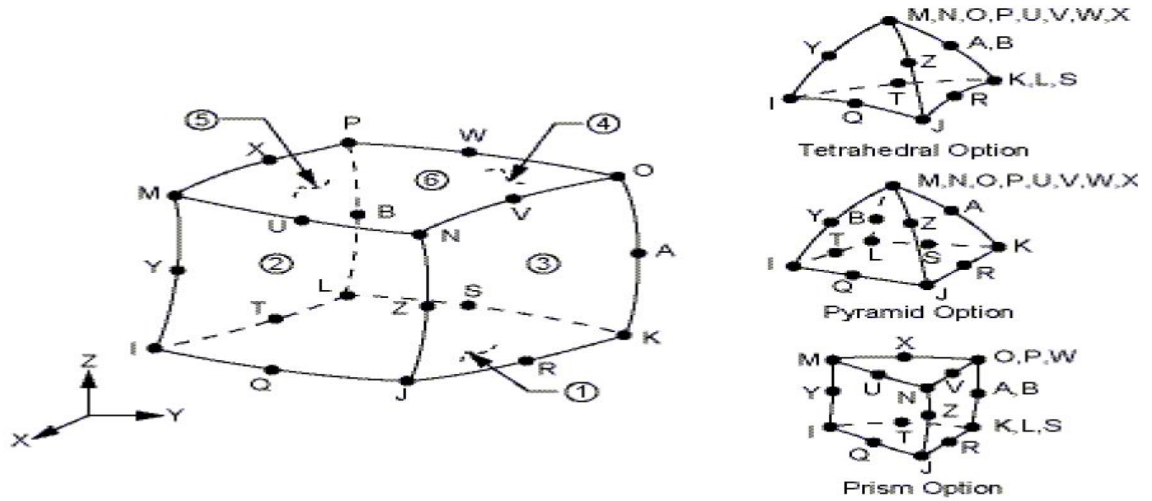
Şekil 3.16. Sandviç kompozit yapının meshlenmesi



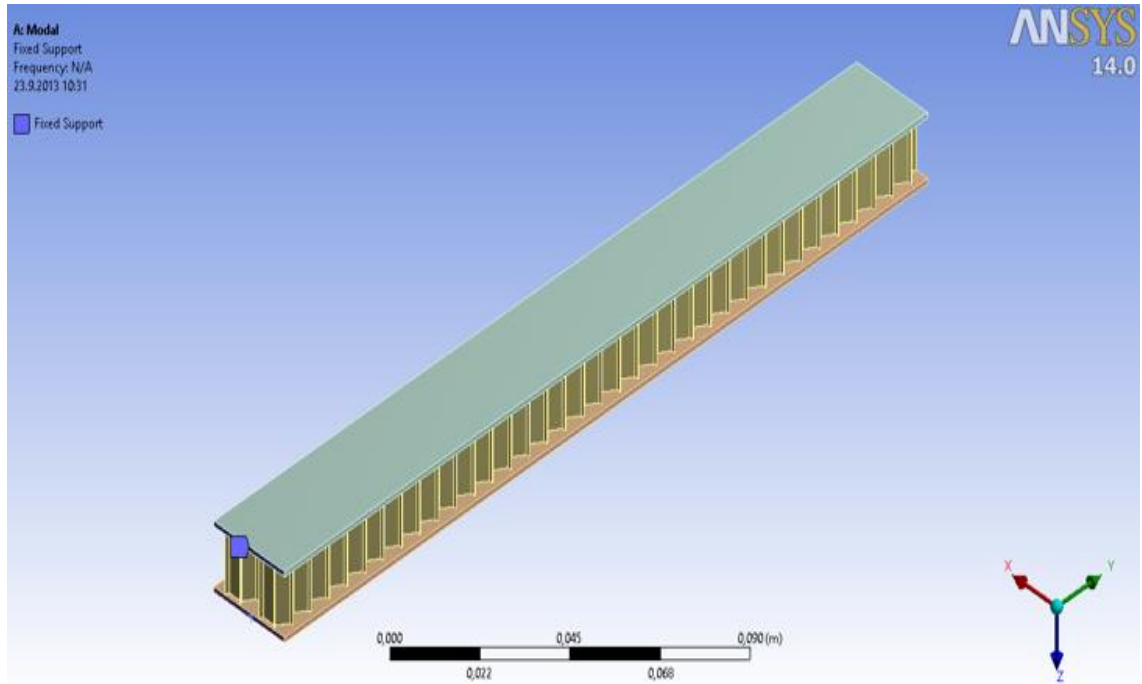
Şekil 3.17. Bal peteğindeki sonlu eleman ağ örgüsü (Meshleme)

Ağ örgüsünde (meshlemede); Şekil 3.18’de gösterilen SOLID186 (3 boyutlu 20 nodlu homojen yapısal katı geometrik eleman), diğer eleman tiplerinden CONTA174 (3

boyutlu 8 nodlu yüzey-yüzey birleşme elemanı) ve TARGE170 (yüzey elemanı) kullanılmıştır. L numunesi için toplam 12686 eleman ve 66172 nod kullanılmıştır. Diğer numunelerde bu sayılar değişmektedir. Şekil 3.19'da ankastre-serbest sınır şartının uygulanması gösterilmiştir.



