



**PARTİKÜL KATKILI KOMPOZİT
KİRİŞLERİN DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Emrah Emin ÖZBALDAN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı
Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU
2017
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PARTİKÜL KATKILI KOMPOZİT KİRİŞLERİN DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Emrah Emin ÖZBALDAN

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

**PARTİKÜL KATKILI KOMPOZİT KİRİŞLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU danışmanlığında, Emrah Emin ÖZBALDAN tarafından hazırlanan bu çalışma 20.../01.../2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak oybirliği/oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mustafa YAMAN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 26.../01.../2017 tarih ve 04.../.../33 nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü**

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 2015 / 139

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

PARTİKÜL KATKILI KOMPOZİT KİRİŞLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Emrah Emin ÖZBALDAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

Bu çalışmada, partikül katkılı sandviç kompozit kirişlerin titreşim analizi deneysel ve nümerik olarak yapılmıştır. Çalışmada sandviç yapıyı oluşturan çekirdek malzeme olarak alüminyum bal peteği, alt ve üst yüzey levha olarak ise farklı partikül (B_4C , SiC , Al_2O_3) katkılı karbon elyaf kompozitler kullanılmıştır. Çalışmada, partikül türü, partikül katkı oranı ve çekirdek malzeme yüksekliği gibi parametrelerin doğal frekans ve sönüm oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Nümerik analizler ANSYS paket programı yardımıyla yapılmıştır. Paket programda kullanılan sandviç kiriş modeli parametrik modelleme yapılarak oluşturulmuştur. Deneysel numuneler Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Farklı konfigürasyonlarda üretilen sandviç kirişlerin ankastre serbest sınır şartındaki doğal frekansları belirlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlarda, sandviç yapılarda kullanılan her partikülün, katkı kullanılmayan sandviç kompozit kirişlere göre doğal frekansı arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, aynı partikül katkı, aynı çekirdek yüksekliğine ve aynı alt-üst levha kalınlığına sahip kompozit kirişlerde, partikül katkı oranı arttıkça doğal frekans artmıştır.

2017, 80 sayfa

Anahtar Kelimeler: : Partikül, tabakalı kompozit, sandviç kiriş, doğal frekans

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF PARTICLE REINFORCED COMPOSITE BEAM

Emrah Emin ÖZBALDAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

In this study, analysis of particle reinforced sandwich composite beam vibration is carried out experimentally and numerically. In the study, aluminum honeycomb had been used as a core material for shaping the sandwich structure and carbon fibre composites with different particle additives (B_4C , SiC , Al_2O_3) for upper and lower surface plates. In the study, effect of parameters like particle type, particle addition ratio and core material height on natural frequency had been researched. Numerical analysis is carried out using ANSYS program. The sandwich beam model used in software packages were created parametric modeling done. The experimental samples was determined using Taguchi experimental design method. Natural frequencies of sandwich beams which was produced on different configurations on clamped-free boundary condition. According to results which were driven by experiments, it was seen that every particle which was used on sandwich structure is increasing the natural frequency according to unused additive sandwich composite beams. Also, on the composite beams with same particle additive, core height and upper-lower plate thickness, natural frequency is growing as particle addition ratio is increased.

2017, 80 pages

Keywords: Particle, laminated composite, sandwich beam, natural frequency

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında yardımını eksik etmeyen ve zamanını ayıran saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU'na teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalar esnasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Muhammet Raci AYDIN'a ve sevgili eşim Sayın Mak. Müh. Rahşan ÖZBALDAN'a teşekkür ederim.

Bu çalışmayı destekleyen Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (2015/139) 'ne, ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, daima yanımda olan aileme ve sevdiklerime teşekkür ederim.

Emrah Emin ÖZBALDAN

Ocak, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozit Malzemeler	5
1.1.1. Kompozit malzemelerin olumlu yönleri.....	7
1.1.2. Kompozit malzemelerin olumsuz yönleri	7
1.1.3. Kompozit malzemelerin kullanım sebepleri.....	8
1.1.4. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	9
1.1.5. Kompozit malzemelerin kullanım alanları	11
1.2. Seramik Partiküller.....	13
1.2.1. Seramik matrisli kompozitler	13
2. KURAMSAL TEMELLER.....	15
2.1. Sandviç Yapılar	15
2.1.1. Sandviç yapıların avantajları	17
2.1.2. Sandviç yapıların dezavantajları	17
2.1.3. Sandviç kompozit yapıların uygulama alanları	18
2.2. Bal Peteği Çekirdek Malzemelerin Üretim Metotları	18
2.2.1. Uzatarak şekil verme metodu	19
2.2.2. Kıvrılarak şekil verme metodu	19
2.3. Bal Peteği Sandviç Yapıların Üretim Metotları	21
2.3.1. Sıcak basınç metoduyla şekil verme	21
2.3.2. Vakum metoduyla şekil verme.....	22
2.3.3. Kalıp metoduyla şekil verme.....	23
2.4. Alüminyum Bal Peteği Panellerin Genel Özellikleri	24
2.5. Sandviç Petek Yapıların Temel Kullanım Alanları.....	26

3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1. Materyal.....	32
3.2. Yöntem	42
3.2.1. Taguchi deney tasarım yöntemi	42
3.2.2. Sönüm oranı hesabı	44
3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi	47
3.2.4. Sonlu elemanlar yönteminin uygulama alanları	49
3.2.5. Sonlu elemanlar yöntemi analizleri	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	57
5. SONUÇLAR.....	75
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	80

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	Santigrad Derece
A	Alan
b	Genişlik
E	Elastisite Modülü
E_1	1 Yönündeki Elastisite Modülü
E_2	2 Yönündeki Elastisite Modülü
E_3	3 Yönündeki Elastisite Modülü
E_c	Karbon Fiber Malzemenin Elastisite Modülü
FEM	Sonlu Elamanlar Metodu
G_1	1 Yönündeki Kayma Modülü
G_2	2 Yönündeki Kayma Modülü
G_{23}	3 Yönündeki Kayma Modülü
G_c	Karbon Fiber Malzemesinin Kayma Modülü
h	Yükseklik
I	Kütle Atalet Momenti
l	Uzunluk
m	Kütle
n	Periyot Sayısı
T	Periyot
t	Kalınlık
t_{zaman}	Zaman
V	Hacim
x	Genlik
δ	Logaritmik Azalma
ν	Poisson Oranı
ν_1	Poisson Oranı
ν_c	Karbon Fiber Malzemesinin Poisson Oranı

ρ	Yoğunluk
ρ_c	Karbon Fiber Malzemesinin Yoğunluğu
ζ	Sönüm Oranı
ω	Doğal Frekans

Kısaltmalar

ASTM	American Society for Testing and Materials
------	--



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tipik bir kompozit malzeme modeli	5
Şekil 1.2. Takviye türlerine göre birkaç kompozit malzeme grubu.....	9
Şekil 1.3. Farklı yönlerde elyaf takviye edilmiş kompozit yapılardan bazı örnekler	10
Şekil 1.4. Kompozit malzemelerin bazı kullanım alanları.....	12
Şekil 1.5. Kompozit yapıların kullanım alanlarına örnek	13
Şekil 2.1. Tipik bir sandviç yapının görünüşü	15
Şekil 2.2. Yaygın olarak kullanılan farklı bal peteği çekirdek tipleri	16
Şekil 2.3. Deneylerde kullanılan ve sonlu elemanlar modeli oluşturulan petek yapının geometrisi	18
Şekil 2.4. Uzatarak şekil verme metodu (Hexcel 2012)	19
Şekil 2.5. Kıvrılarak ile şekil verme metodu (Hexcel 2012)	20
Şekil 2.6. Farklı şekillerde imal edilmiş petek yapılar.....	20
Şekil 2.7. Sıcak basınç metodu ile sandviç kompozit üretimi (Hexcell 2013)	21
Şekil 2.8. Sıcak basınç metodu ile üretilmiş sandviç yapı örneği (Hexcell 2013).....	22
Şekil 2.9. Vakum metoduyla sandviç yapıların üretimi (Hexcell 2013).....	22
Şekil 2.10. Vakum metoduyla üretilmiş sandviç yapı örneği (Hexcell 2013)	23
Şekil 2.11. Kalıp metoduyla sandviç kompozit yapıların üretimi (Hexcell 2013)	23
Şekil 2.12. Kalıp metoduyla üretilmiş bir sandviç kompozit yapı örneği (Hexcell 2013)	24
Şekil 2.13. Sandviç kompozit yapıların bazı kullanım alanları (Composite Materials Overview for Engineers)	24
Şekil 2.14. Alüminyum bal peteği sandviç yapılar	25
Şekil 2.15. Yolcu uçağının dış yapısında kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013).....	27
Şekil 2.16. Yolcu uçağının iç yapısında kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013).....	27
Şekil 2.17. Bir helikopterde kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013).....	27
Şekil 2.18. Türbin kanatlarında kompozit malzeme kullanımı (Lr.org 2016)	28

Şekil 2.19. Prefabrik yapılarda sandviç kompozit malzeme kullanımı	29
Şekil 2.20. Tren vagonlarında kompozit yapı kullanılan bölgeler (Jeccomposites 2016)	30
Şekil 2.21. Teknelerde kompozit sandviç kullanım bölgeleri (Compositesworld 2016)	31
Şekil 2.22. Yeni nesil bir yolcu otobüsünde kompozit malzeme kullanım bölgeleri (Shin <i>et al.</i> 2008).....	31
Şekil 3.1. Karbon twill kumaş	32
Şekil 3.2. El yatırma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi	34
Şekil 3.3. Sulu kesme makinası	35
Şekil 3.4. Deney numunelerinde kullanılan farklı yüksekliklerdeki alüminyum bal petekleri.....	35
Şekil 3.5. Araldite AW 106 TU ve HV 953 U marka yapıştırma elemanları	36
Şekil 3.6. Üretilen bazı deney numuneleri.....	36
Şekil 3.7. Deney düzeneği	39
Şekil 3.8. Deney düzeneği ekipmanları	40
Şekil 3.9. Etki ile titreşim ölçüm sistemlerinin genel çalışma prensibi (Schwarz and Richardson 1999)	40
Şekil 3.10. Çekme test cihazı.....	41
Şekil 3.11. Serbest titreşim yapan bir sistem için genlik-zaman grafiği.....	45
Şekil 3.12. Yarı güç bant genişliği metodu.....	46
Şekil 3.13. PULSE ölçüm sisteminden alınan rezonans frekansını ve sönüm oranını gösteren FRF grafiği.....	47
Şekil 3.14. Freze tezgâhının sonlu elemanlar ile modellenmesi (Arıkan 2010)	48
Şekil 3.15. Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı vasıtasıyla bulunması (Arıkan 2010)	49
Şekil 3.16. Parametrik olarak oluşturulan örnek sandviç yapı.....	51
Şekil 3.17. SolidWorks ve ANSYS programında parametrik olarak tanımlanan değerler	52
Şekil 3.18. Meshlemede kullanılan bazı eleman tipleri (ANSYS 2012)	53
Şekil 3.19. Sandviç kompozit yapının ANSYS Workbench’de meshlenmesi.....	54
Şekil 3.20. Sandviç kompozit yapının ANSYS Mechanical APDL’de meshlenmesi	54
Şekil 3.21. Sandviç kompozit yapıya uygulanan iki farklı mesh geometrisi.....	55

Şekil 4.1. Deneyde kullanılan kompozit sandviç numunenin nümerik sönüm davranışı	57
Şekil 4.2. Numunenin ankastre serbest sınır şartında nümerik olarak hesaplanan ve program çıktısı olarak verilen sönüm oranı grafiği	58
Şekil 4.3. Numunenin ankastre serbest sınır şartındaki uyarılmamış normal hali	60
Şekil 4.4. Numunenin ankastre serbest sınır şartındaki ilk doğal frekansı ve mod şekli	61
Şekil 4.5. Numunenin ankastre serbest sınır şartındaki düzlem içi ikinci doğal frekansı ve mod şekli	61
Şekil 4.6. Numunenin ankastre serbest sınır şartındaki düzlem içi üçüncü doğal frekansı ve mod şekli	62
Şekil 4.7. Katı model üzerinde yönlenmeler	62
Şekil 4.8. Numunelerde uygulanan kesme yönlenmeleri	63
Şekil 4.9. Çekme cihazı kuvvet – şekil değiştirme grafiği	64
Şekil 4.10. Bir yönlenmesindeki tüm numunelerin doğal frekans bakımından en iyi numune tahmin grafiği	66
Şekil 4.11. İki yönlenmesindeki tüm numunelerin doğal frekans bakımından en iyi numune tahmin grafiği	67
Şekil 4.12. Üç yönlenmesindeki tüm numunelerin doğal frekans bakımından en iyi numune tahmin grafiği	68
Şekil 4.13. Bir yönlenmesindeki tüm numunelerin sönüm oranı bakımından en iyi numune tahmin grafiği	68
Şekil 4.14. İki yönlenmesindeki tüm numunelerin sönüm oranı bakımından en iyi numune tahmin grafiği	70
Şekil 4.15. Üç yönlenmesindeki tüm numunelerin sönüm oranı bakımından en iyi numune tahmin grafiği	70
Şekil 4.16. Bir yönündeki çekme numunelerinin elastisite modülleri ve standart sapmaları	71
Şekil 4.17. İki yönündeki çekme numunelerinin elastisite modülleri ve standart sapmaları	72
Şekil 4.18. Üç yönündeki çekme numunelerinin elastisite modülleri ve standart sapmaları	73

Şekil 4.19. Ankastre-serbest sınır şartındaki aynı yönlenebilir kompozit yapıların nümerik analiz yöntemi ile doğal frekanslarına çekirdek yüksekliğinin etkisi	74
--	----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bal peteği sandviç yapılarda çekirdek malzemesinin kalınlığıyla sandviç yapının rijitlik, dayanım ve ağırlık değişimi (Hexcel 2013)	17
Çizelge 3.1. W yönünde 2 adet ve L yönünde 33 adet bal peteği bulunan alüminyum çekirdeklerin kütleleri	34
Çizelge 3.2. Ankastre – serbest sınır şartındaki kompozit sandviç numunenin mod şekilleri	37
Çizelge 3.3. Çekirdek malzemenin mekanik özellikleri	39
Çizelge 3.4. Taquchi L9 yönteminde kullanılan faktörler	43
Çizelge 3.5. Taquchi L9 yöntemine göre üretilen deney numuneleri ve özellikleri.....	43
Çizelge 4.1. Deneysel ve nümerik olarak belirlenen frekans değerleri ve hata oranları	64
Çizelge 4.2. Deneysel ve nümerik olarak belirlenen sönüm oranı değerleri ve hata oranları	65
Çizelge 4.3. 2-2-3 numunesi için frekans değerleri güven aralığı	66
Çizelge 4.4. 2-2-3 numunesi için frekans değerleri anova tablosu	67
Çizelge 4.5. 3-2-2 numunesi için sönüm oranı değerleri güven aralığı	69
Çizelge 4.6. 3-2-2 numunesi için sönüm oranı değerleri anova tablosu.....	69
Çizelge 4.7. Bir yönündeki çekme numunelerinin standart sapma değerleri	72
Çizelge 4.8. İki yönündeki çekme numunelerinin standart sapma değerleri	73
Çizelge 4.9. Üç yönündeki çekme numunelerinin standart sapma değerleri	74

1. GİRİŞ

Günümüzde ulaşım araçları teknolojisinin yanında gelişen teknoloji ile beraber, elektrik ve elektronik sanayi, havacılık sanayi, otomotiv sanayi ve inşaat sektörü gibi birçok alanda; çelik gibi geleneksel metallerin yerine, mukavemet/ağırlık oranı yüksek olan kompozit malzemeler kullanılmaya başlamıştır. Gün geçtikçe kompozit malzemelerin önemi artmış, buna bağlı olarak da ihtiyaca cevap veren uygun kompozit üretme ve geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Kompozit malzemeler için takviye elamanı olarak kullanılan liflerin çeşitlilik göstermesi; kompozit malzemelerden istenen yüksek mukavemet, yüksek sertlik, düşük yoğunluk (hafiflik) ve düşük maliyet gibi özelliklerin karşılanması açısından kolaylık sağlamaktadır.

Son yıllarda araçlardaki teknolojinin hızlı ilerlemesi, bu araçlarda kullanılmak üzere üretilen malzemelerin hafif, dayanıklı, darbelere karşı sönüm oranı yüksek, ses ve ısı yalıtımı iyi, kolay şekillendirilebilir olma ihtiyacı arttırmıştır. Bu alandaki ihtiyaçları gidermek için en çok başvurulanan malzemeler ise sandviç kompozit malzemeler olmuştur.

Bu çalışmada dört kat tabakalı twill karbon elyafların matris dolgusuna %1, %2 ve %4 oranlarında farklı seramik partiküller eklenerek bir ucu ankastre sınır şartında ki sandviç kırılganlara deneysel olarak titreşim analizi yapılmıştır. Analizlerde PULSE LabShop programı ve Brüel & Kjær marka ölçüm sistemi ekipmanları kullanılmıştır. Aynı zamanda kullanılan alüminyum hücrelerin aynı katkı partikülünde ve aynı katkı oranında çekirdek yükseklik parametresi değiştirilerek doğal frekansa etkileri incelenmiştir. Kompozit üretim aşamasında kullanılan twill karbon elyaf kumaş hazır olarak temin edilmiştir. Nümerik analizler ANSYS paket programı ile yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlarla, nümerik olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Geçerli bir araştırmada, cam elyaf epoksi kompozit kirişlerin elastik özellikleri çeşitli seramik parçalar kullanılıp kompozit kirişlere etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu kompozit kirişlerde katkı parçacıkları olarak alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) kullanılmıştır. Her katkılı kompozit kirişlerde kullanılan oranlar sırasıyla %0 (Katkısız), %5 ve %10'dur. Kullanılan parçacıkların ağırlık taşıma kapasitesi ve elastik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlarda, kullanılan parçacıkların ağırlıkça oranları ve farklı partikül boyutları burkulma yüküne etkisi önemli ölçüde olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu çalışma sonucunda cam elyaf kompozite katkı olarak %10 bor karbürün kullanılması %42 oranında kritik burkulma yükünü arttırdığı gözlenmiştir (Sayer 2014).

Bugünlerde herhangi bir makinenin parçası kompozit malzemeden üretilebilmektedir. Üretim sonucunda hafif özellikte olması ve istenilen mukavemet değerlerini karşılayabilmesi ön plana çıkan özelliklerindendir. Kullanım ömrü boyunca istenilen tüm görevleri yerine getirmesi beklenmektedir (Elomori *et al.* 1997).

Bunun yanında kompozit malzemeden üretilen parça kısmi basınç yüklerine de maruz kalabilmektedir. Silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve bor karbür (B_4C) gibi seramik partiküller daha çok parçanın yük taşıma kapasitesini arttırmak için takviye elemanı olarak kullanılır. Sonucunda düşük yoğunluğa, yüksek elastisite modülüne ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olması beklenir (Çallıoğlu vd 2011).

Günümüzde seramik tanecikler, kompozitlerin elastisite modülünü ve kompozit malzemenin dayanımını arttırmak için kullanılmaktadır. Ancak, reçine ve seramik matris modifikasyonu genellikle zayıf termal kararlılıkları ve sürtünme özellikleri nedenlerinden dolayı sınırlıdır. Çeşitli araştırmalar sonucunda seramik veya metal partiküllerden oluşan çok sayıda parçacık matris katkısı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir (Zhang *et al.* 1992).

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 sönümlemeye katkısı incelenmiştir (Mead 1982).

Bu alanda yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Özet olarak inceleyecek olursak;

Li and Crocker (2006), sandviç yapıların sönümlemesi için çeşitli teorik modelleri gözden geçirmiştir. Kâğıt balpeteği çekirdeğe poliüretan doldurarak, çekirdek ve yüzey levhası kalınlıklarının değiştirilmesiyle ürettikleri numunelerin bir kısmına delaminasyon uygulamışlardır. Sönümlemeyi frekansa bağlı olarak incelemişlerdir. Yüzey levha kalınlığı artmasının, düşük ve yüksek frekans aralıklarında sönümlemeyi düşürdüğünü, fakat orta frekans aralığında arttırdığını tespit etmişlerdir. Çekirdek kalınlığının artması durumunda, sönüm oranının, orta ve yüksek frekans aralıklarında arttığını bildirmişlerdir. Delaminasyonun, kompozit giriş yapısında sürtünmeyi, dolayısıyla sönümlemeyi arttırdığını fakat yapının sertlik ve doğal frekansını azalttığını tespit etmişlerdir.

Nilsson and Nilsson (2002), bal peteği 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.

Aydıncak (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 sönümlemeye 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.