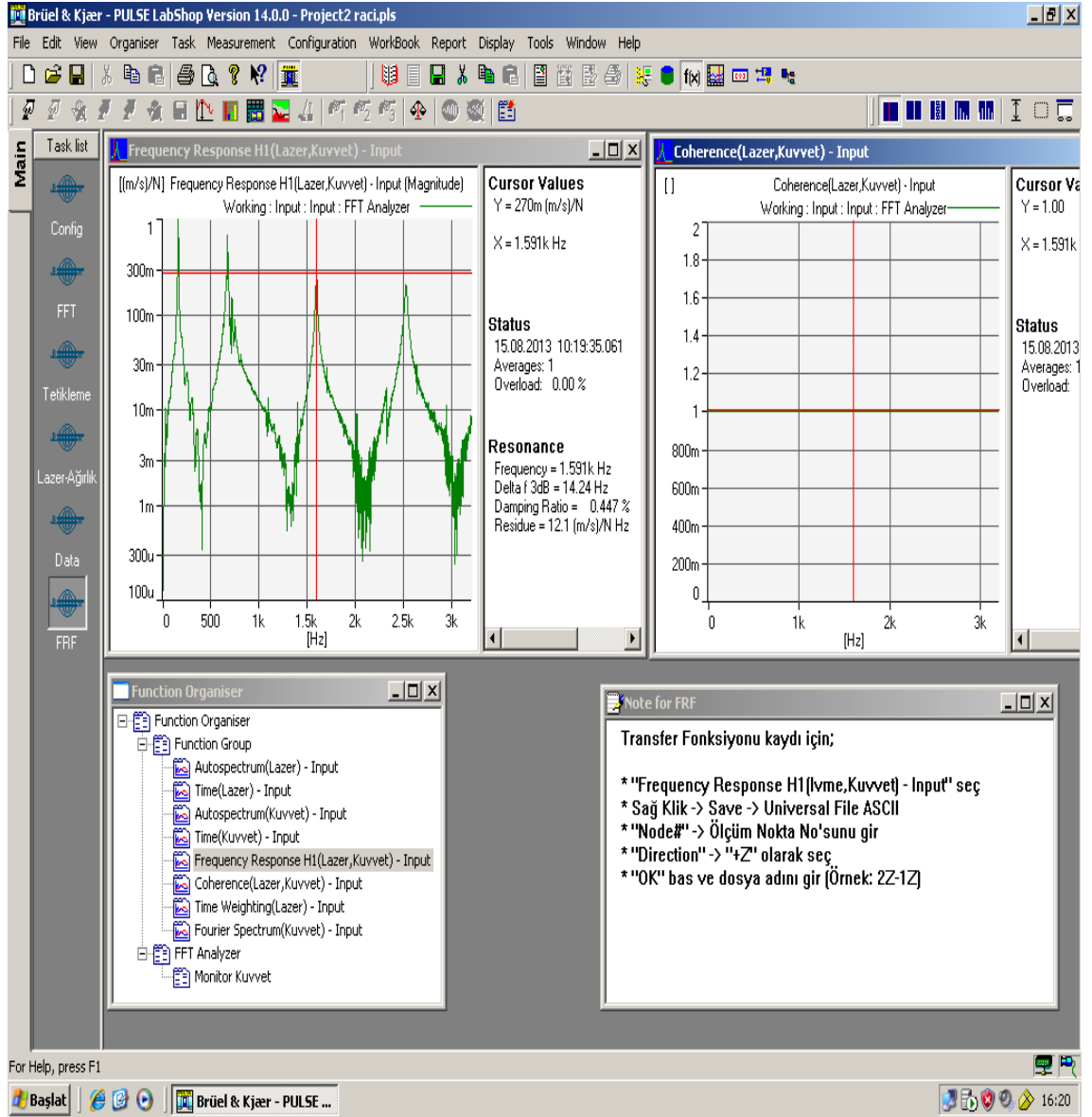
Şekil 3.18. Meshlemede kullanılan bazı eleman tipleri (ANSYS 2012)



Şekil 3.19. Ankastre-serbest sınır şartının uygulanması

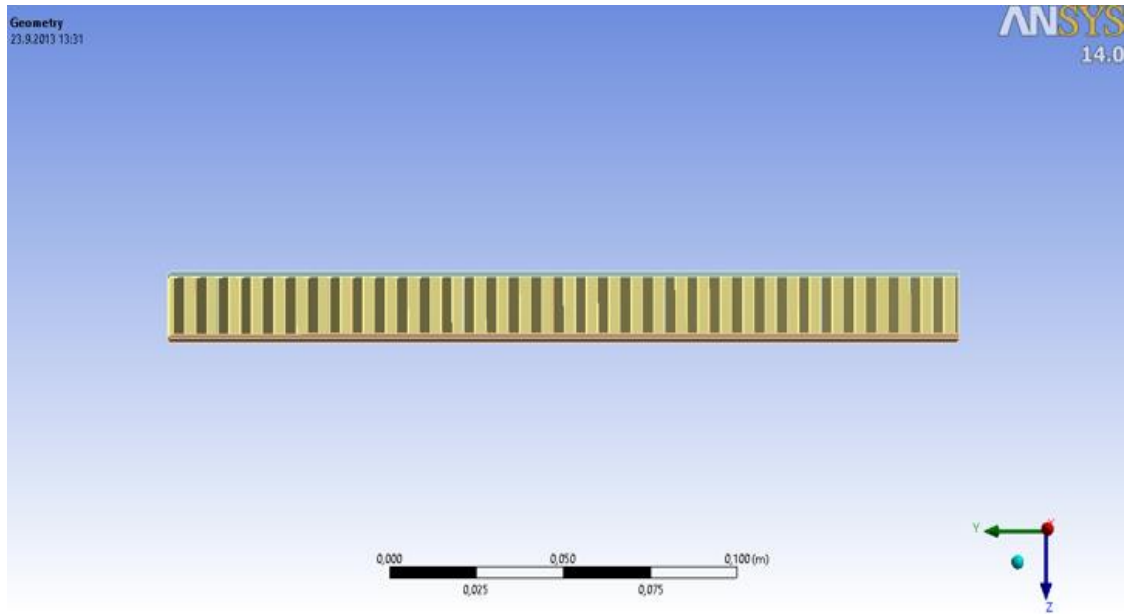
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Deney için hazırlanan bir numunenin Pulse titreşim ölçüm seti vasıtasıyla elde edilen frekans ve sönüm değerleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

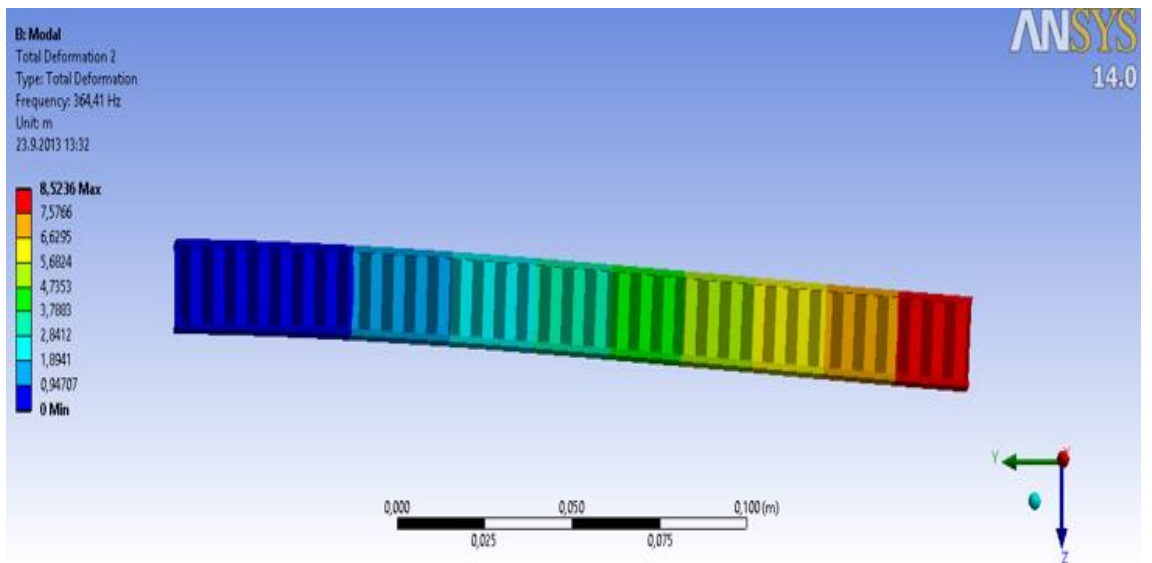


Şekil 4.1. Pulse titreşim ölçüm sisteminden alınan frekans ve sönüm oranını gösteren ekran görüntüsü

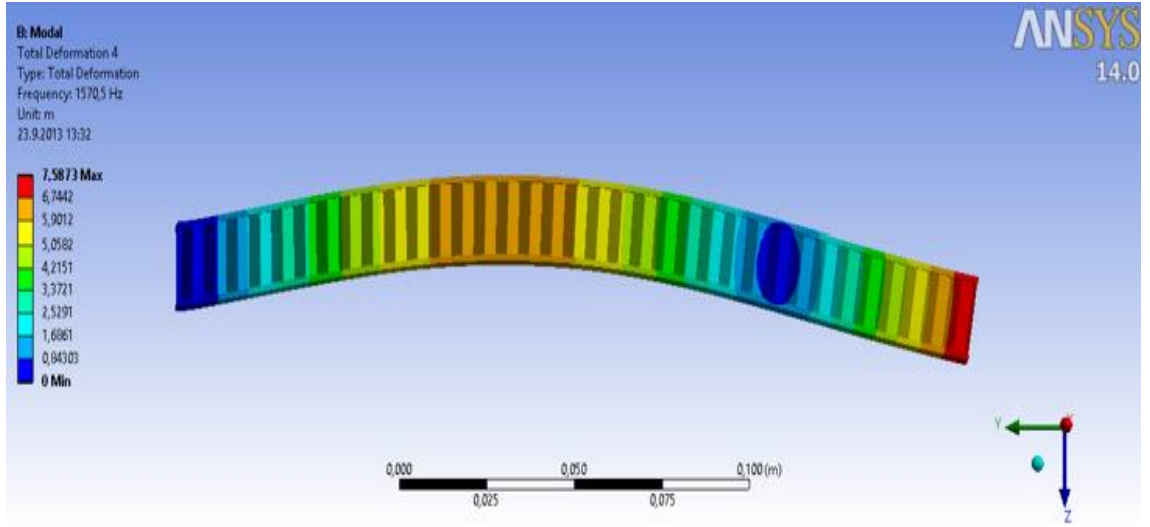
Şekil 4.2’de numunenin normal hali, Şekil 4.3’de numunenin ilk doğal frekansı ve mod şekli, Şekil 4.4’de numunenin ikinci doğal frekansı ve mod şekli ve Şekil 4.5’de numunenin üçüncü doğal frekansı ve mod şekli gösterilmiştir. Diğer numuneler içinde benzer mod şekilleri elde edildiği için onların mod şekilleri gösterilmemiştir. Değişen kısım sadece doğal frekanslardır.