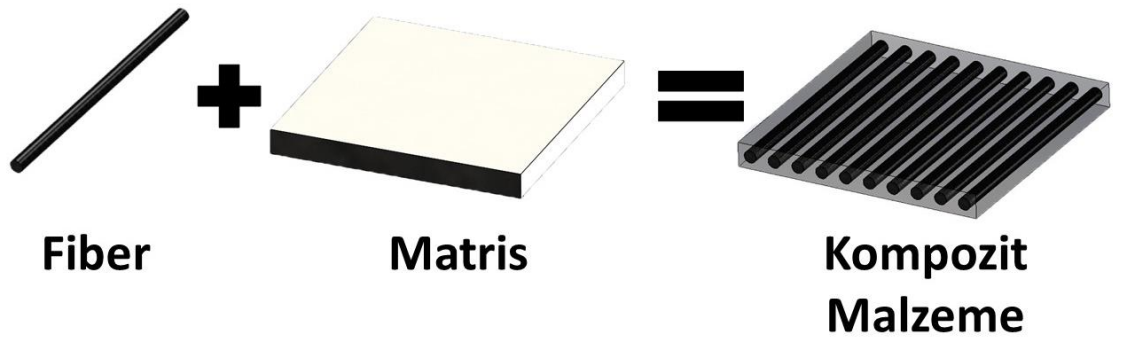
Şakar vd (2010), petek yapılı sandviç kompozit yapıların farklı sınır şartlarında titreşim analizlerini yapmışlardır. Sandviç yapıyı oluşturan alt-üst yüzey levhaları ve çekirdek

malzemesinin geometrik değişiminin, dinamik özelliklere olan etkisini hem nümerik yöntemlerle hem de deneysel olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada; 6-10-15 mm yüksekliklerinde, alüminyumdan yapılmış bal peteği şeklinde çekirdek malzemeler deneylerde kullanılmak üzere uygun ebatlara (25 mm genişlik, 227 mm uzunluk) getirilmiştir. Üretilen çekirdek malzemelerin alt ve üst yüzeyleri 1 mm kalınlıklarda dört tabaka karbon 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 yapılara 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 kırılgan, yaz halkaları ise daha yumuşak fakat esnektir. Çam ağacı bu kompozit özelliğinden dolayı bu yapıda olmayan diğer ağaçlara göre daha yüksek bir mukavemete sahiptir.

İnsanoğlu ilk çağlardan beri kırılgan malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak kırılganlık özelliğinin giderilmesine çalışmıştır. Kerpiç buna güzel bir örnektir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, kerpiğin 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 levhaların 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 gerçekleşmiştir.

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 kısalmır.
- 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 kullanılabilecek kalitede karbon elyafının bir metrekairelik 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, onarılmaları 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

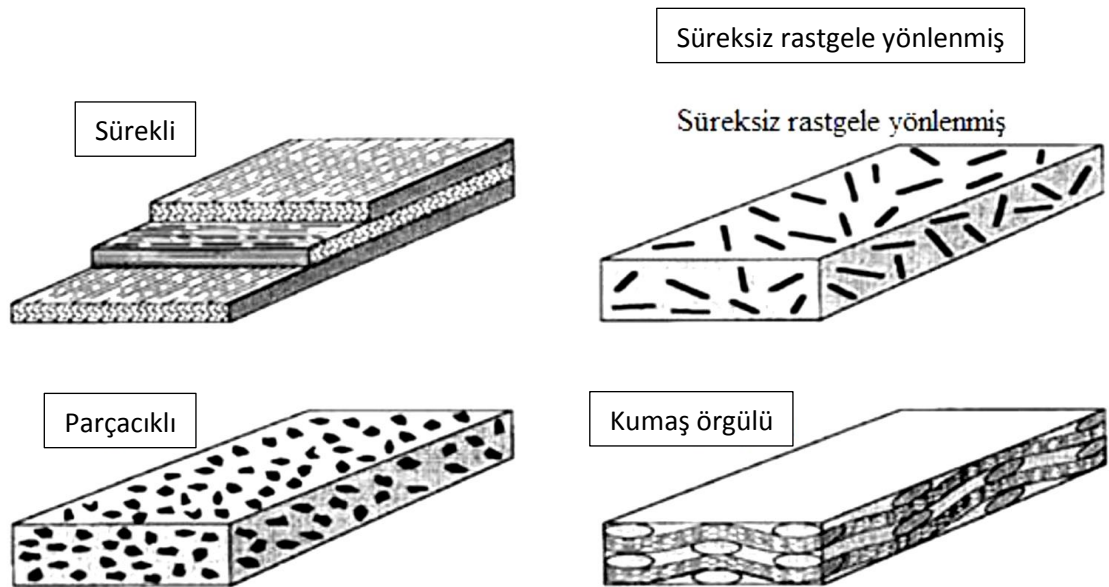
Kompozit malzemeler diğer malzemelere göre, bünyesinde barındırdığı yüksek özelliklerden dolayı daha çok tercih edilirler. Kompozit malzemeler kullanılarak; hafiflik, mukavemet, aşınma dayanımı, yorulma dayanımı, korozyon dayanımı, kırılma tokluğu, termal özellikler, ısıl iletkenlik, elektrik iletkenliği, 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

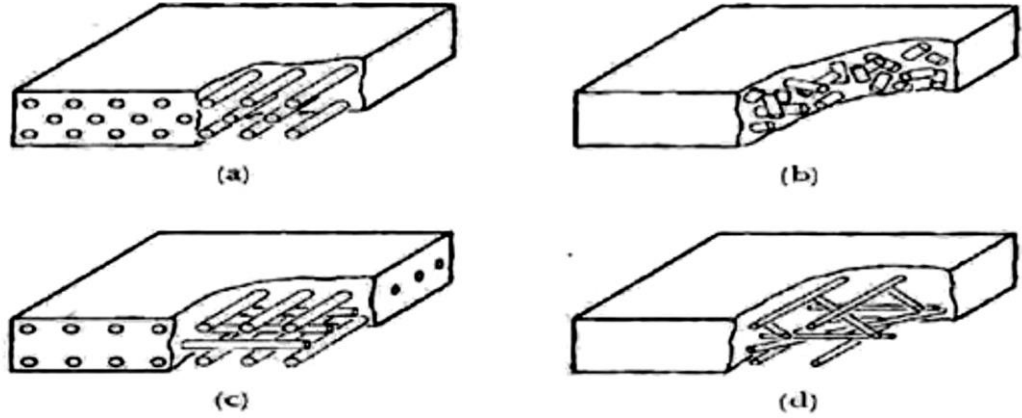
malzemeler kullanılabilmektedir. Kompozit malzemeler işletme maliyeti bakımından çevre şartlarına uzun süre dayanabilme kabiliyeti, tüketiciye sağladığı avantajların başında gelmektedir. Yüksek kimyasal direnç kabiliyeti sayesinde, kimyasal korozyon riski taşıyan alanlarda yaygın olarak kullanılabilir. Çoğu kompozit malzemeler ısıya maruz sistemlerde sorunsuz çalışabilme özellikleri sayesinde, ısıl değişikliklerden 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, levha 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 yönlenmiş 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. Elyafların 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 ısı 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 örneğidirler.

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 elyafdır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyafdır. Bu iki farklı elyaftan oluşan yeni kompozitin tokluğu grafit kompozitden iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemetide kevlar elyafı kompozitden daha yüksek olmaktadır.

1.1.5. Kompozit malzemelerin kullanım alanları

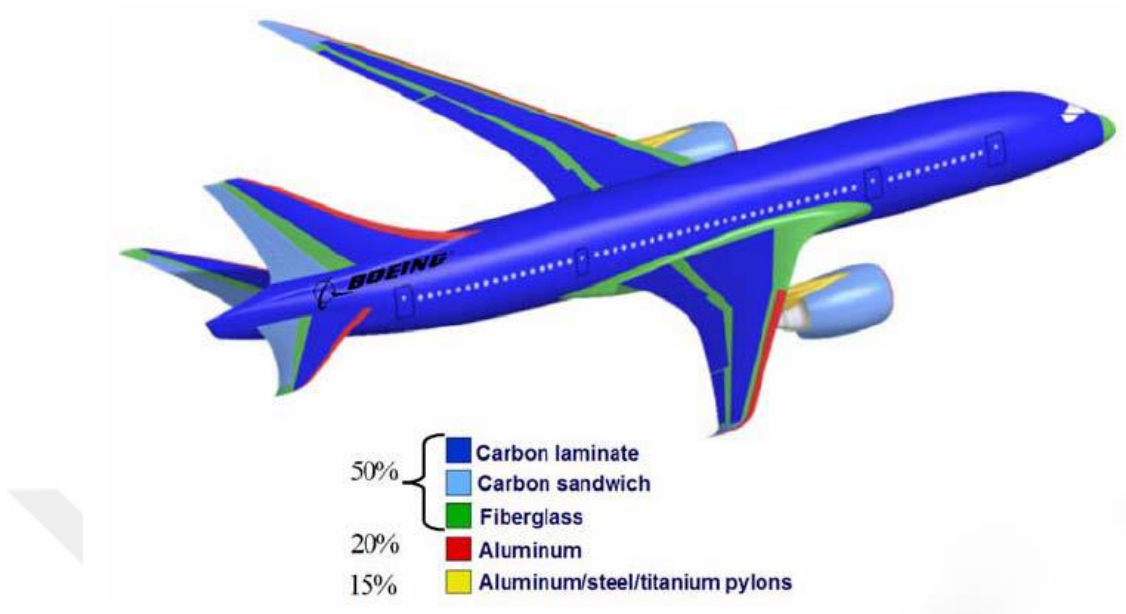
Kompozit malzemeler, yapıları ve özellikleri sayesinde Şekil 1.4 ve Şekil 1.5’de gösterildiği gibi çok çeşitli alanlarda kullanılır. Her sektörün farklı ihtiyaçları ve beklentileri olduğundan, kompozit malzemelerin, ürün esneklikleri önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozit malzemelerin 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 yeralan 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 örnek

1.2. Seramik Partiküller

İki veya daha fazla malzemenin, uygun olan özelliklerini tek malzemede toplamak, veya yeni bir özellik eklemek amacıyla mikro veya makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemelere kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler daha öncede bahsettiğimiz gibi fiber ve matrisin bir araya gelmesiyle meydana gelir. Kullanılan matrisin özellikleri kompozit malzemeye büyük oranda etki eder. Kompozit malzemelerde kullanılan matrislerin çeşitleri aşağıda verilmiştir.

- Plastik matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler

1.2.1. Seramik matrisli kompozitler

Seramik malzemeler, diğer malzemelere göre yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafiftir. Yoğunlukları yaklaşık $1.5-3.0 \text{ gr/cm}^3$ değerlerindedir. Seramiklerin genel özellikleri

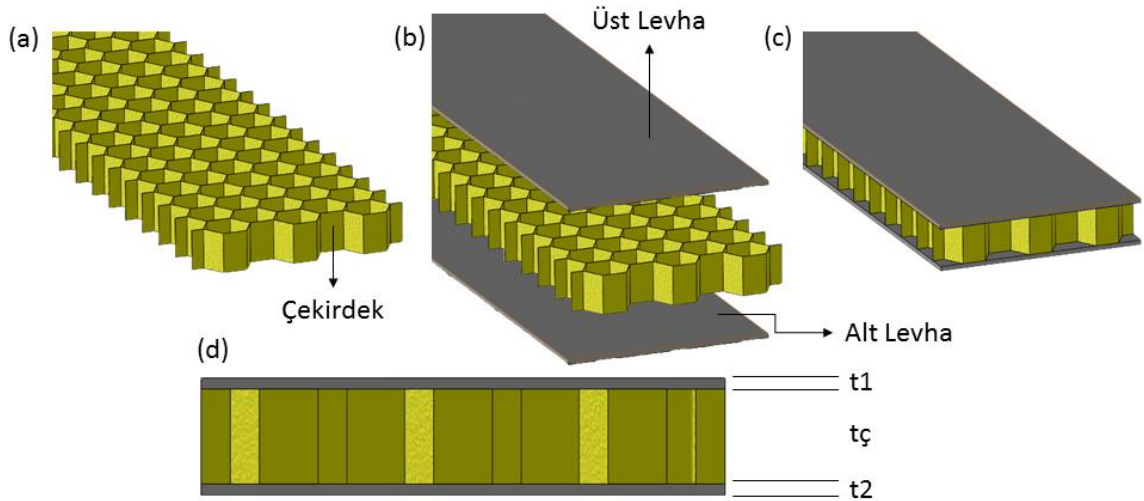
yüksek sıcaklığa dayanıklı olmasıdır. Bu nedenle seramik matrisli kompozitler genellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken yerlerde kullanılırlar. Seramikler sert ve kırılmandır. Düşük kopma uzaması gösterirler. Düşük tokluğa sahiptirler ve ani termal değışikliklerine dayanıksızdırlar. Bu nedenle liflerle takviye edilirler. Buna karşılık çok yüksek elastiklik modülüne ve çok yüksek çalışma sıcaklıklarına sahiptirler. Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık, kimyasal kararlılık, sertlik, erozyon ve aşınmaya karşı direnç ve hafif olması gibi avantajlarından dolayı yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Genel olarak seramik matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak Al_2O_3 , SiC, B_4C yaygın olarak kullanılmaktadır.



2. KURAMSAL TEMELLER

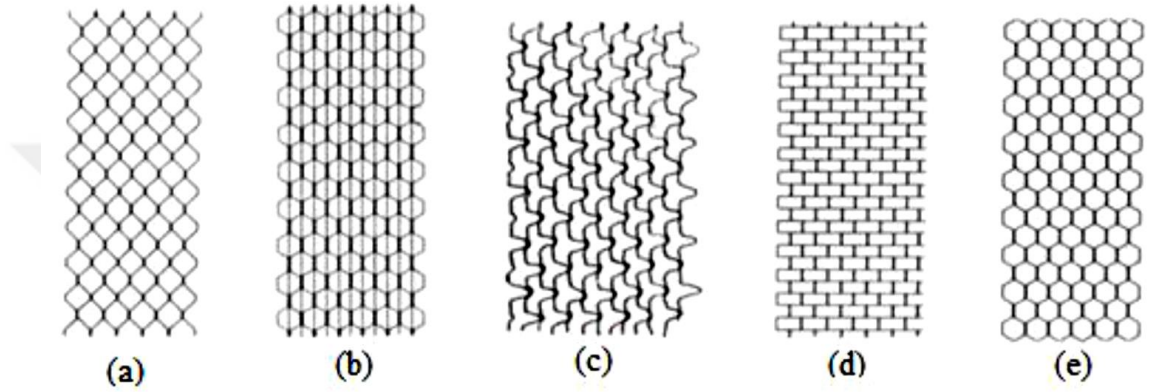
2.1. Sandviç Yapılar

Bir sandviç kompozit yapı; yüzey levhaları, çekirdek ve ara yüzeyler arasındaki yapıştırıcı olmak üzere üç temel elemandan oluşur. Şekil 2.1’de tipik bir sandviç yapının (a)’da çekirdek kısmı, (b)’de alt ve üst levhalar, (c)’de birleştirilmiş hali, (d)’de ise önden 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 - cam elyaf - 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.



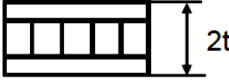
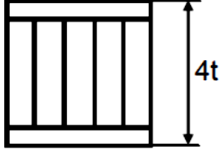
Şekil 2.2. Yaygın olarak kullanılan farklı bal peteği çekirdek tipleri

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 2.1’de gösterilen, sandviç kompozit yapıların özel bir şekli olan, bal peteği sandviç kompozit yapıların kullanımı giderek artmaktadır.

2.1.1. Sandviç yapıların avantajları

Çizelge 2.1’de bal peteği sandviç yapılarda çekirdek malzemesinin kalınlığıyla sandviç yapının rijitlik, dayanım ve ağırlık değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. 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 sönümlene kabiliyetine sahiptirler.

2.1.2. Sandviç yapıların dezavantajları

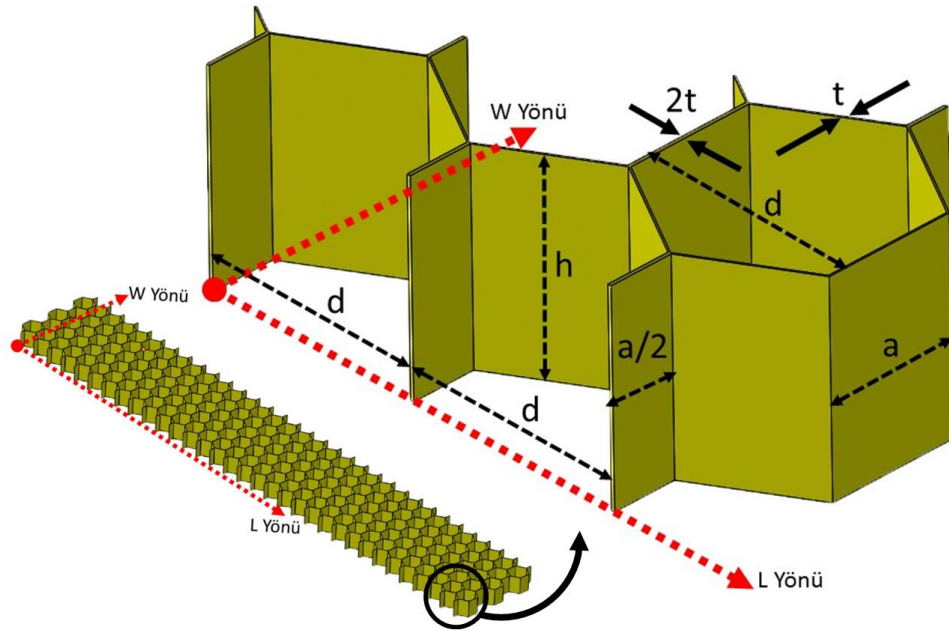
- Kalınlıkları fazladır.
- Geleneksel malzemelere göre üretilmeleri daha yüksek maliyetlidir.
- Birleştirilmeleri zordur.
- Hasarlı kısımların tamiri zordur.

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

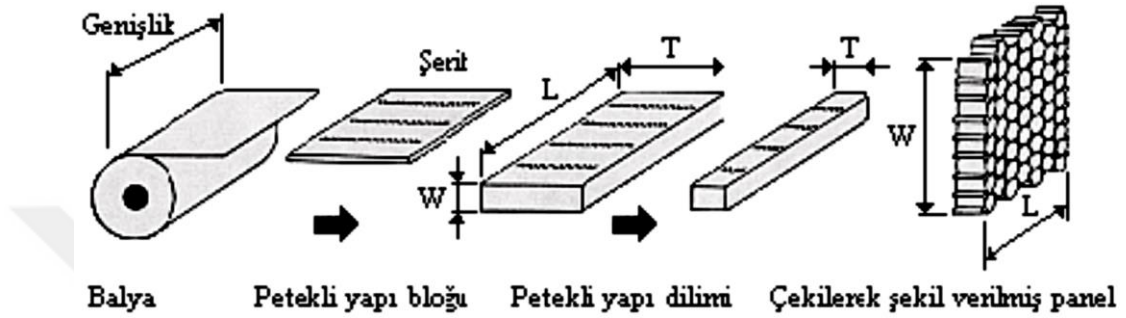
Çekirdek malzeme olarak seçilen bal peteği çekirdeklerin altıgenlerden oluşmasıyla, küçük yüzey alanlarında geniş kaplama yapılması sağlanır. Altıgen yapılarda arada boşluk kalmaz. Düzgün altıgenlerden oluşmuş bölmeler arasında boşluk kalmadığı için kullanılan alanın verimliliği artar. Ayrıca altıgen yapılar kare veya dikdörtgen yapılara göre daha mukavimdir, daha az hasar görürler. Şekil 2.3’de deneylerde kullanılan ve sonlu elemanlar modeli oluşturulan petek yapının geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Deneylerde kullanılan ve sonlu elemanlar modeli oluşturulan petek yapının geometrisi

Petekli yapıların üretiminde en temel iki metot; Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de gösterildiği gibi uzatma ve kıvrarak şekil verme metotlarıdır.

2.2.1. Uzatarak şekil verme metodu

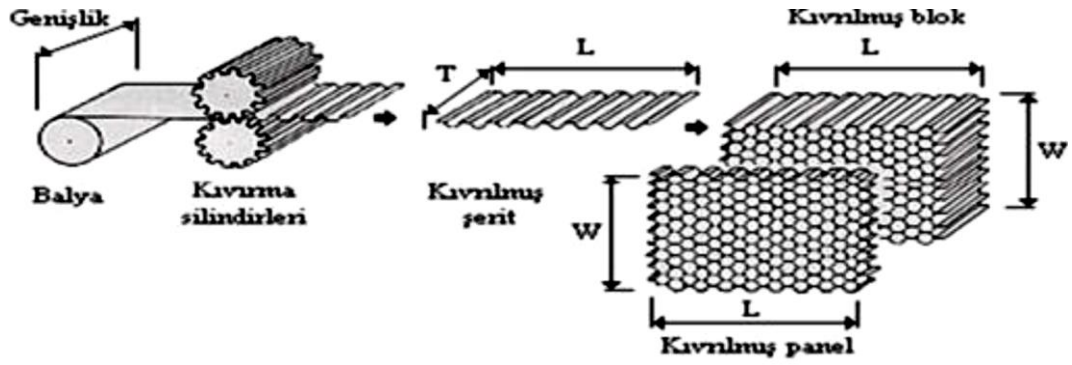


Şekil 2.4. Uzatarak şekil verme metodu (Hexcel 2012)

Bu metot; genellikle metal ve metal olmayan hücre imalatında kullanılır. Şekil 2.4’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.