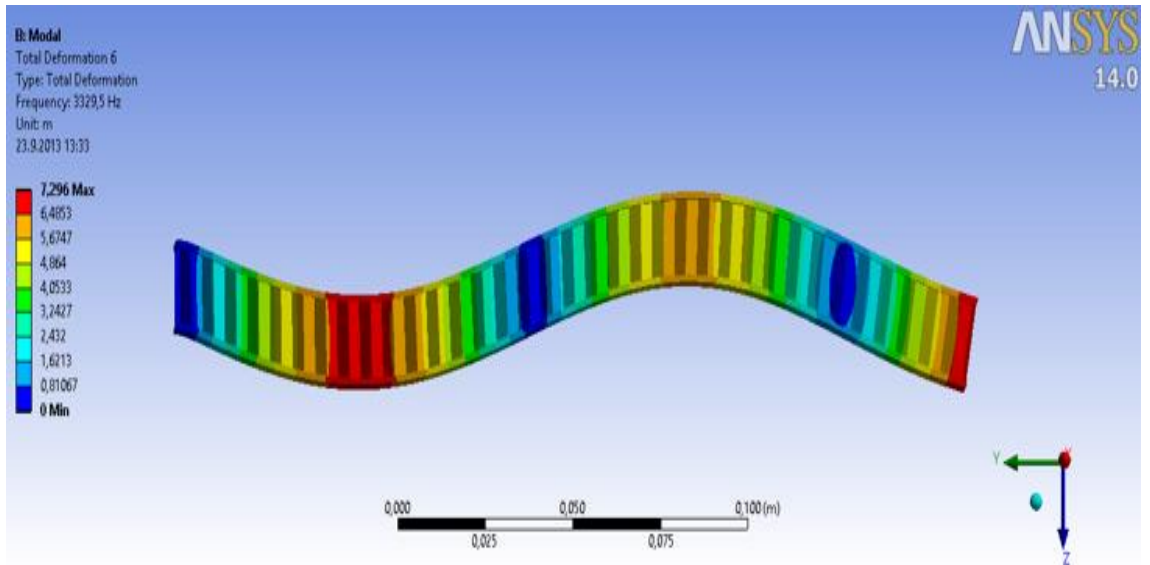
Şekil 4.2. Numunenin normal hali



Şekil 4.3. Numunenin ilk doğal frekansı ve mod şekli



**Şekil 4.4.** Numunenin ikinci doğal frekansı ve mod şekli



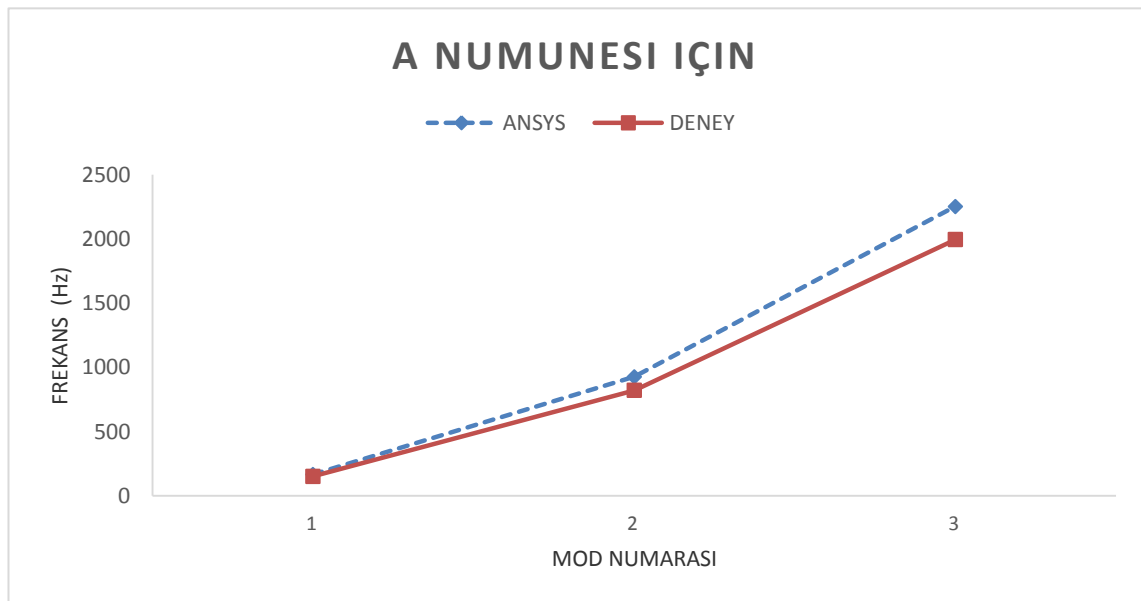
**Şekil 4.5.** Numunenin üçüncü doğal frekansı ve mod şekli

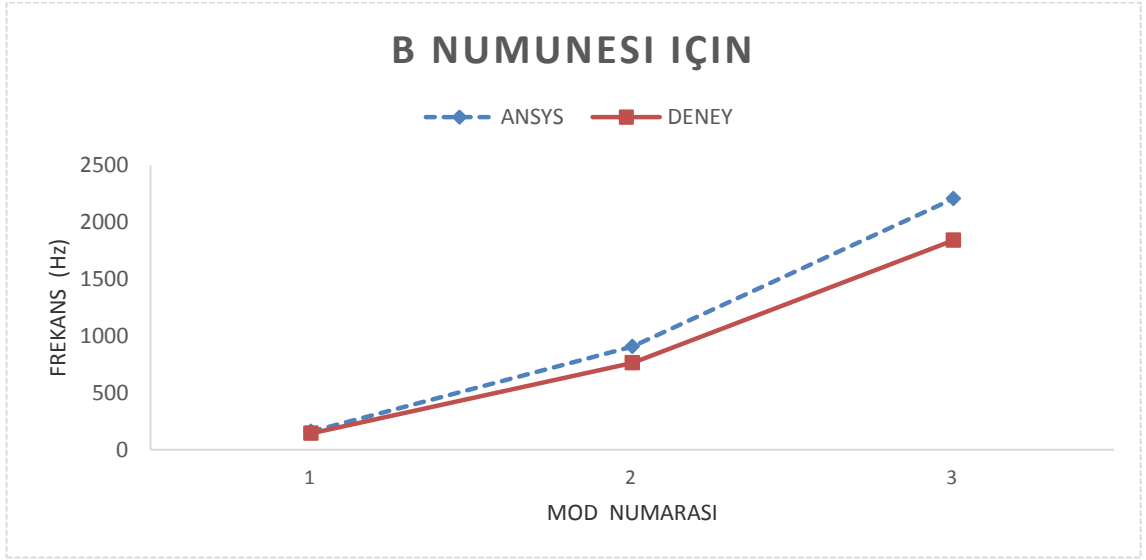
Diğer tüm numuneler için, aynı yöntemle sonuçlar elde edilmiş ve nümerik sonuçlardan elde edilen değerlerle birlikte Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Şekil 4.6’da A numunesinin, Şekil 4.7’de ise B numunesinin deneysel ve nümerik ilk üç doğal frekans değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.8’de 0,6 mm levha kalınlığına sahip içi boş çekirdekler için deneysel ve nümerik ilk doğal frekans değerleri gösterilmiştir.

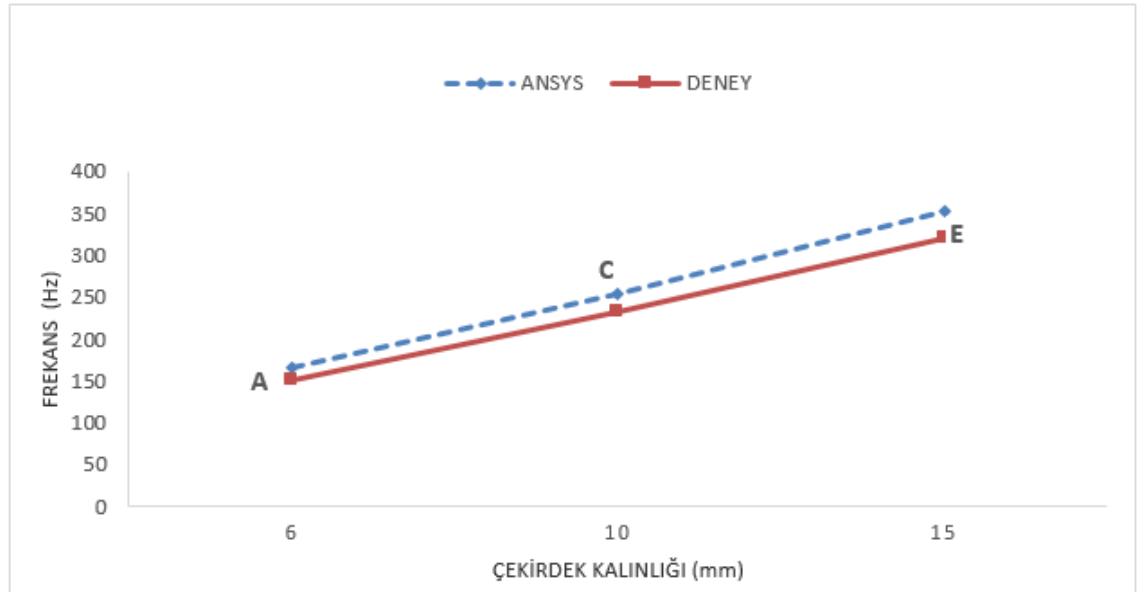
**Çizelge 4.1.** Deneysel ve nümerik olarak belirlenen frekans değerleri ve hata oranları

Numune Adı	İlk Doğal Frekans ANSYS (Hz)	İlk Doğal Frekans DENEY (Hz)	Hata Oranı %
A	166,35	151	9,22
B	162,85	145	10,96
C	254,37	232	8,79
D	246,21	222	9,83
E	352,03	320	9,09
F	336,79	305	9,43
G	186,22	165	11,39
H	184,24	159	17,49
I	274,23	244	11,02
J	269,63	235	12,84
K	373,25	326	12,65
L	364,41	314	13,83
M	193,54	167	13,71
N	191,83	162	16,59
O	279,94	247	11,76
P	276,05	241	12,69
R	376,94	339	10,06
S	369,45	327	11,49