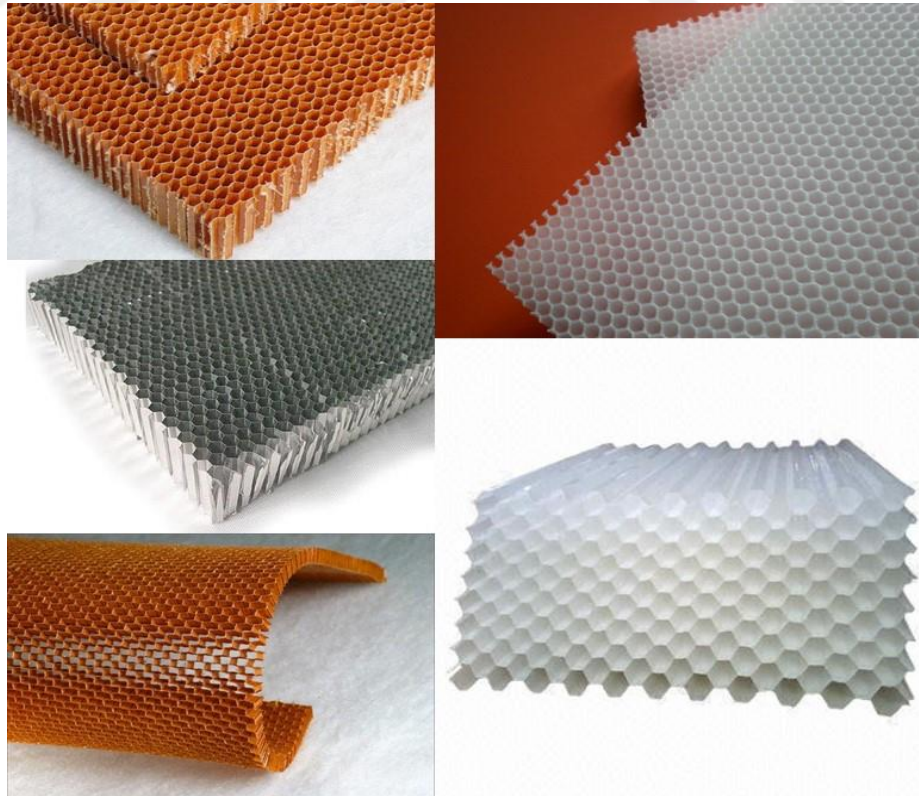
2.2.2. Kıvrarak şekil verme metodu

Kıvrarak şekil verme metodu yüksek sıcaklıkta çalışan, cidar kalınlığı ve yoğunluğu çok fazla olan petekli yapıların üretilmesinde kullanılır. Şekil 2.5’de 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 2.5. Kıvrarak ile şekil verme metodu (Hexcel 2012)

Deneysel çalışmada kullanılan numuneler kıvrarak şekil verme metoduyla üretilmiştir. Uzatarak ve kıvrarak 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 2.6’da farklı şekillerde imal edilmiş petek yapılar gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Farklı şekillerde imal edilmiş petek yapılar

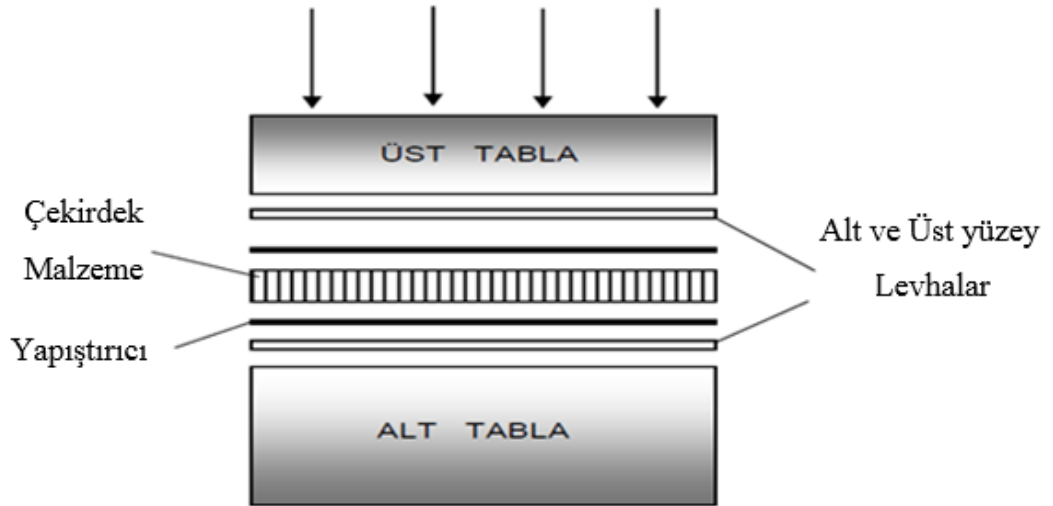
2.3. Bal Peteği Sandviç Yapıların Üretim Metotları

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

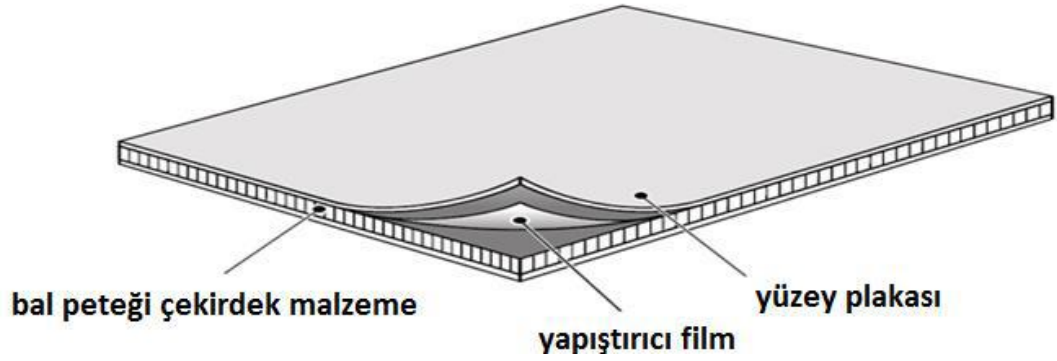
1. Sıcak basınç metodu,
2. Vakum metodu
3. Kalıp metodu

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 2.7’de ve bu yöntemle üretilmiş bir sandviç yapı örneği Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



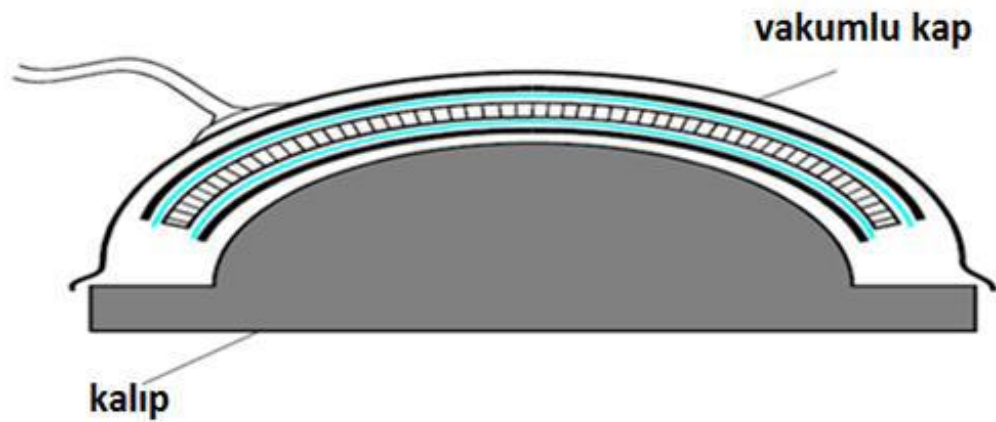
Şekil 2.7. Sıcak basınç metodu ile sandviç kompozit üretimi (Hexcell 2013)



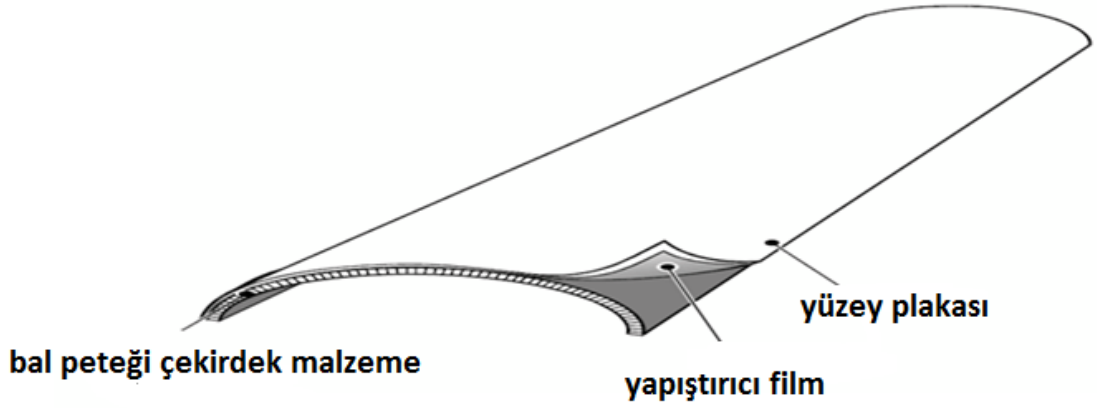
Şekil 2.8. Sıcak basınç metodu ile üretilmiş sandviç yapı örneği (Hexcell 2013)

2.3.2. Vakum metoduyla şekil verme

Bu yöntemle üretilmesi zor olan karmaşık yapılı parçalar üretilebilir. 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 üretilebilir. Bu üretim metoduyla bal peteği ve yapıştırıcı film tabakaları kullanılarak karmaşık şekilli kompozit parçaların üretimi sağlanabilir. Bu yöntemin uygulama şekli Şekil 2.9’da ve bu yöntemle üretilmiş bir sandviç yapı örneği Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



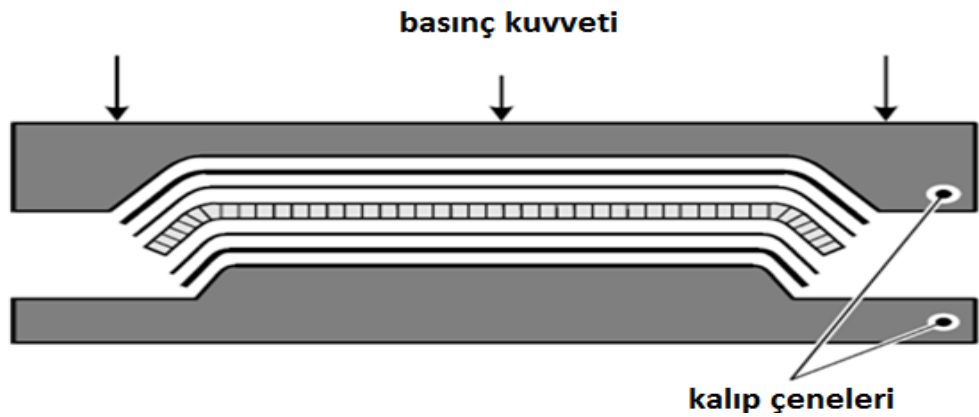
Şekil 2.9. Vakum metoduyla sandviç yapıların üretimi (Hexcell 2013)



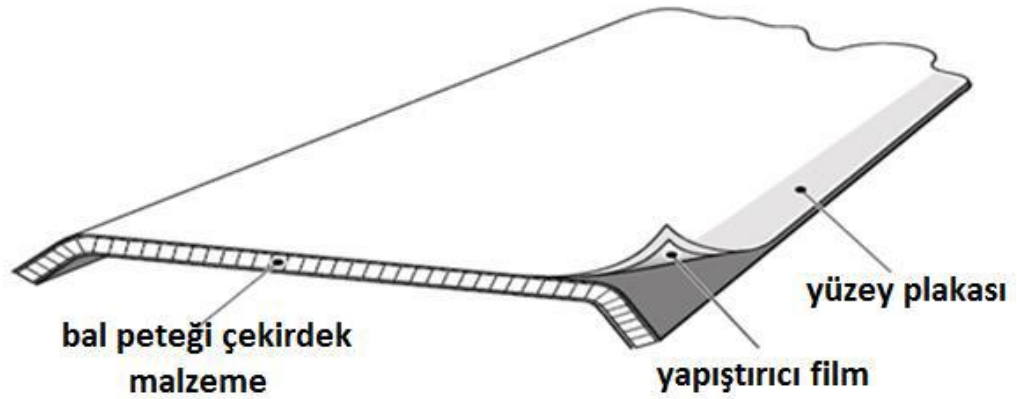
Şekil 2.10. Vakum metoduyla üretilmiş sandviç yapı örneği (Hexcell 2013)

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 2.11’de ve bu yöntemle üretilmiş bir sandviç yapı örneği Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Ayrıca, sandviç yapıların kullanıldığı bazı uygulama alanları Şekil 2.13’te gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Kalıp metoduyla sandviç kompozit yapıların üretimi (Hexcell 2013)



Şekil 2.12. Kalıp metoduyla üretilmiş bir sandviç kompozit yapı örneği (Hexcell 2013)

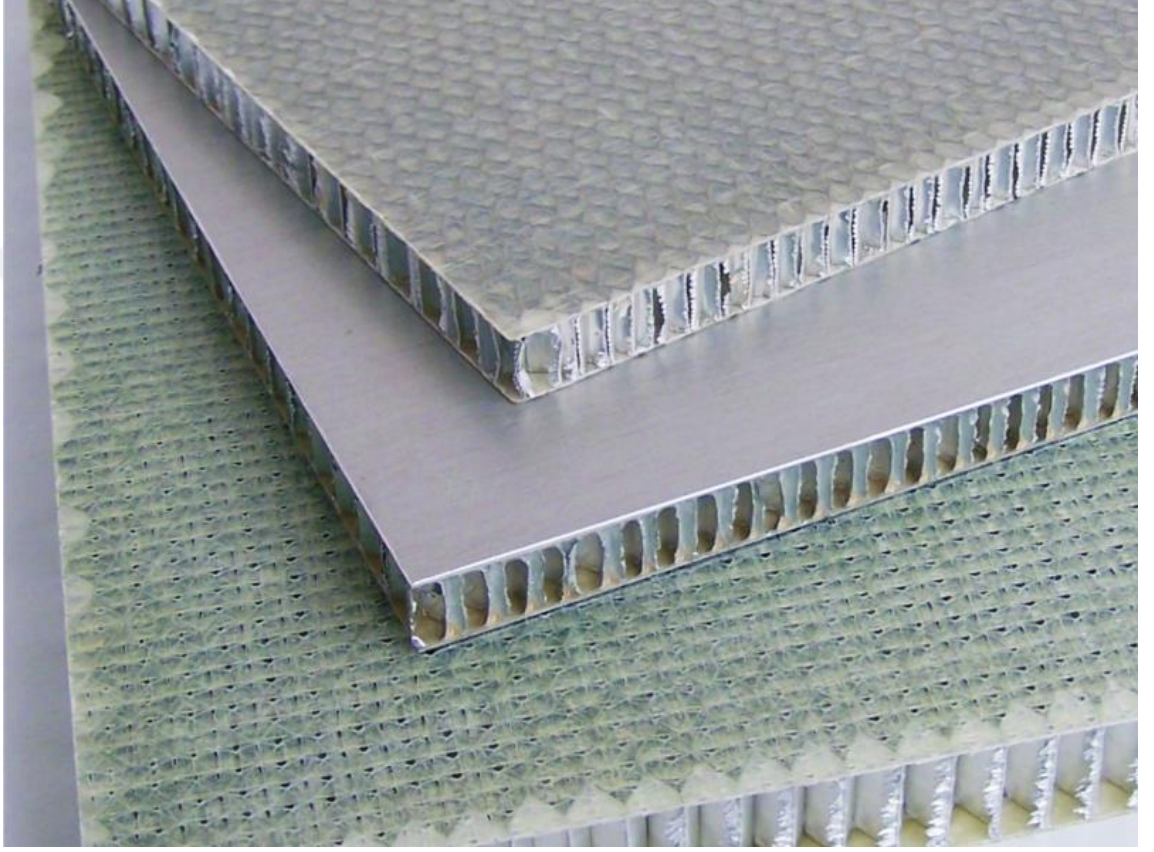


Şekil 2.13. Sandviç kompozit yapıların bazı kullanım alanları (Composite Materials Overview for Engineers)

2.4. Alüminyum Bal Peteği Panellerin Genel Özellikleri

Alüminyum bal petekli kompozit yapılar, yüksek mekanik dayanım gerektiren konstrüksiyonlarda kullanılır. Şekil 2.14’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 2.14. 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

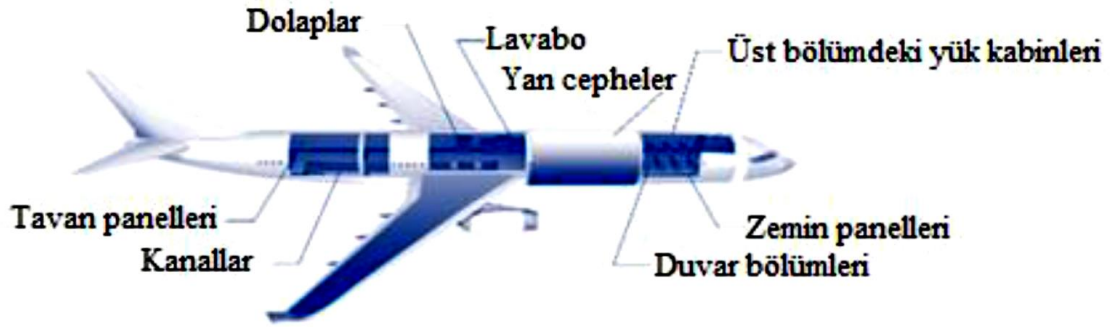
Sandviç kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç her geçen gün daha da artmaktadır. Havacılık ve uzay sanayisine yönelik uygulamalarda, hafif ve mukavemetli yapıların kullanılması önem taşımaktadır. Genellikle uçağın taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi gibi parçalar sandviç kompozit yapılardan oluşmaktadır. Bu yapılardaki kullanıma ilave olarak, petekli yapılar enerji sönmüleme, 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.

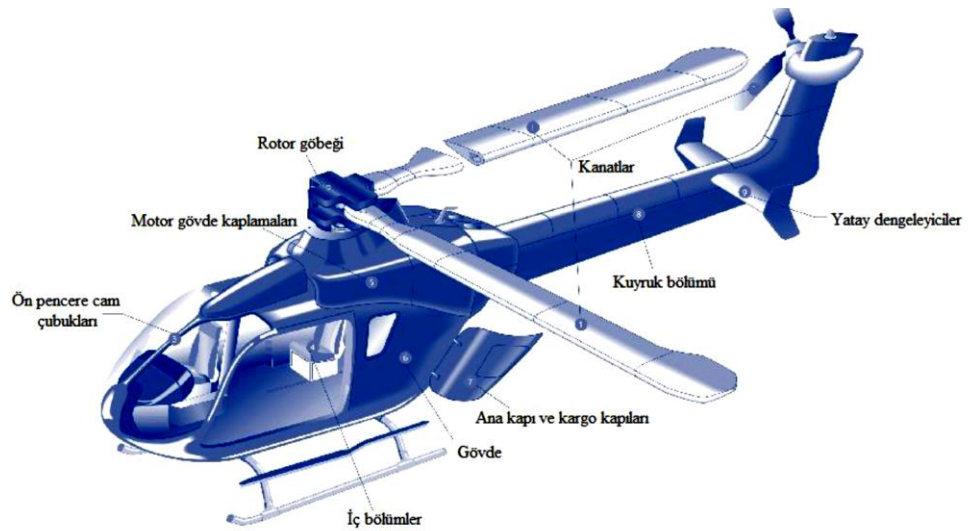
1970'li yılların ortalarında grafit epoksi ağırlıklı olarak petek yapılarda kullanılmaya başlandı. F-16 uçağının tüm kuyruk yüzeyleri, kanatlardaki ve gövdedeki diğer kumanda yüzeyleri ve F/A-18 uçağının kanat ve kuyruk kısımları petek yapı kullanımına örneklerdir (Hoskin and Baker 1986). Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'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 yapılı kompozit malzemeler kullanılmıştır.