**Şekil 4.6.** İçi boş numunenin deneysel ve nümerik ilk üç doğal frekans değerleri



**Şekil 4.7.** İçi poliüretan köpük ile dolu numunenin deneysel ve nümerik ilk üç doğal frekans değerleri

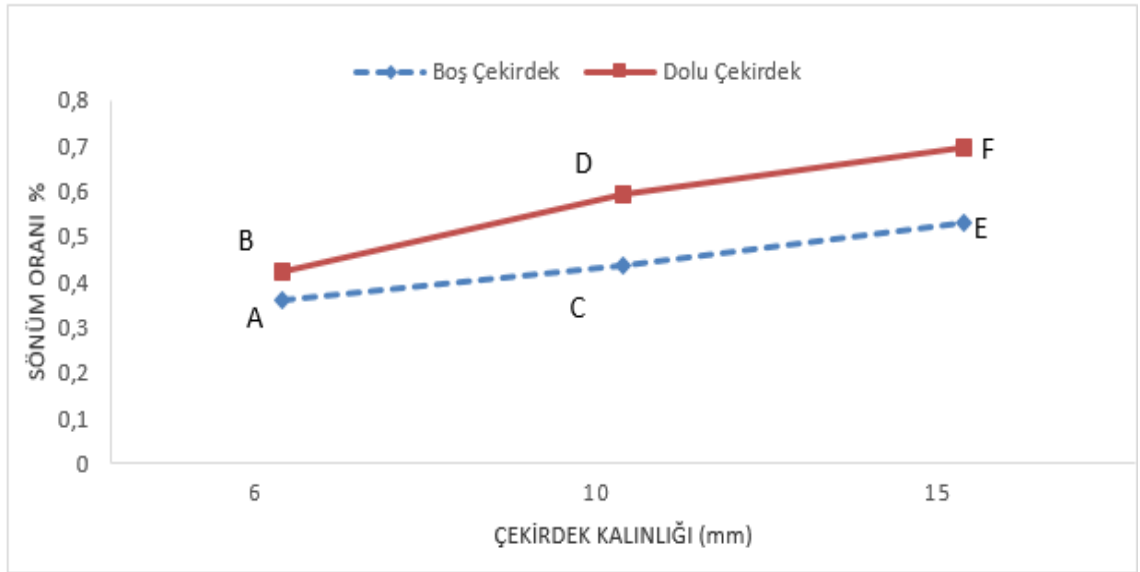


**Şekil 4.8.** A, C ve E numunelerinin deneysel ve nümerik ilk doğal frekans değerleri

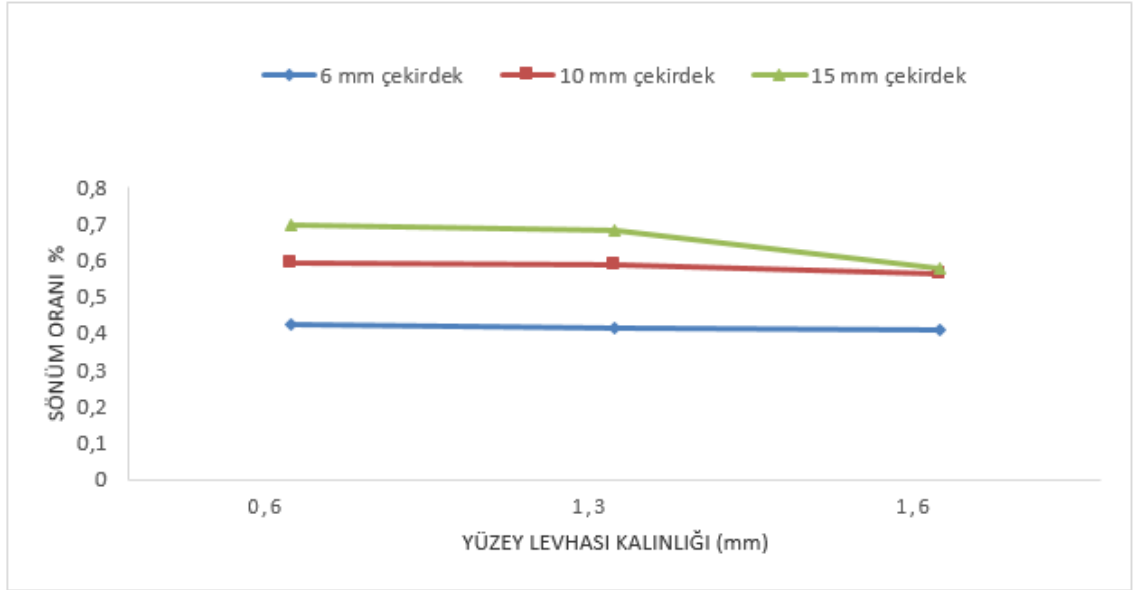
Çizelge 4.2’de deneyler neticesinde elde edilen sönüm oranları bir tablo halinde verilmiştir. Şekil 4.9’da yine plaka kalınlığı sabit tutulup çekirdek kalınlıklarının değiştirilmesi durumunda içi boş ve içi poliüretan köpükle dolu numunelerin deneysel olarak elde edilen ilk doğal frekans değerleri için sönüm oranlarının değişimi gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Deneysel olarak tespit edilen sönüm oranları

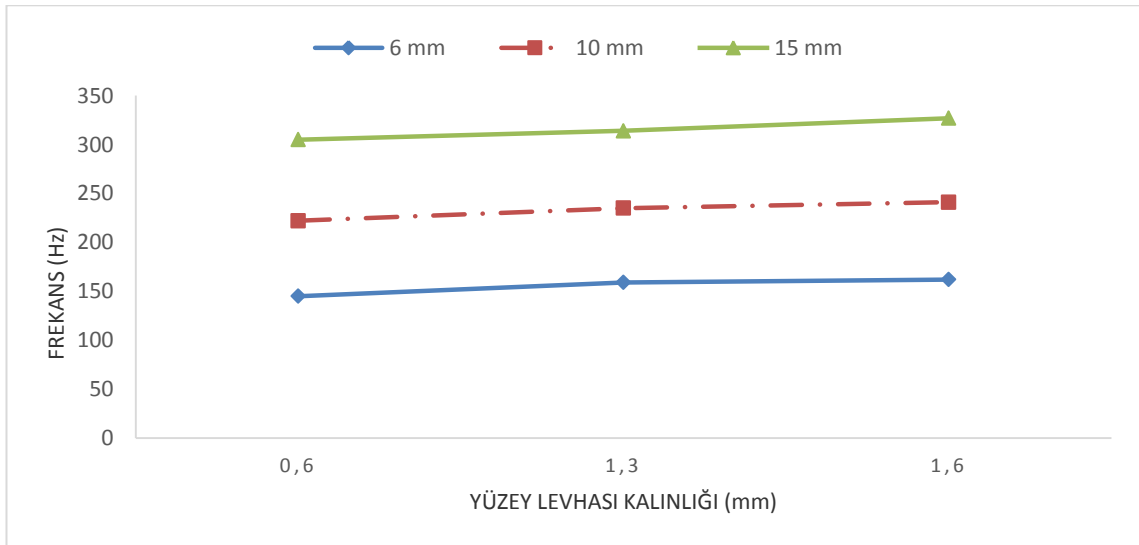
Çekirdek Kalınlığı (mm)	0,6 mm alt-üst plaka		1,3 mm alt-üst plaka		1,6 mm alt-üst plaka	
	Boş Çekirdek	Dolu Çekirdek	Boş Çekirdek	Dolu Çekirdek	Boş Çekirdek	Dolu Çekirdek
6	0,362	0,424	0,331	0,413	0,309	0,407
10	0,436	0,592	0,412	0,588	0,406	0,562
15	0,531	0,695	0,512	0,683	0,501	0,578

**Şekil 4.9.** 0,6 mm levha kalınlığında, farklı çekirdek kalınlıkları için, içi boş ve içi poliüretan köpük ile dolu numunelerde çekirdek kalınlığının sönüm oranına etkileri

Şekil 4.10'da ve Şekil 4.12'de içi poliüretan köpük ile dolu numunelerde, çekirdek ve plaka kalınlığı değişiminin sırasıyla sönüm oranına ve frekansa etkileri gösterilmiştir.



**Şekil 4.10.** İçi poliüretan köpük ile dolu numunelerde çekirdek ve plaka kalınlığının sönüm oranına etkileri



**Şekil 4.11.** İçi poliüretan köpük ile dolu numunelerde çekirdek ve plaka kalınlığının frekansa etkileri

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, içi boş ve içi poliüretan köpük dolu bal peteği sandviç malzemelerin titreşim analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar için çekirdek ve yüzey levha kalınlıkları değiştirilerek farklı konfigürasyonlarda sandviç kompozit malzemeler üretilmiştir. Bu numunelerin titreşim deneyleri PULSE titreşim ölçüm seti ile yapılmış ve doğal frekansları ve sönüm oranları tespit edilmiştir. Ayrıca deneysel olarak çalıştığımız numuneler, Solidworks programı ile modellenmiş, ANSYS paket programı vasıtasıyla doğal frekansları ve mod şekilleri tespit edilmiştir.

1. Çalışmada elde edilen sonuçların, literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür (Li and Croker 2006).
2. Köpük dolgululu numuneler boş numunelerle karşılaştırıldığında, poliüretan köpükle doldurulan numunelerin doğal frekanslarında azalmaya karşın sönüm oranlarında artış gözlenmiştir.
3. Poliüretanla doldurulmuş numunelerle yapılan çalışmalarda, aynı yüzey levha kalınlığı için çekirdek kalınlığı arttıkça numunelerin sönüm oranlarında ve frekanslarında artma olduğu görülmüştür.
4. Poliüretanla doldurulmuş numunelerle yapılan çalışmalarda, çekirdek kalınlığı sabit tutulup yüzey levha kalınlığının artması durumunda ise sönüm oranlarında düşüş fakat frekans değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir.