Şekil 2.15. Yolcu uçağının dış yapısında kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013)

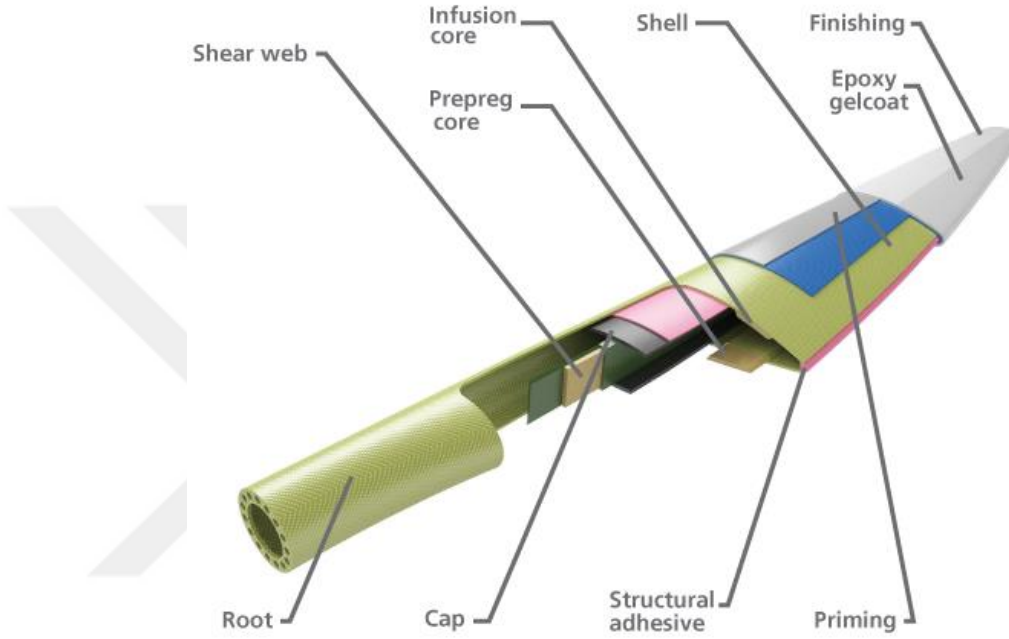


Şekil 2.16. Yolcu uçağının iç yapısında kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013)



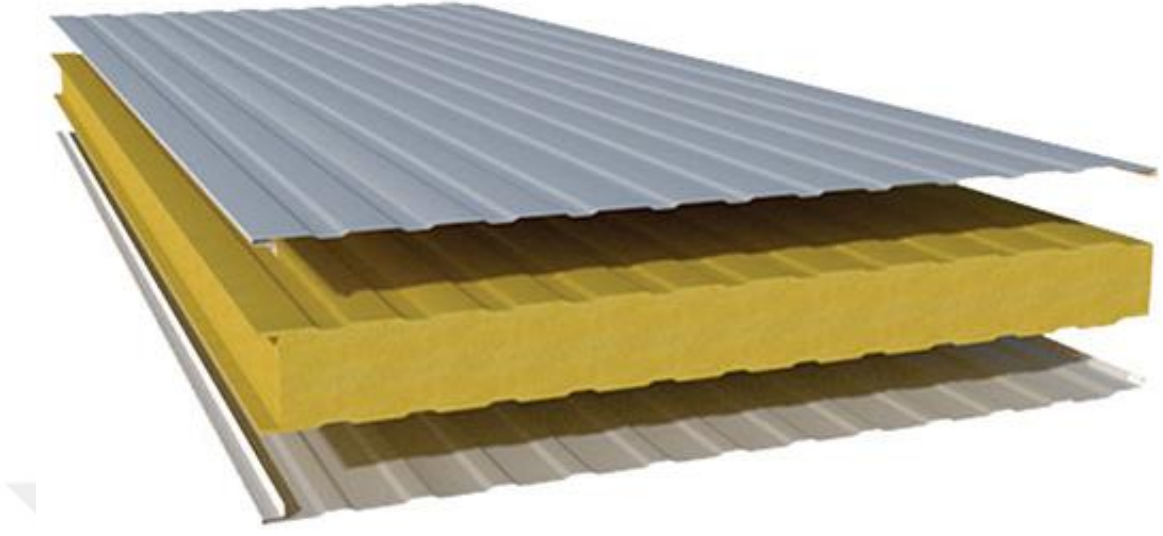
Şekil 2.17. Bir helikopterde kullanılan kompozit yapıların kullanım bölgeleri (Hexcel 2013)

Son yıllarda otomobillerin tavan ve gövdesinin birçok kısımlarında, spor aletlerinde, rüzgâr türbini pervaneleri, birçok alet ve makine imalatında petekli yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.18’de gösterilen rüzgâr türbini ve türbin kanadı sandviç kompozit malzeme kullanılarak yapılmıştır.



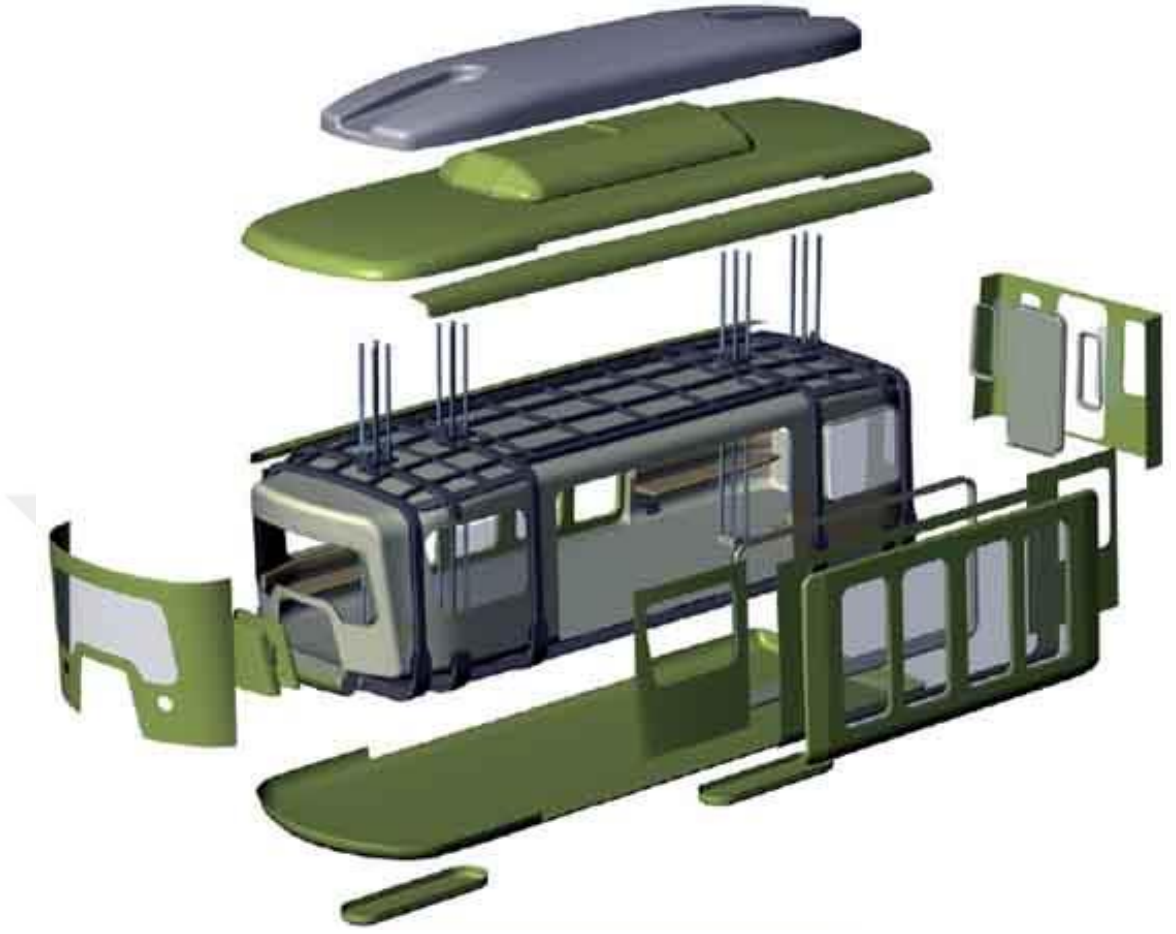
Şekil 2.18. Türbin kanatlarında kompozit malzeme kullanımı (Lr.org 2016)

İnşaat ve yapı sektöründe de gittikçe artan bir şekilde sandviç kompozit malzeme kullanımına rastlanmaktadır. Şekil 2.19’da prefabrik yapılarda sandviç kompozit malzeme kullanım örnekleri mevcuttur.



Şekil 2.19. Prefabrik yapılarda sandviç kompozit malzeme kullanımı

Tren konstrüksiyonlarında maliyeti ve ağırlığı düşürmek amacıyla, sandviç kompozit türleri artan oranlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.20’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 2.20. Tren vagonlarında kompozit yapı kullanılan bölgeler (Jecomposites 2016)

Denizcilik sektöründe, tekne imalatı sırasında sandviç tekniği kullanılarak, teknenin mekanik dayanımı artırılmaktadır. Şekil 2.21’de teknelerde kompozit sandviç kullanım bölgeleri gösterilmiştir.

Şekil 2.22’de yeni nesil bir yolcu otobüsünde bal peteği sandviç ve tabakalı kompozit yapının kullanım yerleri gösterilmiştir.

Tabakalı kompozit

Dış yüzey levhası
Yapışkan film
Çekirdek
Yapışkan film
İç yüzey levhası

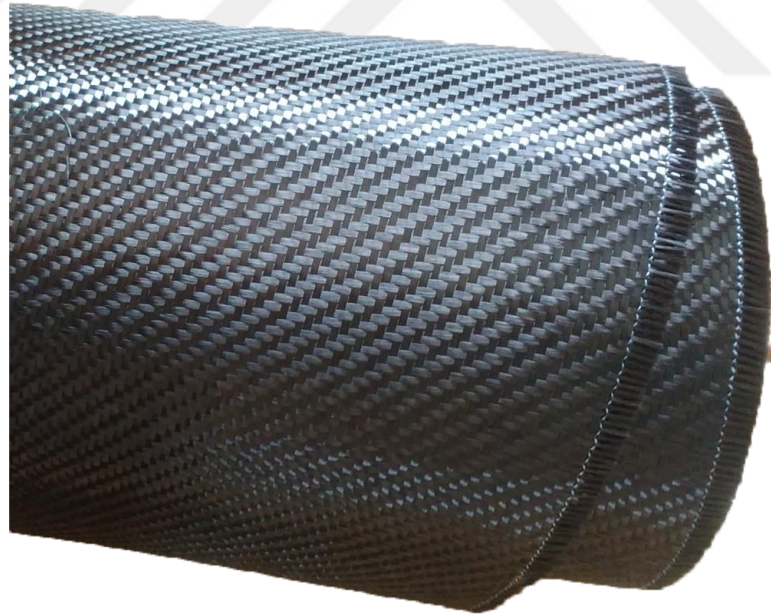
Sandviç kompozit panel

Şekil 2.22. Yeni nesil bir yolcu otobüsünde kompozit malzeme kullanım bölgeleri (Shin *et al.* 2008)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

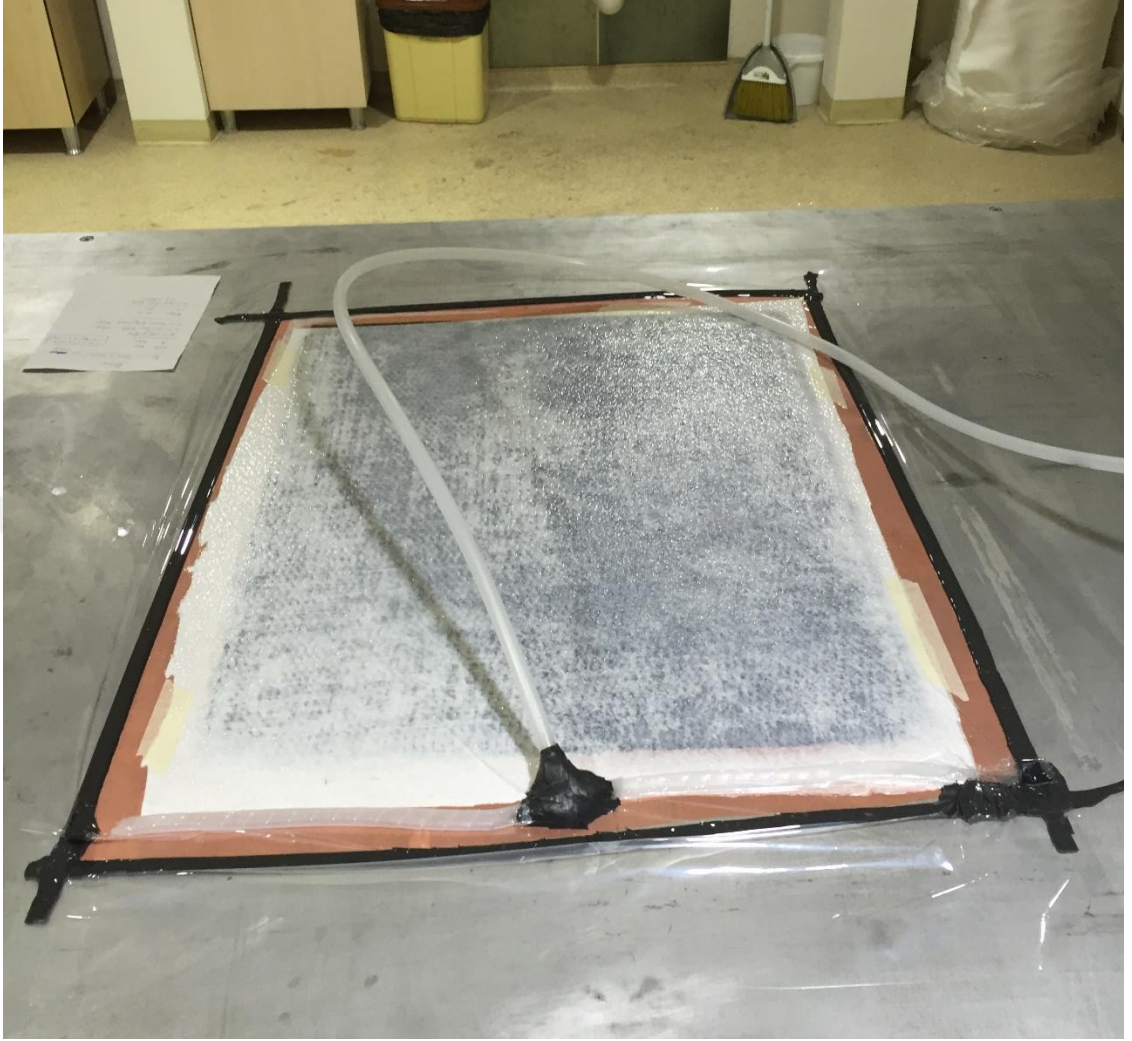
Deneysel çalışmalarda alt ve üst levhalar ortalama 1 mm kalınlıklarda fakat farklı katkı oranlarında ve türlerinde karbon fiber levhalar ile farklı yüksekliklerde (6-10-15 mm) alüminyum bal peteği çekirdek malzemeler kullanılmıştır. 25 mm genişliğinde ve 227 mm uzunluğunda olacak şekilde sandviç kompozit numuneler imal edilmiştir. Üretilecek alt ve üst levhalar Şekil 3.2’de gösterildiği gibi el yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak, tüm katkı türlerinde ve oranlarında ki karbon fiber levhalar, Şekil 3.1’de gösterilen dört tabaka karbon twill kumaş kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 3.1. Karbon twill kumaş

Karbon fiber levhalar 40 cm x 40 cm ölçülerinde üretildikten sonra deneysel olarak kullanılacak alt ve üst plaklar Şekil 3.3’de ki tezgah kullanılarak, 25 mm genişliğinde ve 227 mm uzunluğunda kesilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere üretilen W yönünde

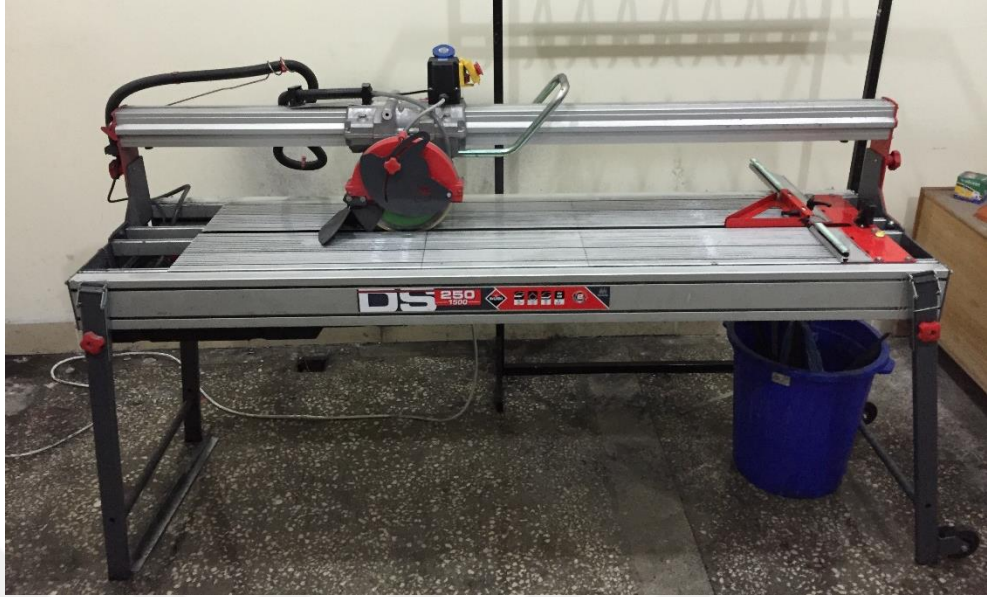
2 adet, L yönünde 33 adet peteği bulunan çekirdekler Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Bu üretilen sandviç kompozit numune çekirdeklerinin ortalama kütleleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir. Levha ve çekirdekler, Şekil 3.5’de gösterilen Araldite AW 106 TU ve HV 953 U marka yapıştırma elemanları ağırlıkça birebir oranda karıştırılmasıyla elde edilen yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. Karışım halindeki 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 3.6’te gösterilmiştir. Deneysel olarak kullanılan alt ve üst levhalara, katkı türleri B_4C , SiC ve Al_2O_3 olan seramik partiküller eklenmiştir. Kullanılan partiküller ağırlıkça %1, %2 ve %4 oranlarında hesaplanarak twill kumaşa uygulaması yapılmıştır. Üretim sonucunda oluşturulan 40 cm x 40 cm katkılı karbon fiber levhalar, çekme test cihazında 1, 2 ve 3 yönlerindeki mekanik özellikleri belirlemek için bu yönlerde kesme işlemi yapılmıştır. Doğruluk oranını artırabilmek ve hataları minimize edebilmek için her bir numuneden 5 adet üretilmiştir. Üretilen sandviç kompozitlerin deneysel çalışmasında Taquchi L9 yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.2. El yatırma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi

Çizelge 3.1. W yönünde 2 adet ve L yönünde 33 adet bal peteği bulunan alüminyum çekirdeklerin kütleleri

Çekirdek Yüksekliği		
6 mm	10 mm	15 mm
1,53 gr	2,47 gr	3,71 gr



Şekil 3.3. Sulu kesme makinası

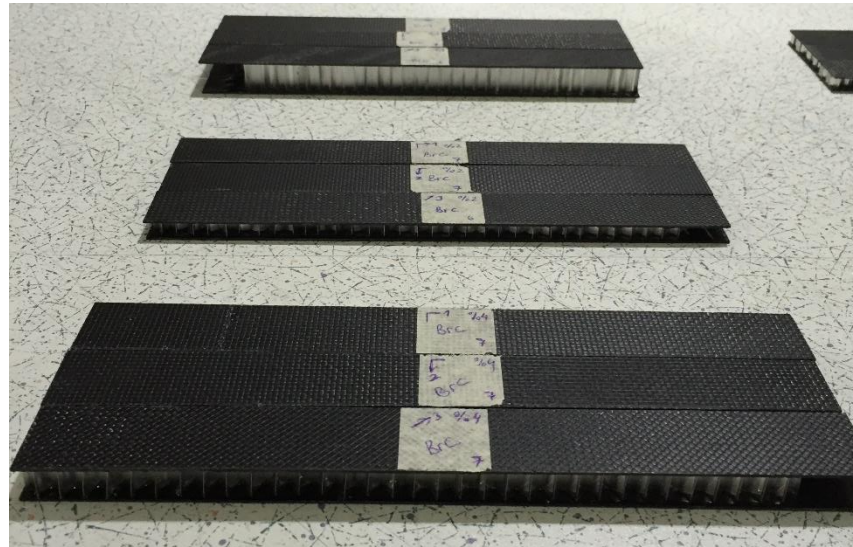
Üretimi yapılan seramik partikül katkılı karbon fiber levhaların ağırlıkça epoksi oranları %30 olması istenmiştir. Deneysel olarak üretilen tüm levhalarda epoksi oranının %28 ile %34 arasında değiştiği görülmüştür.



Şekil 3.4. Deney numunelerinde kullanılan farklı yüksekliklerdeki alüminyum bal petekleri



Şekil 3.5. Araldite AW 106 TU ve HV 953 U marka yapıştırma elemanları

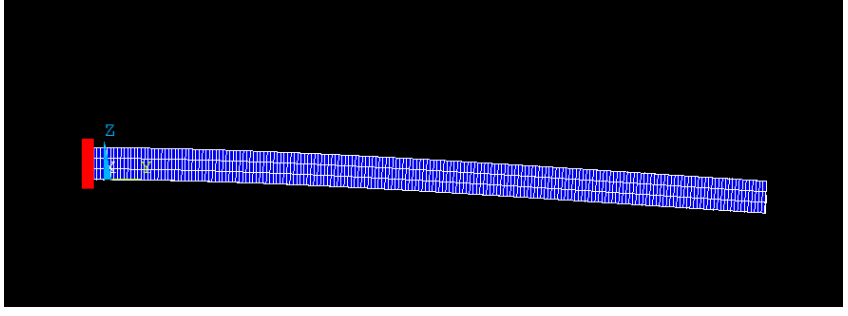
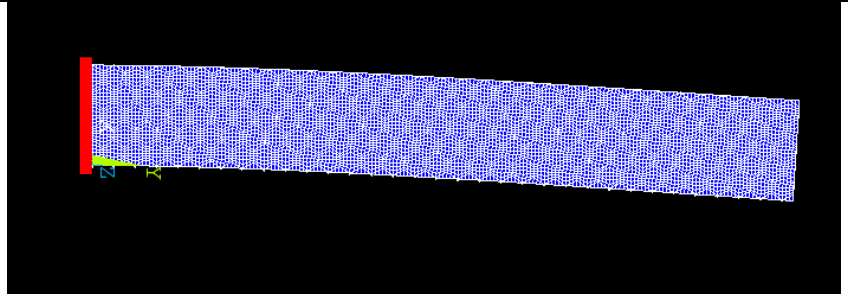


Şekil 3.6. Üretilen bazı deney numuneleri

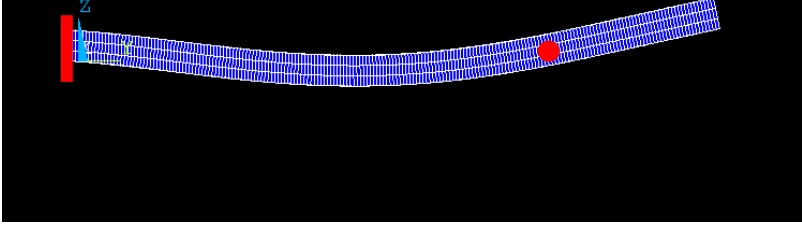
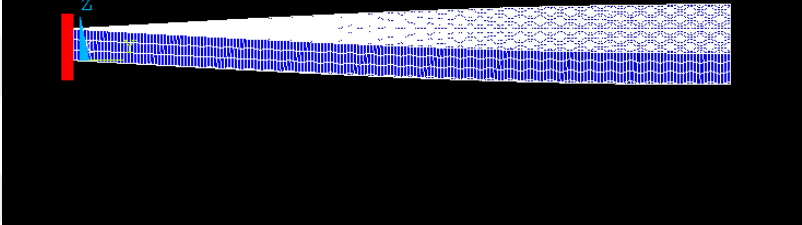
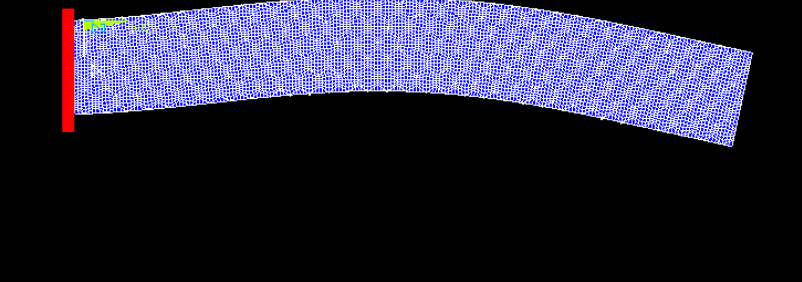
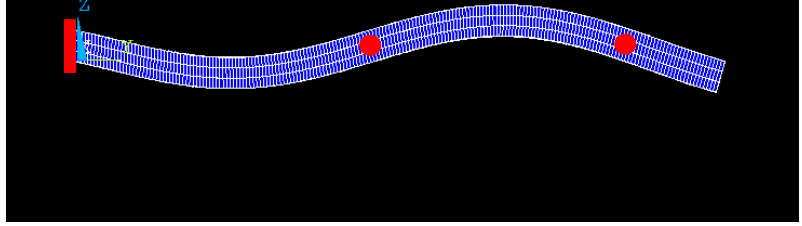
Deneyde kullandığımız 25 mm genişliğinde, 227 mm boyunda ve Şekil 3.6’de gösterilen yüksekliği 6, 10 ve 15 mm olan sandviç kompozit numunelerin deneysel sönüm oranları PULSE deney sisteminden okunan sonuçlardan elde edilmiştir. Yapılan nümerik analiz sonucunda da alınan genlik zaman değerleri Microsoft Excel programında işlenerek grafik haline getirilmiştir. Elde edilen grafikten logaritmik azalma yöntemi ile hesaplanan sönüm oranları, nümerik analiz sonucu hesaplanan sönüm oranlarıdır. PULSE titreşim ölçüm programından okunan sönüm oranı, yarı güç bant genişliği metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Nümerik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Deney numuneleri ankastre serbest sınır şartında doğal frekansları ve sönüm oranları belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucu deney numunesinin mod şekilleri Çizelge 3.2’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Ankastre – serbest sınır şartındaki kompozit sandviç numunenin mod şekilleri

Ankastre – Serbest Sınır Şartı	1.Mod	
	2.Mod	

Çizelge 3.2. (devam)

	3.Mod	
	4.Mod	
	5. Mod	
	6.Mod	

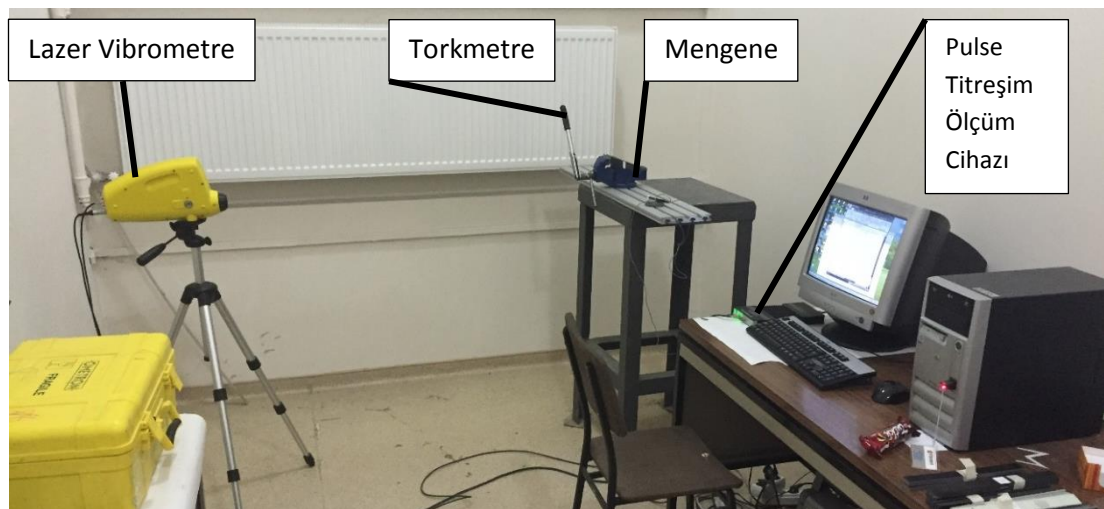
Çizelge 3.2’de sandviç kompozit numunenin mod şekilleri verilmiştir. 2. mod, 4. mod ve 5. modların düzlem dışında olduğu görülmüştür. 3. mod ve 6. mod şekillerinde titreşmeyen noktalar (nodlar) gösterilmiştir.

Çizelge 3.3’te çekirdek malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir. Üretici firma kataloglarından çekirdeğin özellikleri, deneysel çekme testi sonuçlarından ise alt ve üst levhaların farklı yönlerdeki elastisite modülü tespit edilmiştir. Alt ve üst karbon fiber levhaların poisson oranı literatürden alınmıştır.

Çizelge 3.3. Çekirdek malzemenin mekanik özellikleri

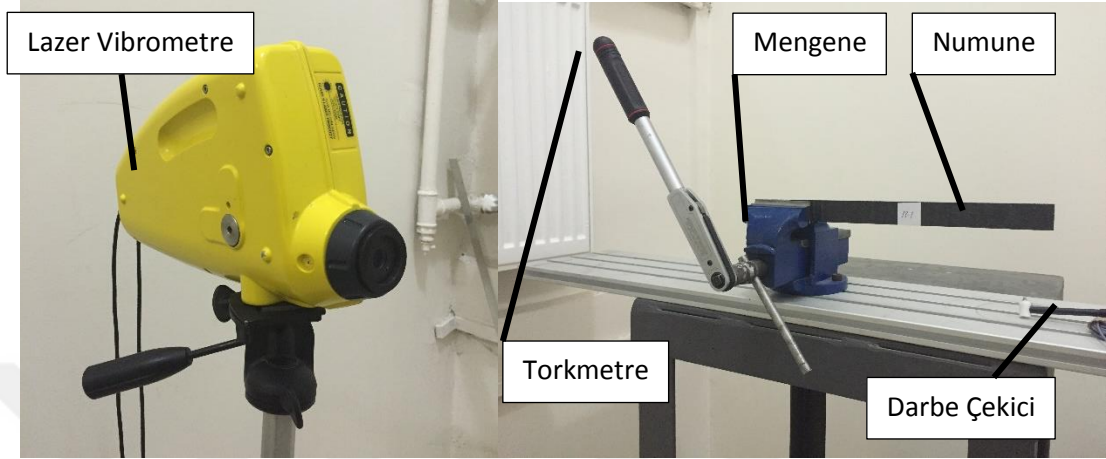
Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson Oranı
Alüminyum Bal Peteği (Çekirdek)	69 000	2 870	0,3

Şekil 3.7’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.

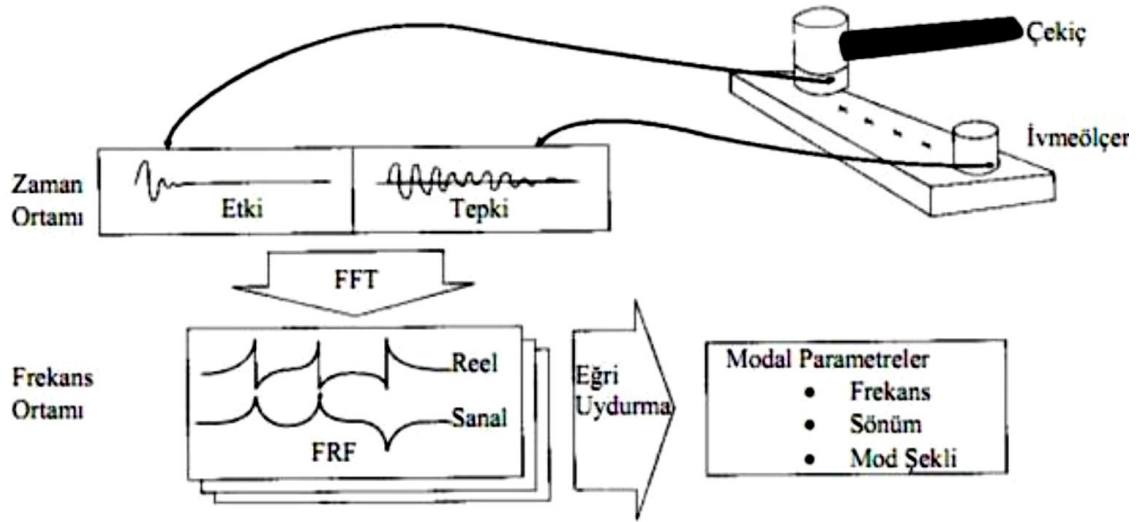


Şekil 3.7. Deney düzeneği

Şekil 3.8’de deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Deney düzeneği ekipmanları



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

Üretilen numunelerin mekanik özellikleri çekme test cihazında belirlenmiştir. Çekme test cihazı deney numunelerine uygun hızda (1mm/dk) gerilme uygulayarak, gerilme koşullarını oluşturan test cihazıdır. Bu cihaz universal çekme test cihazıdır. Cihaz

sayesinde malzemeye ait mekanik özellikler elde edilmektedir. Deneylerde kullanılan çekme test cihazının fotoğrafı Şekil 3.10’te verilmiştir.



Şekil 3.10. Çekme test cihazı

3.2. Yöntem

3.2.1. Taguchi deney tasarım yöntemi

Deney tasarımı, değişik koşullarda bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni nasıl etkilediğini araştırmak için gerekli tasarımları hazırlayan ve çözümlemelerini veren istatistik dalıdır. Deney tasarımı belirlenmiş bir tasarım yöntemine göre; deney üzerinde etkili olması muhtemel olarak düşünülen üretim değişkenlerinin sistematik olarak değiştirilerek, bir deney takımının sıralı olarak gerçekleştirilmesidir. Deney tasarımının amacı genel olarak test edilen değişkenlerin etkili olanların hangisi olduğu belirlenmesi, değişkenlerin belirli aralıkta çeşitli seviyelere etkilerinin ölçülmesi ve değişkenlere farklı etkilerin veya etkenlerin karşılaştırılmasıdır.

Taguchi yönteminin üretim gerçekleştirilmesinde, proses işleyişinde veya ürün geliştirme gibi durumlarda kullanılması; hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılması, toplam geliştirme veya üretim sürecinin düşürülmesi ve en önemlisi toplam maliyetin azalmasına etki eder.

Deney tasarımı uygulanmasında ilk olarak problemin veya araştırılacak bulguların tanımlanması gereklidir. Probleme veya araştırılacak bulgulara etki etmesi muhtemel faktörlerin listesi çıkarılmalıdır. Ayrıca etki eden faktörlerin birbirleriyle olan ilişkileri de incelenmesi gereklidir. Belirlenen faktörlerin hangilerinin deneyde incelenebileceğine karar verilmelidir. Deneyde kullanılacak faktörler sayısına bakılarak L8, L9 veya L16 gibi deney tasarım matris seçimi yapılmalıdır. Seçilen matris sistemine göre deney uygulama planı hazırlanmalıdır. Deney uygulaması yapıldıktan sonra normal olasılık grafikleri oluşturularak deney sisteminin güven aralığı belirlenmeli ve sonuçlar yorumlanmalıdır. Belirlenen veya yapılması gerekli olan deneyler yapılarak sonuçlar doğrulanmalıdır.

Deney tasarımının amacı genel olarak bir sürecin gösterdiği davranışlar hakkında bilgi toplayarak, bu sürecin kalite karakteristiklerini etkileyen faktörleri belirlemek ve sürecin

kalitesinin iyileştirilebilmesi için hangi faktörlerin hangi seviyede olması gerektiğini tespit etmektir. Böylece süreçten beklenen performansın elde edilmesi için optimum faktör seviyeleri belirlenmiş ve sürecin kalitesi geliştirilmiş olur.

Deney tasarlamasının amacı araştırılan, ön görülen veya hedeflenen sonuçları ve bu sonuçlardan meydana gelen sapmaları ve çıktıları doğru bir şekilde analiz etmek için kullanılan deney numunelerini etkili bir şekilde planlamaktır. Bu nedenle Taguchi yönteminde çeşitli tasarım matrisleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada üç farklı parametre ve üç farklı seviye kullanıldığı için Taguchi L9 yöntemi ile deney tasarımı yapılmıştır. Çizelge 3.4.'de Taguchi L9 yönteminde kullanılan parametre ve seviyeler tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 3.4. Taguchi L9 yönteminde kullanılan faktörler

		FAKTÖRLER		
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
A	Katkı Türü	Al ₂ O ₃	SiC	B ₄ C
B	Katkı Oranı	%1	%2	%4
C	Çekirdek Yüksekliği	6 mm	10 mm	15 mm

Yapılan çalışmada sandviç kompozit malzeme parametrelerinin, doğal frekansa ve sönüm oranına etkileri araştırılmaktadır. Çalışmada kullanılan faktörlerin her biri üç seviyeliştir.

Çizelge 3.5. Taguchi L9 yöntemine göre üretilen deney numuneleri ve özellikleri

DENEY NUMUNELERİ			
Deney No	(A) Katkı Türü	(B) Katkı Oranı	(C) Çekirdek Yüksekliği
1	Al ₂ O ₃	%1	6 mm
2	Al ₂ O ₃	%2	10 mm

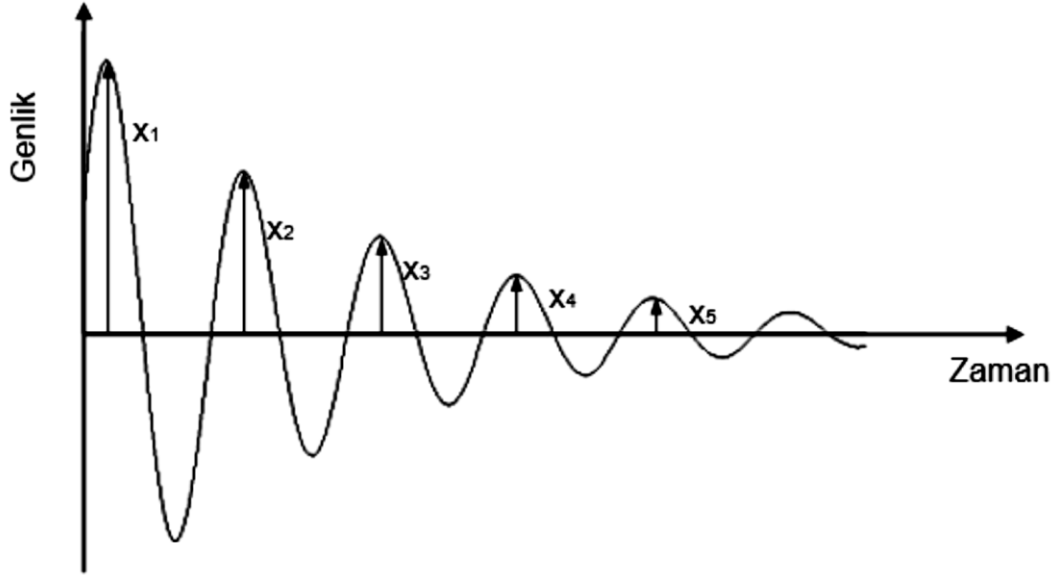
Çizelge 3.5. (devam)

3	Al_2O_3	%4	15 mm
4	SiC	%1	10 mm
5	SiC	%2	15 mm
6	SiC	%4	6 mm
7	B_4C	%1	15 mm
8	B_4C	%2	6 mm
9	B_4C	%4	10 mm

Çizelge 3.5’de Taquchi L9 yöntemi kullanılarak oluşturulan deney numune tablosu verilmiştir. Bu tabloya göre üretimler gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Sönüm oranı hesabı

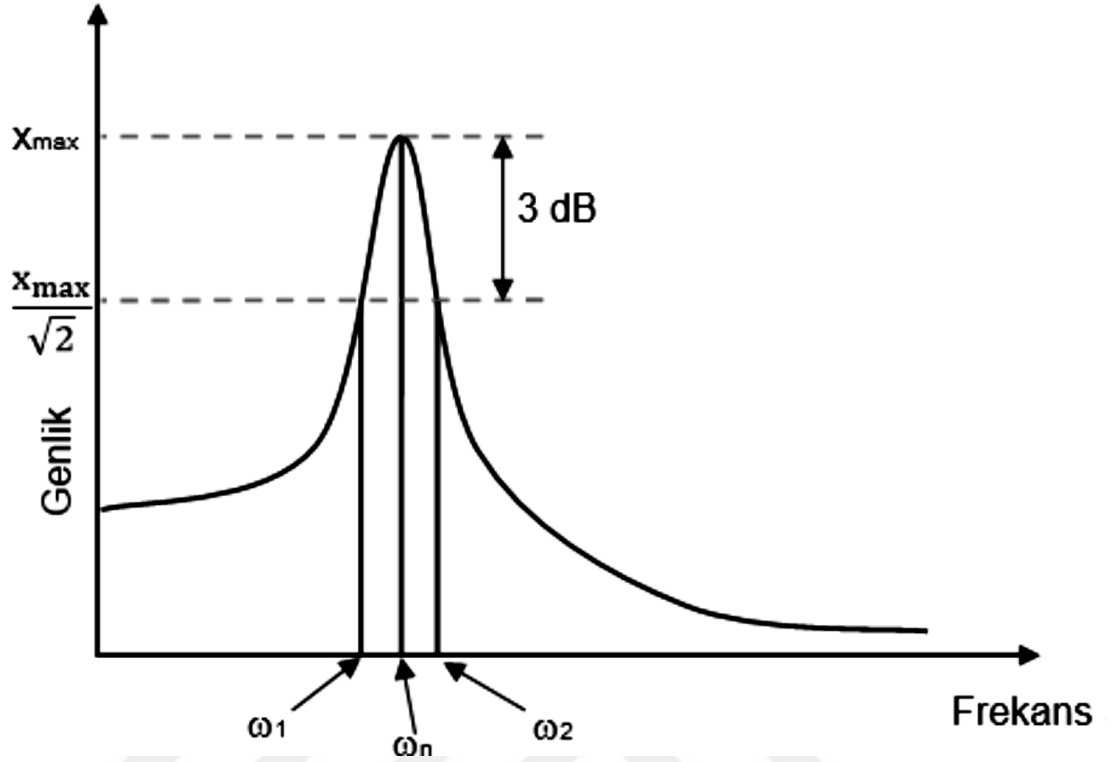
Sönüm oranını ölçmek için faydalandığımız yöntemlerinden birisi logaritmik azalma metodudur. Logaritmik azalma metodu, sönüm oranını, genlik-zaman aralığında ölçmek için kullanılır. Şekil 3.11’de serbest titreşim yapan bir sistem için genlik-zaman grafiği gösterilmiştir. Bu metotta sistem üzerine uygulanan 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 3.11. Serbest titreşim yapan bir sistem için genlik-zaman grafiği

Yukarıdaki gibi elde edilen bir grafikten herhangi iki tepeye ait genlik oranları okunarak denklemler yardımıyla ilgili malzemeye ait sönüm oranı belirlenebilir. Deneyde kullandığımız kompozit sandviç numunenin nümerik olarak sönüm oranı bu metotla belirlenmiştir.

Sandviç yapıların sönüm özelliklerini belirlediğimiz diğer bir metot da deneylerde kullandığımız bilgisayar tabanlı PULSE titreşim ölçüm cihazında kullanılan yarı güç bant genişliği metodudur. Bu program bize doğrudan malzemelerin rezonans frekanslarına karşılık gelen sönüm oranlarını vermektedir. Titreşim ölçüm programı, sönüm oranını, aşağıda anlatılan ve yarı güç bant genişliği (half-power bandwidth) adı verilen metot kullanarak hesaplamaktadır. (Şekil 3.12).