ANSYS den elde ettiğimiz nümerik çözümler ile deneysel olarak elde ettiğimiz sonuçlar arasında yaklaşık olarak %10'luk bir hata payı vardır. Bunun sebebi olarak, numunelerin üretilmesi, peteklerin poliüretan köpükle doldurulması, yapıştırılması ve ölçüm esnasında oluşan hatalar gösterilebilir. Birçok uygulama alanı olan bal peteği sandviç kompozit yapılara, poliüretan köpük takviyesi yapıldığı takdirde, ağırlıkça çok az bir artış gözlemlenirken sönüm oranında ciddi bir iyileşme görülmektedir. Çalışma ortamları gereği çarpmaya maruz kalabilecek ulaşım araçlarında kullanılan petek yapıların içinin poliüretan köpükle doldurulmasıyla, bu araçların çarpma vb. kazalardan daha az hasarla kurtulabileceği sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Adams, R. D. and Maheri M. R., 2003. Damping in advanced polymer-matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 355, 126-130,
- Antpanel, Corp. Web Site, <http://www.antpanel.com/tr/poliuretan.pdf/>, (21.04.2013)
- Arıkan, M. A. S., 2010. Sonlu elemanlar metodunun mühendislikte uygulamaları. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, <http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/10944.pdf> (13.8.2013).
- Aydıncak, I., 2007. Investigaton of design and analyses principles of honeycomb structures, Yüksek Lisans Tezi, METU, Ankara.
- Berthelot, J. M., 2006. Damping analysis of laminated beams and plates using the Ritz method. *Composite Structures*, 74, 186-201.
- Bolat F. Ç., 2011. Bal peteği Sandviç Kompozit Yapıların Dinamik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, AU, Erzurum
- Decopal, Corp. Web Site, <http://www.decopol.com.tr/sss.i58.poliuretanin-genel-ozellikleri>, (21.05.2013)
- Figes, Corp. Web.Site, <http://www.figes.com.tr/ansys/ansys-nedir.php>, (15.07.2013)
- Gibson, R. F. 1994. *Principles of Composite Material Mechanics*, Cambridge University Pres, Michigan, USA.
- Hexcel, Corp. Web Site, <http://www.hexcel.com/Markets/>,(04.10.2012; 21.03.2013)
- Hoskin, B. C. and Baker, A. A., 1986. *Composite Materials for Aircraft Structures*. American Institute of Astronautics Inc., 233 p, Orlando, USA.
- Jung, W. J., Aref, A. J., 2003. A combined honeycomb and solid viscoelastic material for structural damping application. *Mechanics and Materials* 53 (8), 831–844.
- Li, Z., Crocker, M. J., 2006. Effects of thickness and delamination on the damping in honeycomb-foam sandwich beams. *Journal of Sound and Vibration* 294, 473–485
- Maheri, M. R., Adams, R. D., 2003. Modal Vibration damping of anisotropic FRP laminates using the Rayleigh-Ritz energy minimization scheme. *Journal of Sound and Vibration*, 259 (1), 17-29.
- Mead, D. J., 1982. A comparison of some equations for the flexural vibration of damped sandwich beams. *Journal of Sound and Vibration*, 83 (3), 363–377.
- Nilsson, E., Nilsson, A.C, 2002. Prediction and measurement of some dynamic properties of sandwich structures with honeycomb and foam cores. *Journal of Sound and Vibration*, 251 (3), 409–430.
- Paik J. K., Thayamballi A. K. and Kim, G. S., 1999. The Strength Characteristics of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels. *Thin Walled Structures*, Vol. 35, 205-231.
- Rao, S. S., 1990, *Mechanical Vibrations*, 2nd Ed., Addison-Wesley, California 95327, 657-740.
- Salam, M. A., Bondok, N. E., 2010. Free vibration characteristics for different configurations of sandwich beams. *IJMME-IJENS*, Vol:10 No:03, 41-54.
- Schwarz B. J., Richardson M. H., 1999. *Experimental Modal Analiz*. Vibrant Technology, Inc., 1-12.

- Shin K. B., Lee J. Y. and Cho S. H., 2008. An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus. *Composite Structures*, Volume 84, Issue 3, 228-240.
- Solmaz, M. Y., Şanlıtürk, İ. H. ve Özben, T., 2010. Petek yapılı sandviç yapılarda köpük dolgunun kritik burkulma yüküne etkisinin sayısal olarak tespiti. 2. Ulusal Tasarım-İmalat-Analiz Kongresi, Balıkesir.
- Şakar, G., Yaman M., Bolat F. Ç., 2010. Alüminyum Bal Peteği Sandviç Yapıların Serbest Titreşim Analizi. OTEKON, Bursa.
- Şakar, G., Yaman, M. ve Bolat, F. Ç., 2010. Bal peteği sandviç kompozit yapıların dinamik analizi, 2.Ulusal imalat ve analiz kongresi, Balıkesir.
- Şakar, G., Yaman, M., Temiz, Ş., GÜLDOĞAN, A. İ., 2011. Tübitak Rapor. Proje No: 108M544: Balpeteği Sandviç Kompozitlerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Erzurum.
- Target, Certificate of conformity, 2010. Target Metal Pazarlam Kimyasal ve Plastik Ürünleri Mümessillik Sanayi Tic. A.Ş., Ankara.
- Widdle, Jr. R. D., Bajaj, A. K. and Davies P., 2008. Measurement of the Poisson's ratio of flexible polyurethane foam and its influence on a uniaxial compression model. *International Journal of Engineering Science* 46, 31-499.
- Zhang, S. H., Chen, H. L., 2006. A study on the damping characteristics of laminated composites with integral viscoelastic layers. *Composite Structures*, 74, 63-69.

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Van'ın Çatak ilçesinde doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Çatak'ta tamamladı. 1998 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. Buradan 2002 yılında mezun oldu. 2002-2010 yılları arasında özel sektörde farklı kurumlarda çalıştı. 2010 yılında Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Makine Teorisi Ve Dinamiği Anabilimdalı'na ÖYP kapsamında Araştırma Görevlisi olarak atandı. Ekim 2011 yılından itibaren lisanüstü eğitimini yapmak üzere Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilimdalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görevlendirildi.