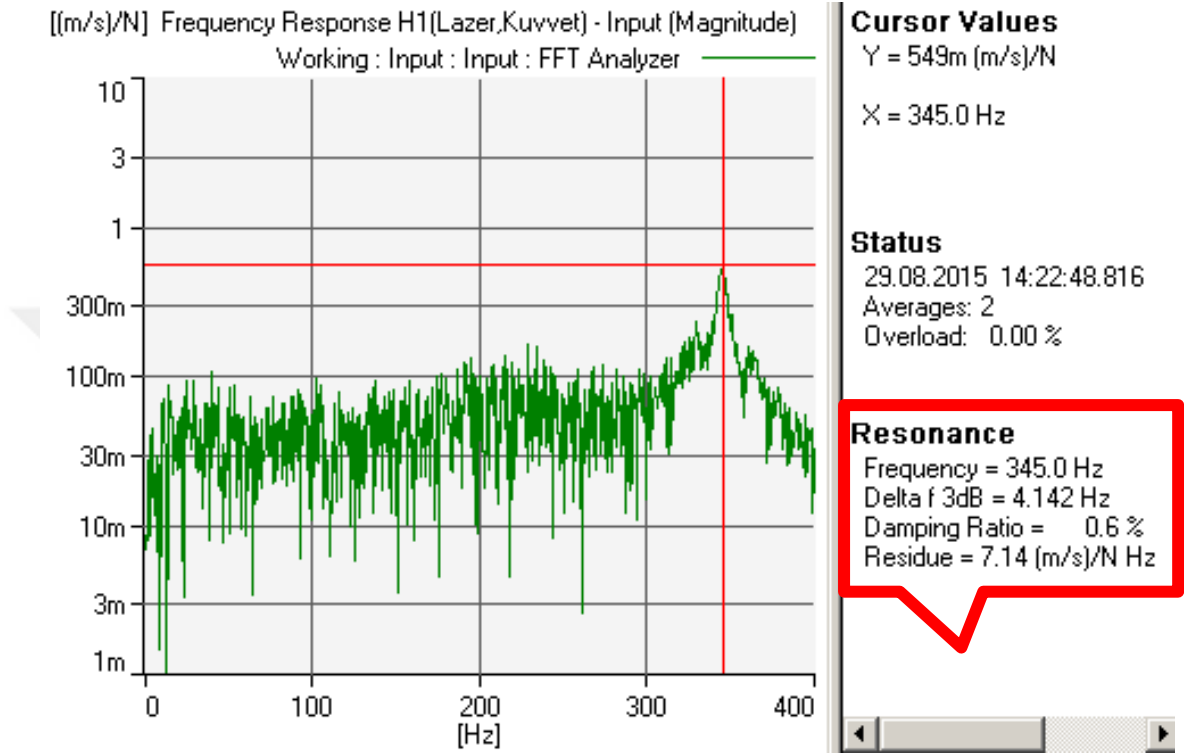
Şekil 3.12. Yarı güç bant genişliği metodu

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, ω_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 3.13’de PULSE ölçüm sisteminden alınan yüksek çözünürlükteki 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.



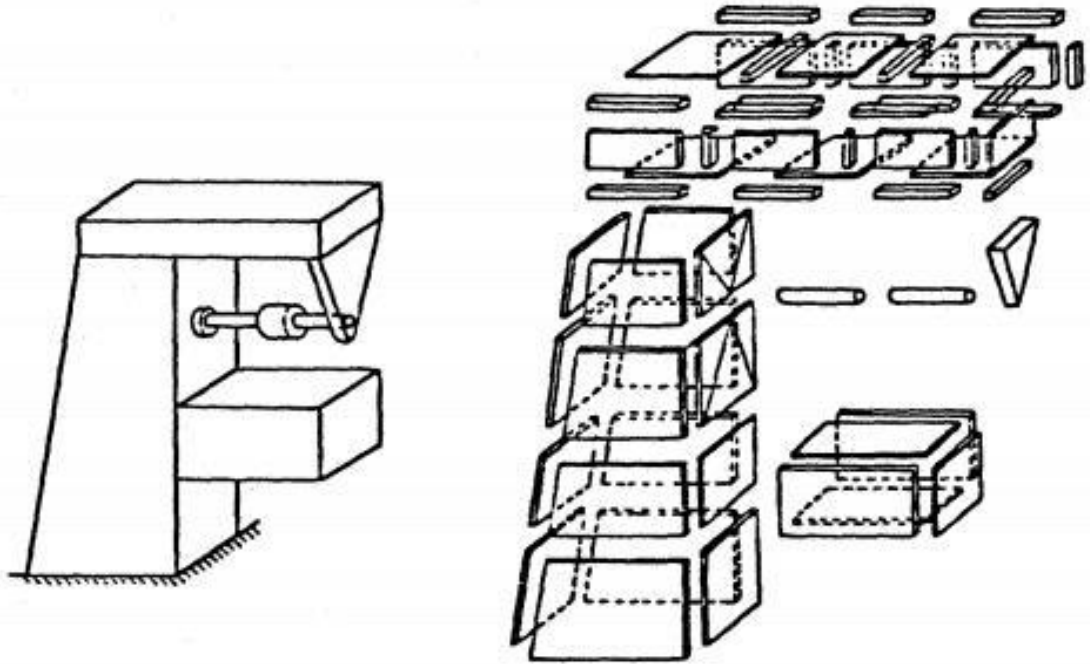
Şekil 3.13. PULSE ölçüm sisteminden alınan rezonans frekansını ve sönüm oranını gösteren FRF grafiği

3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metottur. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarıyla kullanılabileceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan birisi olmuştur. Metodun 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

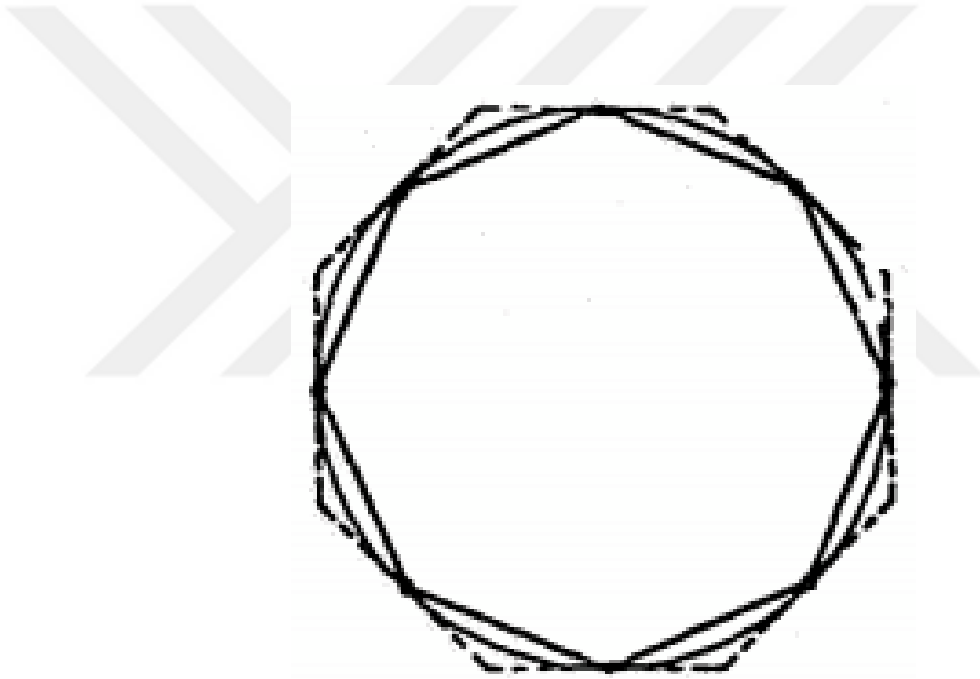
kullanılabilmesidir. Bu yöntem ile bir problemi çözerken sınır şartları, kuvvetler ve malzeme özellikleri gibi değişkenler rahatlıkla değiştirilebilir.

Sonlu elemanlar metodundaki 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 metodu kullanılabilecek tek metot olmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesi, çok sayıda, basit, küçük, birbirine bağlı, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Bu metodun, freze tezgâhı gibi karmaşık bir geometrik şekli modellemek için nasıl kullanılabileceği Şekil 3.14’de 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 3.14. 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 3.15’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 sınırlarıdır. Çokgenin kenar sayısının artırılması ile, bu yöntemle bulunacak olan yaklaşık çözüm yukarıdan veya aşağıdan gerçek çözüme ulaşacaktır.



Şekil 3.15. Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı vasıtasıyla bulunması (Arıkan 2010)

3.2.4. 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.

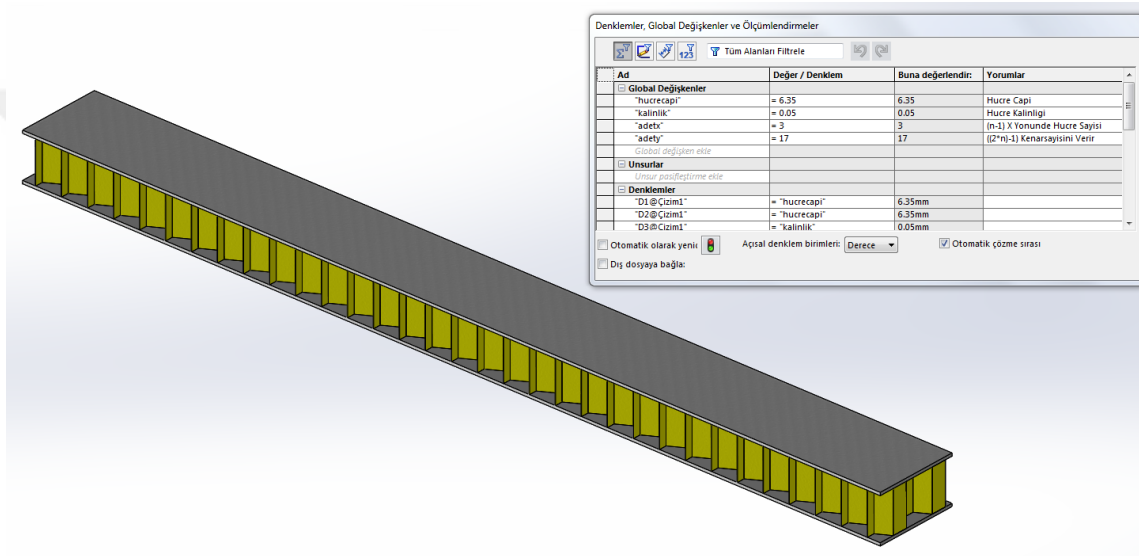
3.2.5. Sonlu elemanlar yöntemi analizleri

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 Mechanical APDL 14 paket programı kullanılmıştır. Aynı zamanda geometri SolidWorks programında ve ANSYS Mechanical APDL 14 paket programında parametrik hale getirilmiştir. Bu sayede deneyde kullandığımız numunelerin geometrik şekli SolidWorks programında otomatik olarak çizilip, ANSYS paket programına aktarılabilir durumdadır.

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 (Figes 2013).

Alt-üst levha katkı oranı ve türü, çekirdek yüksekliği farklılıkları olmak üzere toplam 9 adet farklı model oluşturulmuştur (Çizelge 3.3). Aynı zamanda L9 Taguchi yöntemine

göre incelenmesi gereken numuneler ayrı ayrı deney numunesi olarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin sürekliliği sağlanabilmesi ve doğruluğu saptanabilmesi için aynı üretim şartlarında aynı özelliklerde iki ayrı levha üretilmiştir. Numunelere uygulanan işlemler birbirleriyle benzerlik gösterdiği için; yüzey levha kalınlığı 1mm, uzunluğu 227 mm, genişliği 25 mm ve hücre kalınlığı 0.05 mm alınan numune ele alınmıştır. Şekil 3.16’da parametrik olarak oluşturulan sandviç yapı gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Parametrik olarak oluşturulan örnek sandviç yapı

Şekil 3.17’de SolidWorks programında ve ANSYS 14 programında parametrik olarak oluşturulan değerler gösterilmiştir.

Denklemler, Global Değişkenler ve Ölçümlendirmeler				
Ad	Değer / Denklemler	Buna değerlendir:	Yorumlar	
Global Değişkenler				Tamam
"hucrecapi"	= 6.35	6.35	Hucre Capi	İptal
"kalınlık"	= 0.05	0.05	Hucre Kalınlığı	Al...
"adetx"	= 3	3	(n-1) X Yonunde Hucre Sayisi	Ver...
"adety"	= 17	17	((2*n)-1) Kenarsayisini Verir	Yardım
<i>Global değişken ekle</i>				
Unsurlar				
<i>Ursur pozisifleştirme ekle</i>				
Denklemler				
"D1@Çizim1"	= "hucrecapi"	6.35mm		
"D2@Çizim1"	= "hucrecapi"	6.35mm		
"D3@Çizim1"	= "kalınlık"	0.05mm		
"D4@Çizim1"	= "kalınlık"	0.05mm		
"D5@Çizim1"	= "hucrecapi"	6.35mm		
"D6@Çizim1"	= "kalınlık"	0.05mm		
"D7@Çizim1"	= "kalınlık" * 2	0.1mm		
"D8@Çizim1"	= "hucrecapi"	6.35mm		
"D9@Çizim1"	= "kalınlık"	0.05mm		
"D10@Çizim1"	= "kalınlık" * 2	0.1mm		
"D11@Çizim1"	= "adetx"	3		
"D12@Çizim1"	= "adety"	17		
"D13@Çizim1"	= "kalınlık"	0.05mm		
"D14@Çizim1"	= "kalınlık" * 2	0.1mm		
"D17@Çizim1"	= "kalınlık"	0.05mm		
"D20@Çizim1"	= ((("hucrecapi" * 2 / (3 ^ (1	20.34mm		
"D21@Çizim1"	= (((("adety" * 2) - 1) * ("t	212.85mm		
"D16@Çizim1"	= (((("kalınlık" / cos (30)) - (	1.89mm		
"D1@Çizim2"	= ((("hucrecapi" * 2 / (3 ^ (1	20.34mm		
"D2@Çizim2"	= (((("adety" * 2) - 1) * ("t	212.85mm		
<i>Denklemler Ekle</i>				

/PREP7

```

!*ask,h,Hucre Yuksekligi (Metre),(6/1000)
!*ask,tLev,Levha Kalınlığı (Metre),(0.7/1000)
!*ask,tHuc,Hucre Kalınlığı (Metre),(0.05/1000)
!*ask,dHuc,Hucre Capi (Metre),(6.35/1000)
!*ask,xCopy,X Yonunde Hucre Sayisi (Adet),(3)
!*ask,yCopy,Y Yonunde Hucre Sayisi (Adet),(5)

!Parametre Girisi
yukseklık=6/1000
levkalınlık=0.7/1000
hucrekalınlık=0.05/1000
hucreiccap=6.35/1000
copyx=xCopy
copyy=yCopy

! Hesaplamalar
hucrecapi=hucreiccap
kenar=hucrecapi/(sqrt(3))

ET,1,SHELL181
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,8,2
ET,2,SHELL181
KEYOPT,2,3,2
KEYOPT,2,8,2

MP,EX,1,690000000000 ! Pa Material Property 1 (Cell)

! SECTYPE,2,SHELL
! SECDATA,0.05,2,0
! SECDATA,0.05,2,90
! SECDATA,0.05,2,0
! SECDATA,0.05,2,90

MP,EX,2,530000000000 ! Pa Material Property 2 (Plate)
MP,EY,2,530000000000 ! Pa Material Property 2 (Plate)
MP,EZ,2,530000000000 ! Pa Material Property 2 (Plate)
MP,GXY,2,530000000000 ! Pa Material Property 2 (Plate)
MP,GYZ,2,530000000000 ! Pa Material Property 2 (Plate)
MP,GXZ,2,530000000000 ! Pa Material Property 2 (Plate)
MP,PRXY,2,0.33 ! Plate Poison Oranı
MP,PRYZ,2,0.33 ! Plate Poison Oranı
MP,PRXZ,2,0.33 ! Plate Poison Oranı

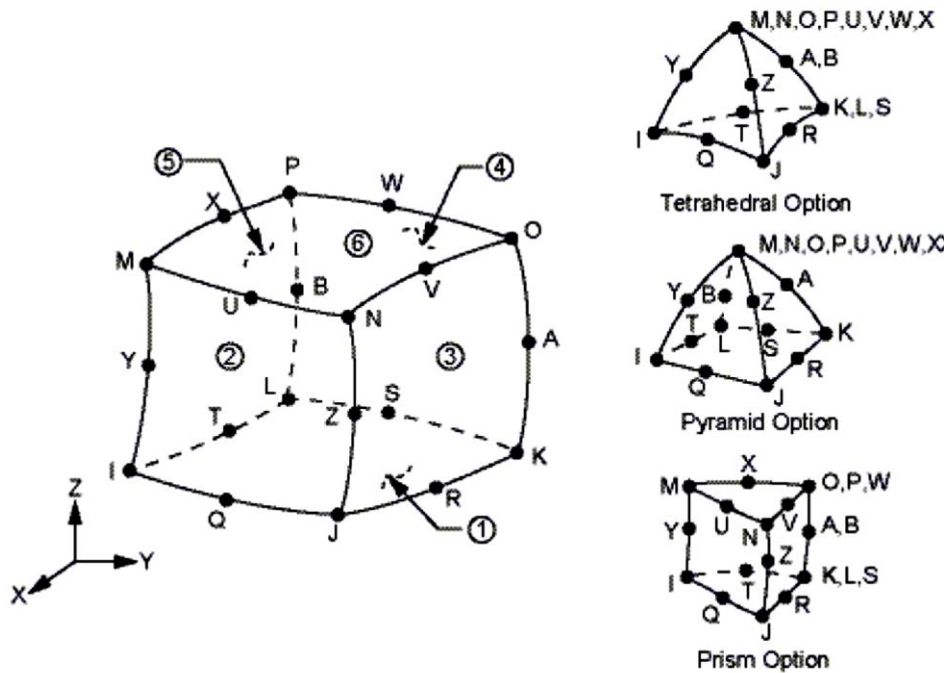
MP,PRXY,1,0.33 ! Cell Poison Oranı

```

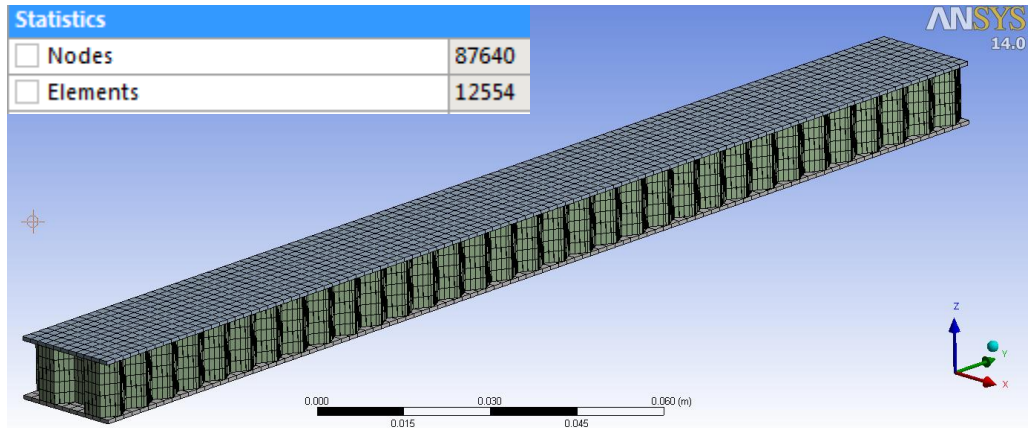
Şekil 3.17. SolidWorks ve ANSYS programında parametrik olarak tanımlanan değerler

Deneysel çalışmada kullanılacak olan numunelerin, nümerik analizleri için gerekli olan mekanik özellikleri (E_1 , E_2 , E_3), çekirdek yükseklikleri, W ve L yönündeki petek adetleri, hücre malzemesinin kalınlığı ve alt-üst levha kalınlıkları parametrik olarak değerler verilebilir ve değiştirilebilir durumdadır. Deneysel çalışmada 3 adet farklı seviye ve 3 adet farklı faktör bulunmaktadır. Bu durumda deneysel olarak incelenmesi gereken numunelerin toplamı 27 adet olmaktadır. L9 Taguchi yönteminde incelenmesi gereken deneysel numuneler 9 adete indirilmiştir. Bu sayede hem zamandan kazanılmış hem de deneyde kullanılacak malzeme miktarı azaltılmıştır.

Daha öncede bahsedildiği gibi analiz edilen geometriyi iyi tanımlayabilmek için mesh kalitesinin iyi olması gereklidir. 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. Şekil 3.19’da gösterilen numune için toplam 12554 eleman ve 87640 nod kullanılmıştır. Diğer numunelerde bu sayılar değişmektedir.

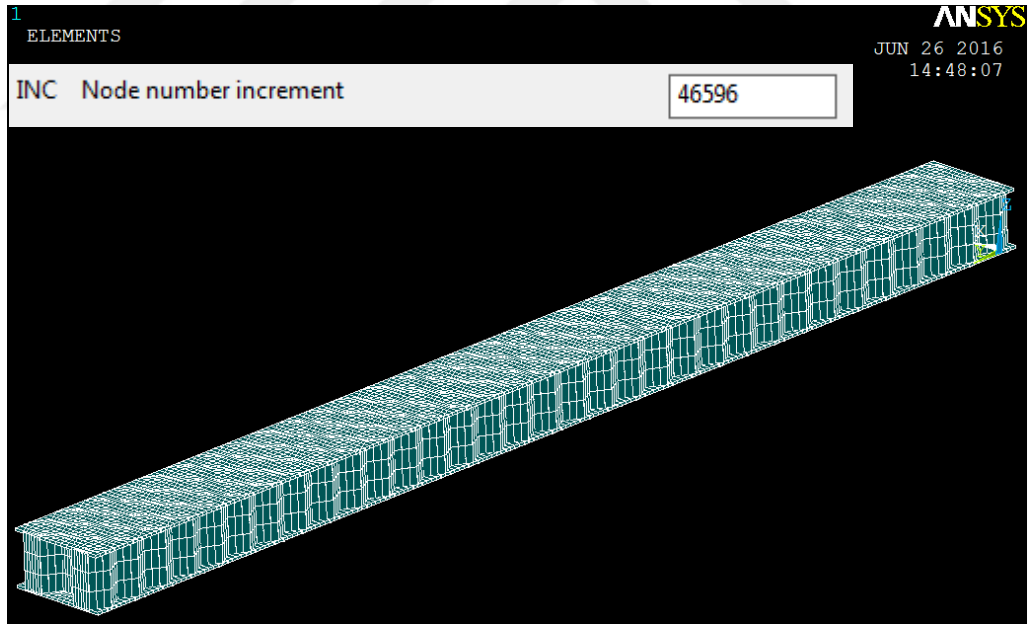


Şekil 3.18. Meshlemede kullanılan bazı eleman tipleri (ANSYS 2012)



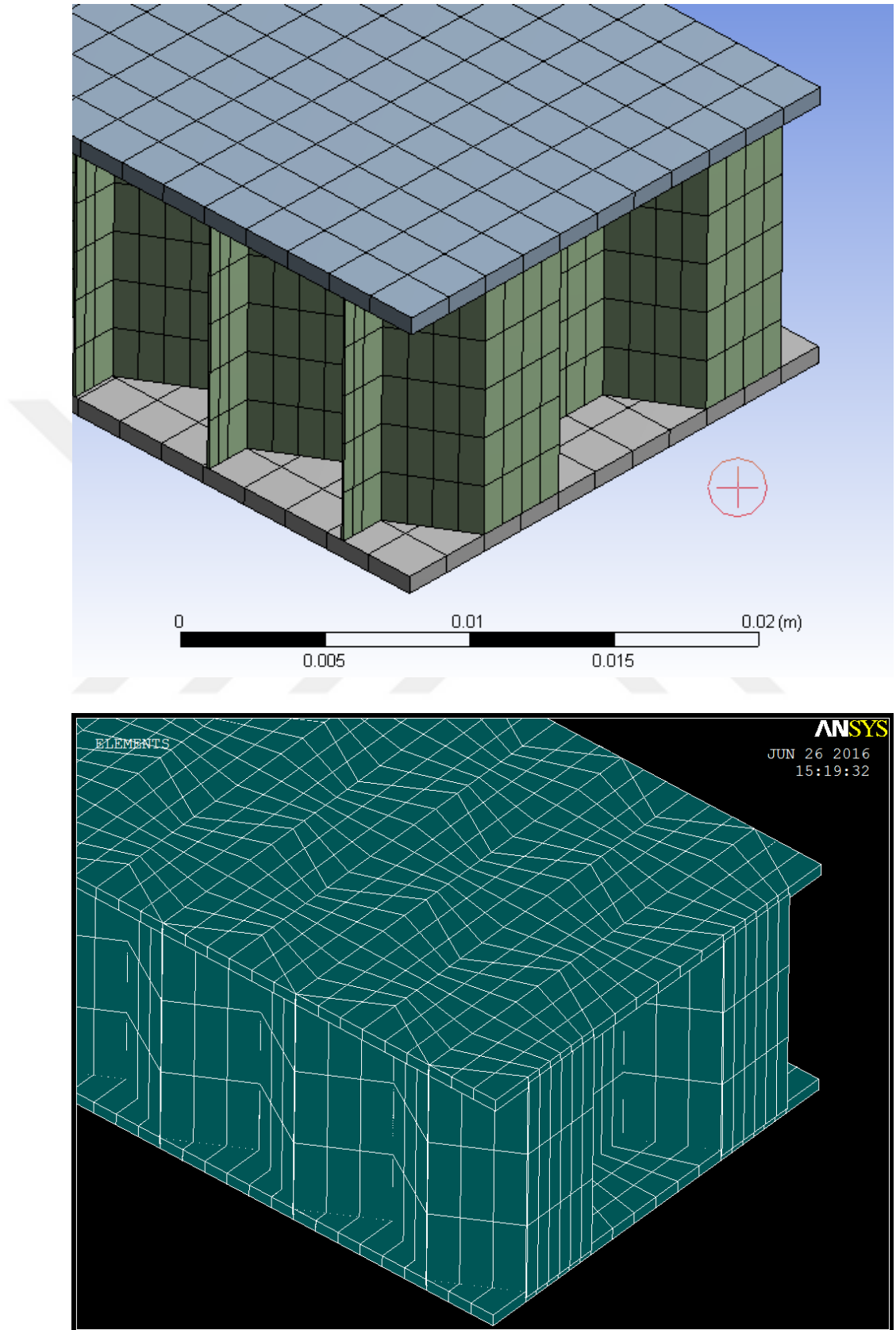
Şekil 3.19. Sandviç kompozit yapının ANSYS Workbench’de meshlenmesi

Şekil 3.20’de aynı sandviç yapının ANSYS Mechanical APDL 14 paket programında meshlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Sandviç kompozit yapının ANSYS Mechanical APDL’de meshlenmesi

Kullanılan iki paket programda da aynı geometri kullanılmıştır. Modeli oluşturulan sandviç kompozit numunenin W yönünde 2 adet, L yönünde 33 adet petek hücresi bulunmaktadır. Programlarda uygulanan iki farklı meshleme Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Sandviç kompozit yapıya uygulanan iki farklı mesh geometrisi

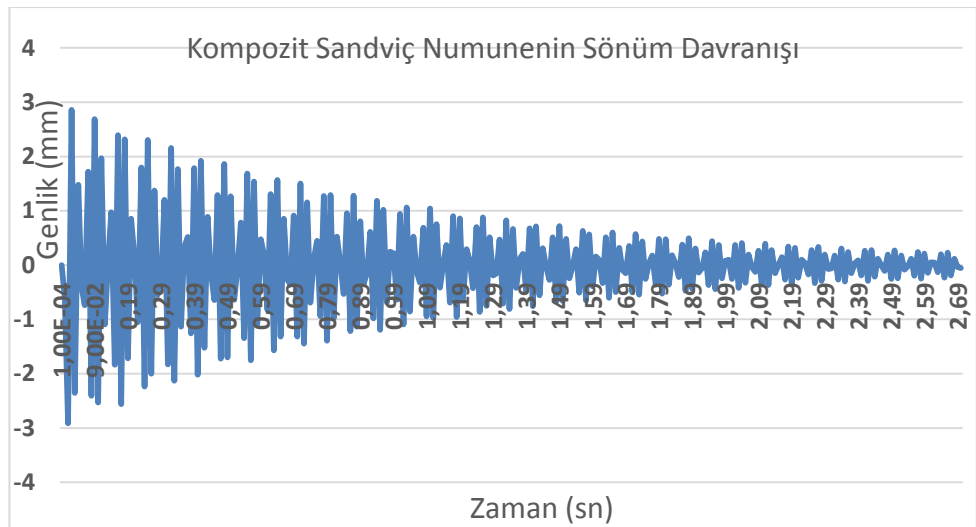
Şekil 3.21’de iki farklı meshleme geometrisi görülmektedir. Workbench’te uygulanan meshlemede nod sayısı 87640 iken Mechanical APDL bu sayı 46596 olduğu görülmektedir. Sonlu elemanların geometri düzeltilmiştir. Sonucunda çözüm yapılacak nod sayısı azaltılmıştır. Kullanılan sonlu elemanların mesh kalitesi arttırılarak daha az zamanda çözüm yapılabilmiş ve daha doğru çözüme ulaşmak amaçlanmıştır.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

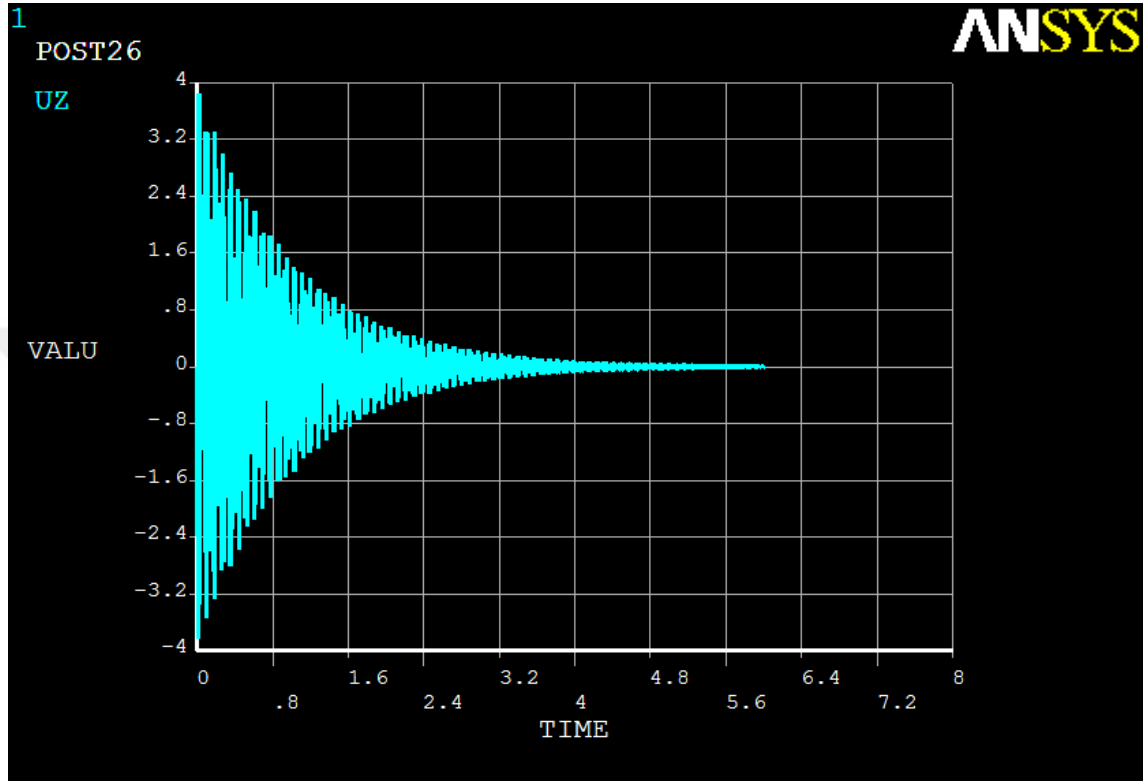
Deneyde kullandığımız 25 mm genişliğinde, 227 mm boyunda ve Şekil 3.6’de gösterilen yüksekliği 6, 10 ve 15 mm olan sandviç kompozit numunelerin deneysel sönüm oranları PULSE deney sisteminden okunan sonuçlardan elde edilmiştir. Yapılan nümerik analiz sonucunda da alınan genlik zaman değerleri Microsoft Excel programında işlenerek grafik haline getirilmiştir. Elde edilen grafikten logaritmik azalma yöntemi ile hesaplanan sönüm oranları, nümerik analiz sonucu hesaplanan sönüm oranlarıdır. PULSE titreşim ölçüm programından okunan sönüm oranı, yarı güç bant genişliği metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Nümerik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Deneylerde kullanılan sandviç bir numunenin, nümerik analiz sonucu hesaplandıktan sonra Excel programında oluşturulmuş sönüm davranış grafiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Microsoft Excel programı kullanılarak grafik oluşturulmasının temel nedeni grafik üzerinden tepe değerlerinin kolaylıkla okunabilir oluşudur. Bunun yanında elde edilen aynı sönüm oranı grafiği, nümerik analiz sonucu program çıktısı olarak Şekil 4.2’de gösterildiği gibi verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneyde kullanılan kompozit sandviç numunenin nümerik sönüm davranışı

Nümerik olarak ANSYS Mechanical APDL’de hesaplanan ve program çıktısı olarak verilebilen sönüm oranı grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Numunenin ankastre serbest sınır şartında nümerik olarak hesaplanan ve program çıktısı olarak verilen sönüm oranı grafiği

Elde edilen Şekil 4.1’deki sönüm oranı grafiğinde, logaritmik azalma yöntemi kullanılarak nümerik sönüm oranı değerleri hesaplanmıştır. Yukarıdaki grafikler, katı modeli oluşturulan ve mekanik özellikleri belirlenmiş örnek bir numunenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sönüm davranış grafikleridir. Örnek olarak tasarlanan katı model parametrik hale getirilmiştir. Model W yönünde 3 adet, L yönünde 33 adet şeklinde oluşturulmuştur. Alt ve üst levha kalınlıkları 0.7 mm ve çekirdek yüksekliği 6 mm’dir. Modeli oluşturulan kompozit malzeme ankastre – serbest sınır şartında olup, serbest ucundan 200 Newton değerinden ilk anda kuvvet uygulanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen yukarıdaki grafikten yararlanarak modelini oluşturduğumuz numunenin periyodunu, frekansını ve sönüm oranını bulmak için aşağıdaki işlemler yapılmıştır.

Grafikten alınan salınım sayısı, $n = 35$

İlk genlik değeri, $x_0 = 2,86 \text{ mm}$

Son genlik değeri, $x_n = 0,119758 \text{ mm}$

İlk genlik için geçen süre, $t_0 = 0,02 \text{ sn}$

Son genlik için geçen süre, $t_n = 2,68 \text{ sn}$ olarak okunmuştur.

$$\text{Periyot, } T_d = \frac{t_n - t_0}{n} = 0,076 \text{ sn} \quad (3.2)$$

$$\text{Frekans ise, } \omega_d = \frac{2\pi}{T_d} = 82,63 \text{ Hz} \text{ olarak bulunmuştur.} \quad (3.3)$$

Kompozit sandviç kirişin logaritmik azalması,

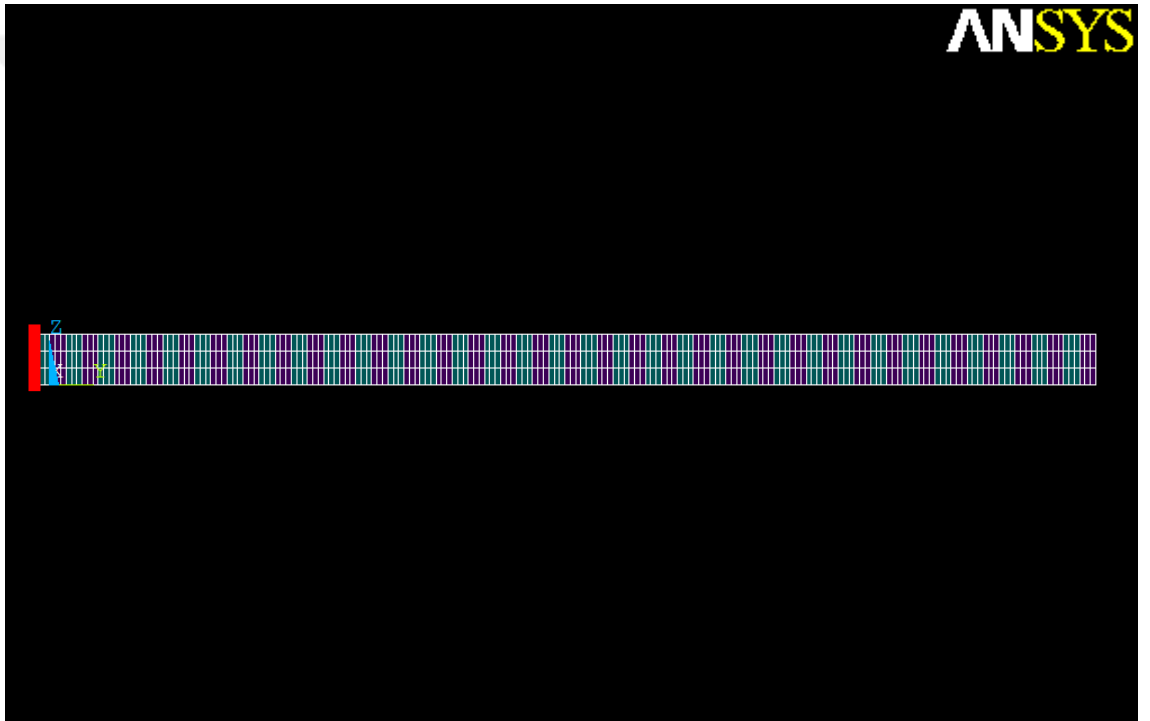
$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_0}{x_n} \right) = 0,09066 \text{ olarak hesaplanmıştır.} \quad (3.4)$$

Sönüm oranı ise,

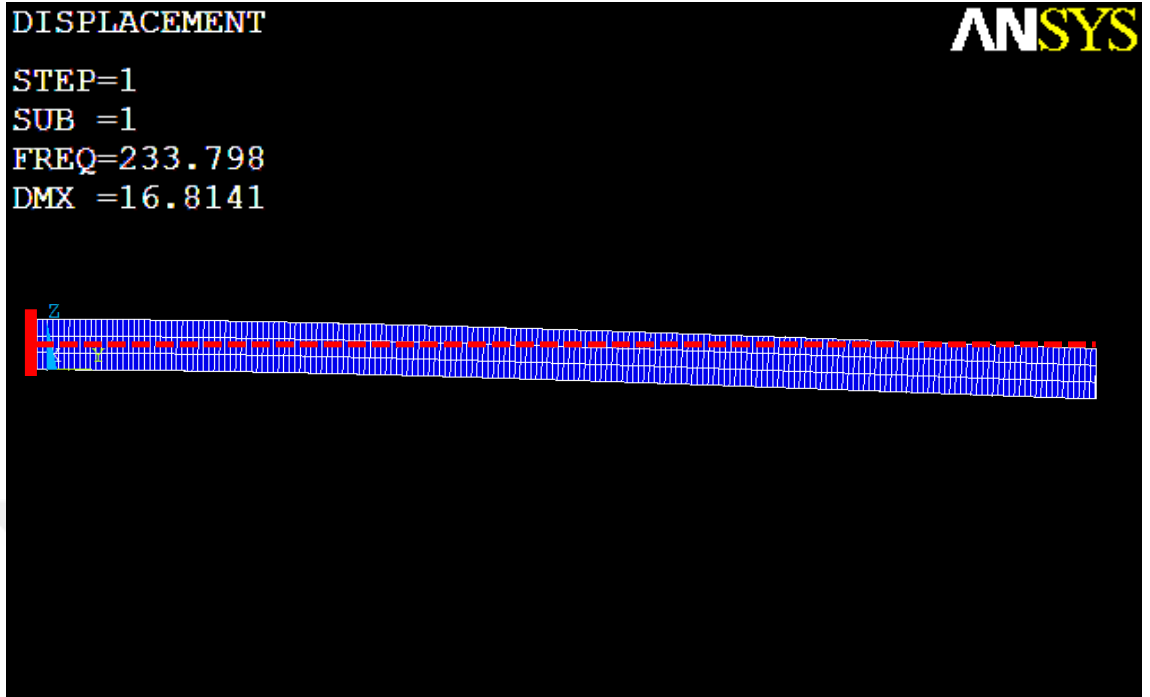
$$\zeta = \frac{\delta^2}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} = 0,001308 \text{ olarak hesaplanmıştır.} \quad (3.5)$$

Yukarıda yapılan hesaplamalar her numune için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deney için hazırlanılan bir numunenin nümerik olarak sönüm oranı logaritmik azalama yöntemi ile hesaplandıktan sonra deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin deneysel olarak hesaplanan sönüm oranı ve frekans değerleri Pulse titreşim ölçüm seti vasıtasıyla elde edilmiştir. Deney sisteminde ankastre uca (mengeneye) bağlanan her numune eşit momentte sıkıştırılmıştır. Şekil 3.13’de PULSE ölçüm sisteminden alınan yüksek çözünürlükteki 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

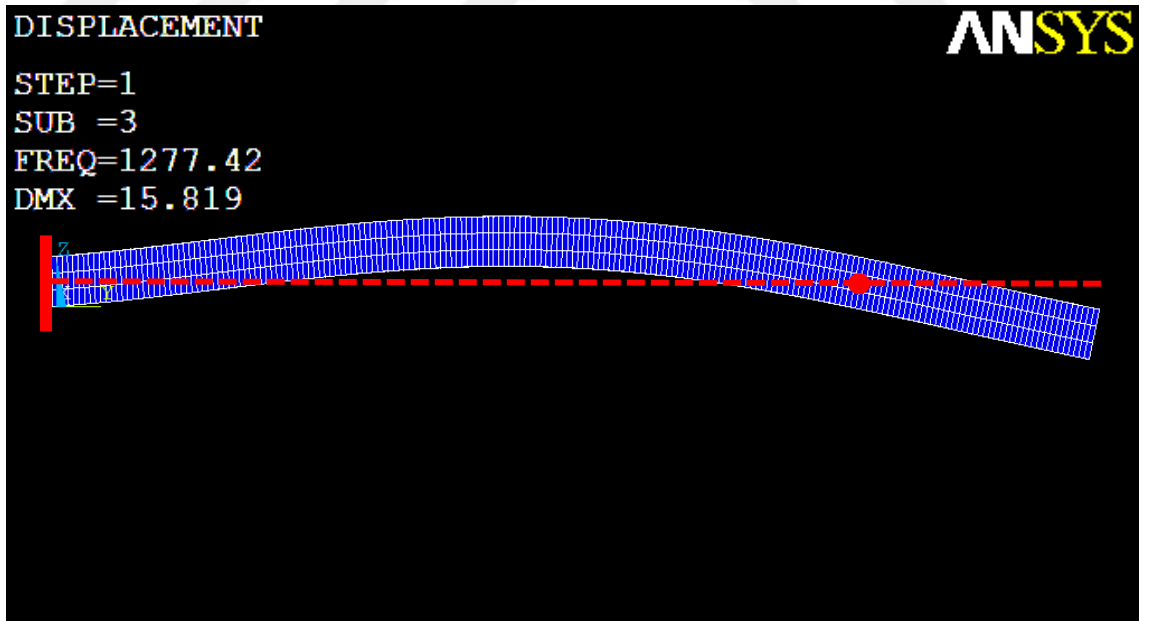
Şekil 4.3’de numunenin ankastre serbest sınır şartındaki uyarılmamış normal hali, Şekil 4.4’de numunenin aynı sınır şartındaki ilk doğal frekansı ve mod şekli, Şekil 4.5’de numunenin aynı sınır şartındaki düzlem içi ikinci doğal frekansı ve mod şekli ve Şekil 4.6’de numunenin aynı sınır şartındaki düzlem içi üçüncü doğal frekansı ve mod şekli gösterilmiştir. Diğer numuneler içinde benzer mod şekilleri elde edildiği için onların mod şekilleri gösterilmemiştir. Değişen değerler sadece numunelerin frekans ve sönüm oranı değerleridir.



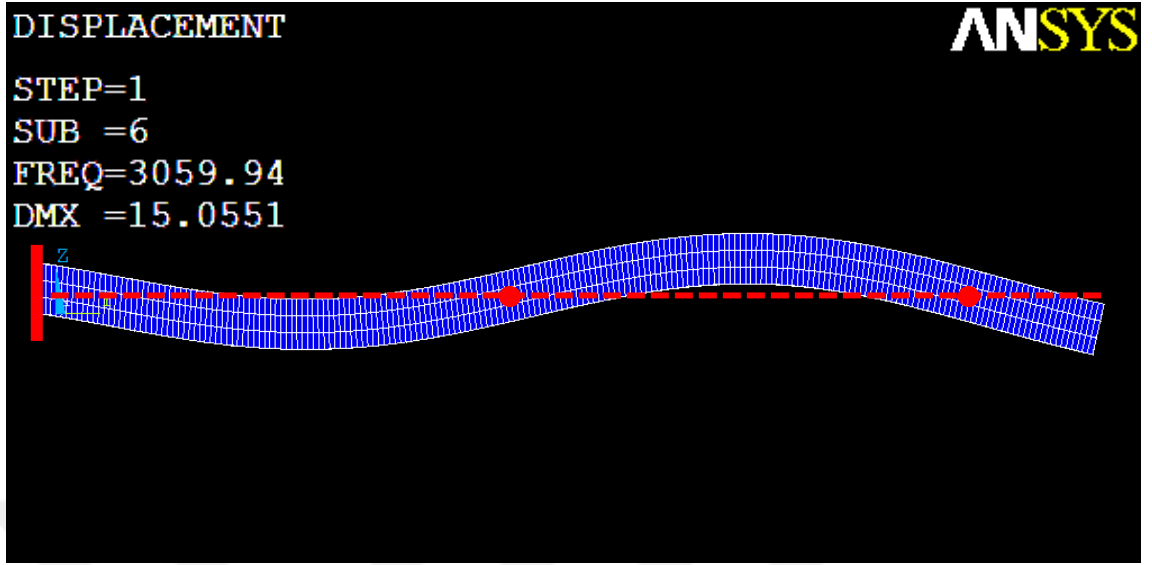
Şekil 4.3. Numunenin ankastre serbest sınır şartındaki uyarılmamış normal hali



Şekil 4.4. Numunenin ankastre serbest sınır şartındaki ilk doğal frekansı ve mod şekli

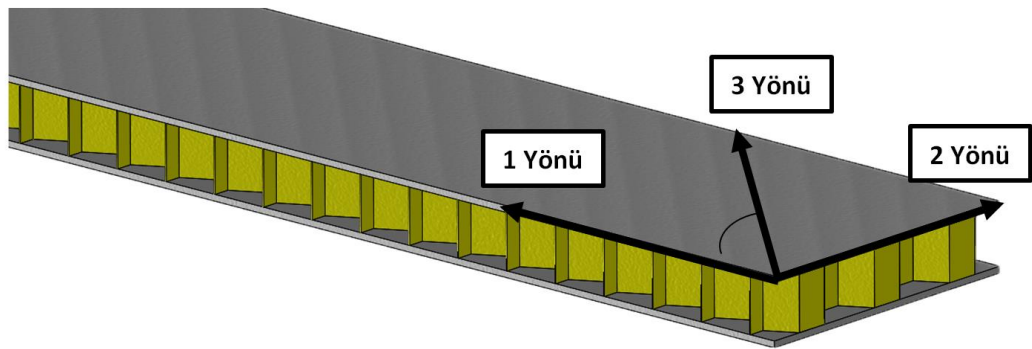


Şekil 4.5. Numunenin ankastre serbest sınır şartındaki düzlem içi ikinci doğal frekansı ve mod şekli

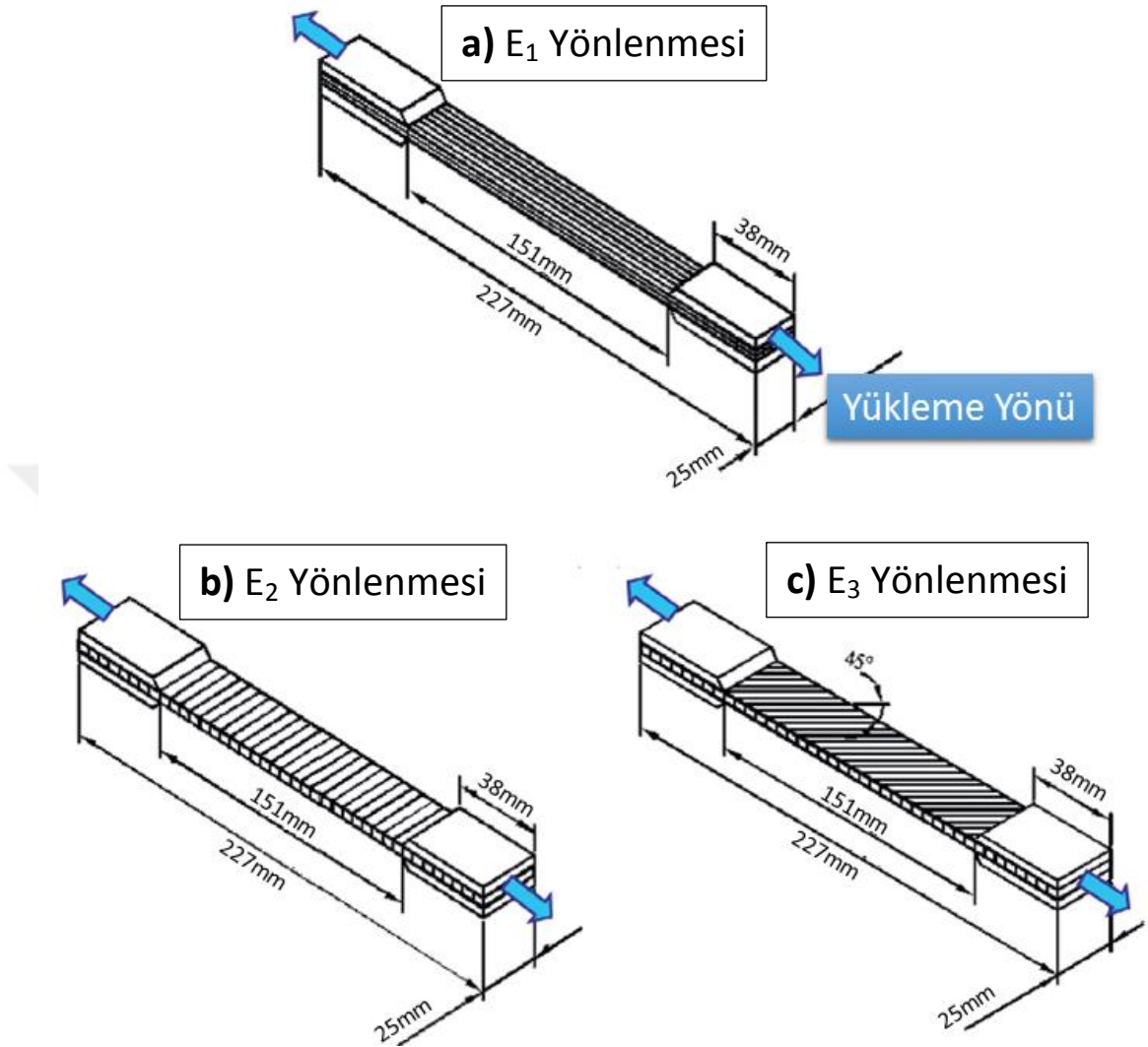


Şekil 4.6. Numunenin ankastre serbest sınır şartındaki düzlem içi üçüncü doğal frekansı ve mod şekli

Her bir numunenin nümerik çözümünde gerekli olan mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme test cihazı kullanılmıştır. Şekil 2.3’de gösterilen 1, 2 ve 3 numaralı farklı yönlenmelerde, 25 mm genişliğinde 227 mm uzunluğunda beşer adet kesilen her bir deney numunesi çekme cihazında test edilmiştir. 1 yönünde kesilen numunelerden E_1 , 2 yönünde kesilen numunelerden E_2 ve 3 yönünde kesilen numunelerden E_3 değerleri yani kayma modülünde hesaplanıp kullanılması gereken E_x değerleri elde edilmiştir. Üretilen numunelerde 1 yönü olarak vakum yapılan yön alınmıştır. Şekil 4.8’de bu yönlenmeler ve yükleme yönü şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 4.7’de oluşturulan katı model üzerinde yönlenmeler şematik olarak gösterilmiştir.



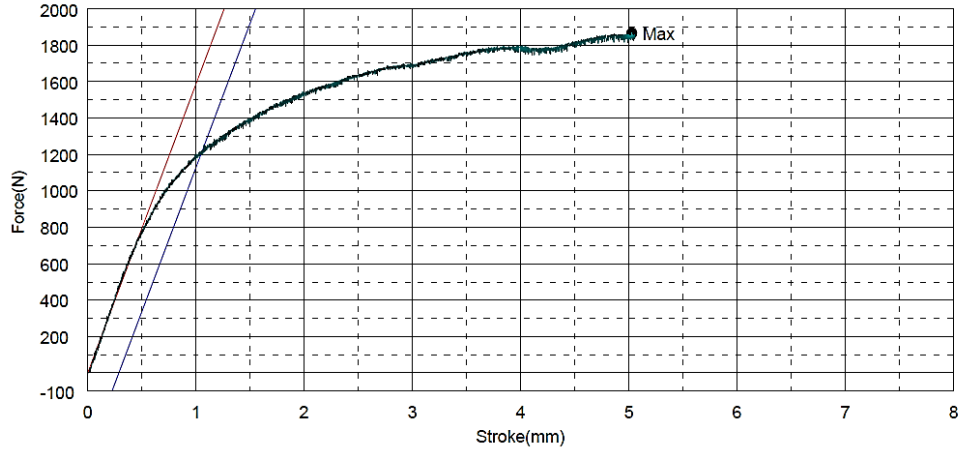
Şekil 4.7. Katı model üzerinde yönlenmeler



Şekil 4.8. Numunelerde uygulanan kesme yönlendirmeleri

Kayma modülünün hesaplanmasında kullanılan E_x 'in değeri, Şekil 4.8'de gösterilen c numunesinin kesim yönlendirmesinden elde edilen elastisite modül değeridir. Elde edilen değerler, aşağıdaki formülde kullanılarak kompozit sandviç yapıda kullanılan tüm alt ve üst levhaların kayma modülü hesaplanmıştır. Mekanik özellikleri belirlenen numunenin örnek olarak kuvvet - şekil değiştirme grafiği Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

$$Kayma Modulu (G) = \frac{1}{\frac{4}{E_x} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}} \quad (4.1)$$



Şekil 4.9. Çekme cihazı kuvvet – şekil değiştirme grafiği

Elde edilen grafikten malzemenin veya numunenin yönlenme durumuna göre elastisite modülü hesaplanmıştır. Elde edilen ve hesaplanan farklı yönlerdeki tüm elastisite modülleri ve kayma modülleri nümerik çözümde kullanılmıştır. Son durumda var olan parametrik model de analiz yapılacak numunenin mekanik özellikleri belirtilerek kompozit sandviç yapının nümerik analizi ANSYS Mechanical APDL programında her numune için ayrı ayrı yapılmıştır. PULSE deney sisteminden elde edilen deneysel sonuçlar ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

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

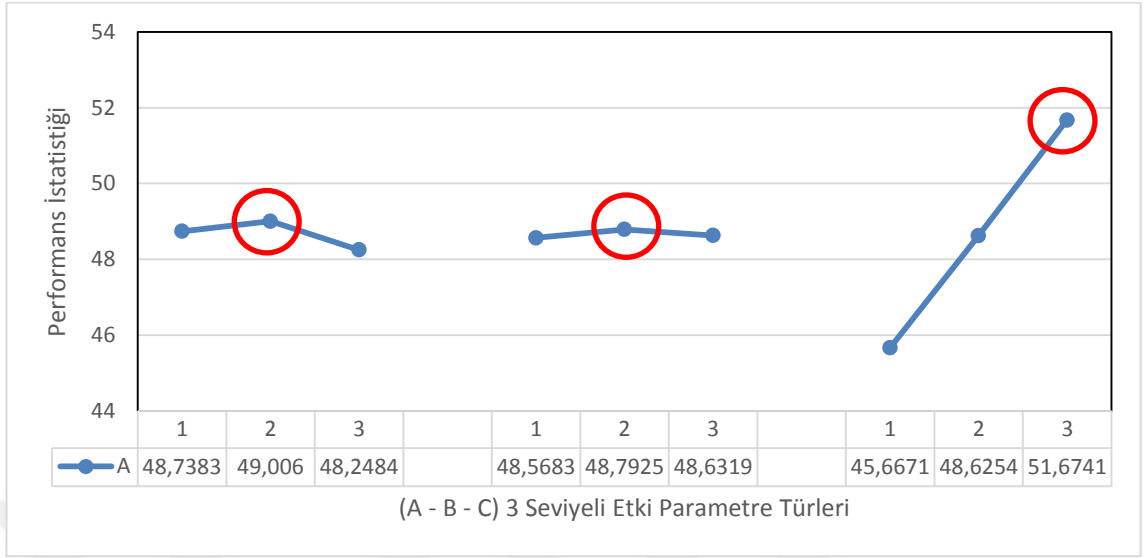
Deney No	Doğal Frekans ANSYS (Hz)	Doğal Frekans Deney (Hz)	Hata Oranı %
1	189,52	167	12,02
2	266,32	242	9,04
3	342,62	316	7,68
4	259,45	239	8,06
5	372,82	345	7,46
6	199,70	168	15,71
7	347,82	314	9,79
8	184,36	155	16,13
9	233,80	225	3,64

Çizelge 4.2. Deneysel ve nümerik olarak belirlenen sönüm oranı değerleri ve hata oranları

Deney No	Sönüm Oranı ANSYS %	Sönüm Oranı Deney %	Hata Oranı %
1	0,82	0,64	21,36
2	2,18	1,84	15,82
3	2,25	1,85	17,99
4	1,44	1,26	12,74
5	0,68	0,60	11,76
6	0,61	0,49	19,33
7	1,18	1,02	13,38
8	1,19	0,97	18,67
9	1,19	1,01	14,73

Çizelge 4.1’de deneysel ve nümerik olarak belirlenen frekans değerleri ve hata oranları tablosu verilmiştir. Çizelge 4.2’de ise deneysel ve nümerik olarak belirlenen sönüm oranı değerleri ve hata oranları tablosu verilmiştir.

Taguchi L9 yöntemine göre deney serisinden seçimi yapılan deney numuneleri incelenmiş sonrasında deneysel ve numerik analizleri tamamlanmıştır. Taguchi deney tasarımı L9 yöntemine göre yapılmıştır. Deney matrisinin analizinde Minitab programı kullanılmıştır. Sinyal gürültü oranı en büyük en iyi olarak seçilmiştir. Şekil 4.10’da Minitab programından elde edilen deney tahmin grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Bir yönlenmesindeki tüm numunelerin doğal frekans bakımından en iyi numune tahmin grafiği

Şekil 4.10’da elde edilen grafikte, 2-2-3 deney numunesi taguchi yöntem tahmini gösterilmiştir. Bu değerler taguchi deney tasarım matrisinde sırasıyla katkı türü SiC, katkı oranı %2 ve çekirdek yüksekliği 15 mm değerlerini ifade etmektedir. Bu özelliklerde kompozit sandviç numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3’de üretimi gerçekleştirilen 2-2-3 deney numunesi için frekans güven aralıkları gösterilmiştir. Elde edilen deney sonuçları ve nümerik analizler bu güven aralığı içerisinde kalmıştır.

Çizelge 4.3. 2-2-3 numunesi için frekans değerleri güven aralığı

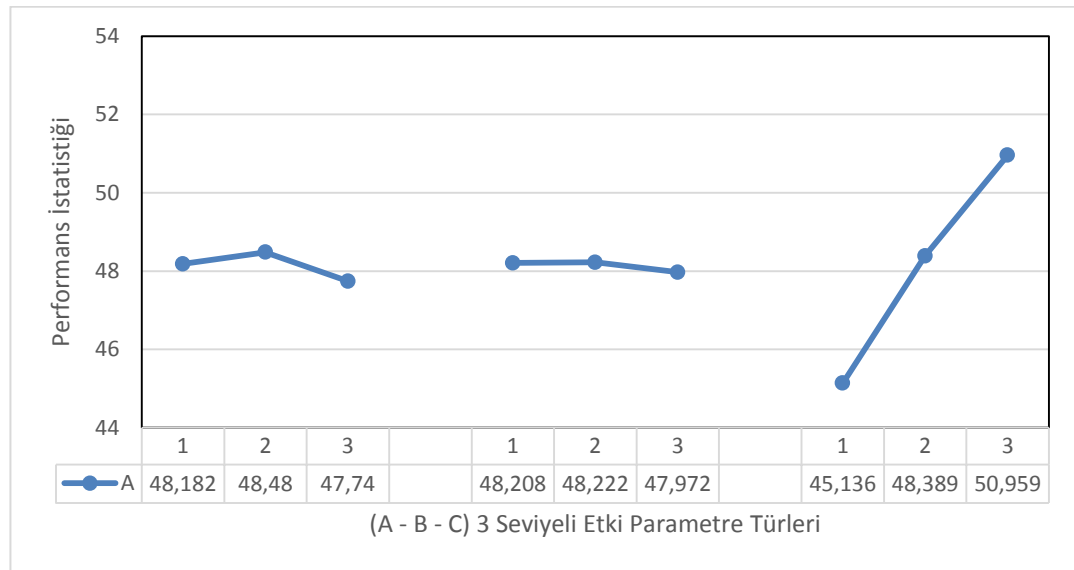
2-2-3 Numunesi Güven Aralığı	
Minimum	Maksimum
372,23	433,40
272,29	473,75
233,28	245,83

Taguchi L9 yöntemine göre üretimi gerçekleştirilen 2-2-3 deney numunesi için anova tablosu Çizelge 4.4'te verilmiştir.

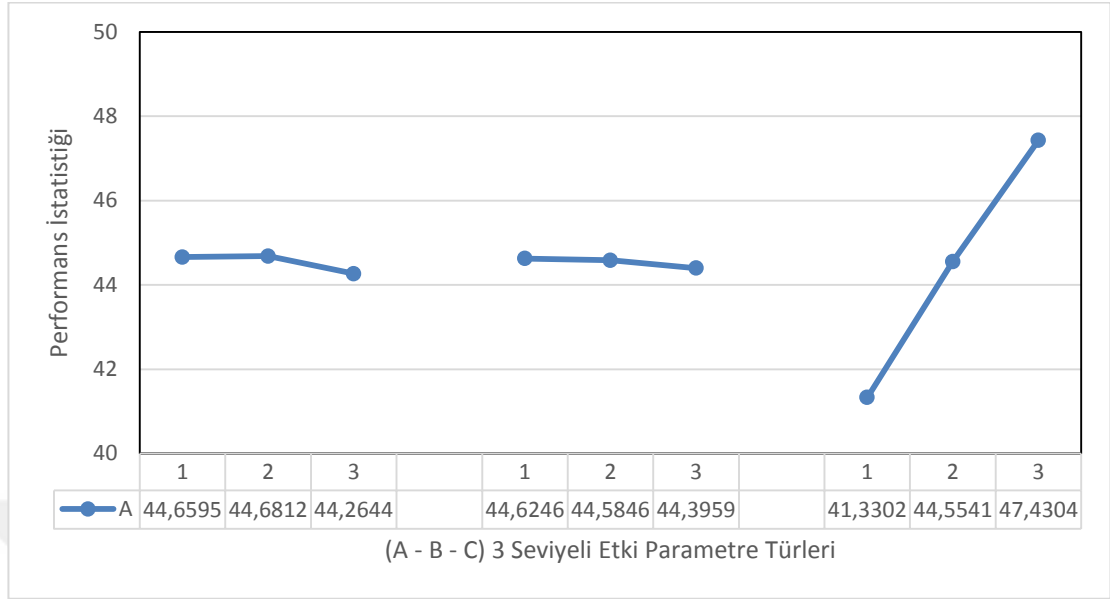
Çizelge 4.4. 2-2-3 numunesi için frekans değerleri anova tablosu

ANOVA SN				
	DOF	SUM SQUARE	VARIANCE	F-RATIO
A	2	0,885461	0,442731	128,9732
B	2	0,080082	0,040041	11,66447
C	2	54,12537	27,06269	7883,715
D	2	0,006865	0,003433	
HATA	2	0,006865	0,003433	
TOPLAM	8	55,10465	27,55232	8024,353

Taguchi L9 Deney tasarım matrisine göre en yüksek iyi olan sonuçlar belirlenmiştir. Şekil 4.11'de ve Şekil 4.12'de; iki ve üç yönlenmesindeki tüm numunelerin doğal frekans bakımından en iyi numune tahmin grafiği verilmiştir.

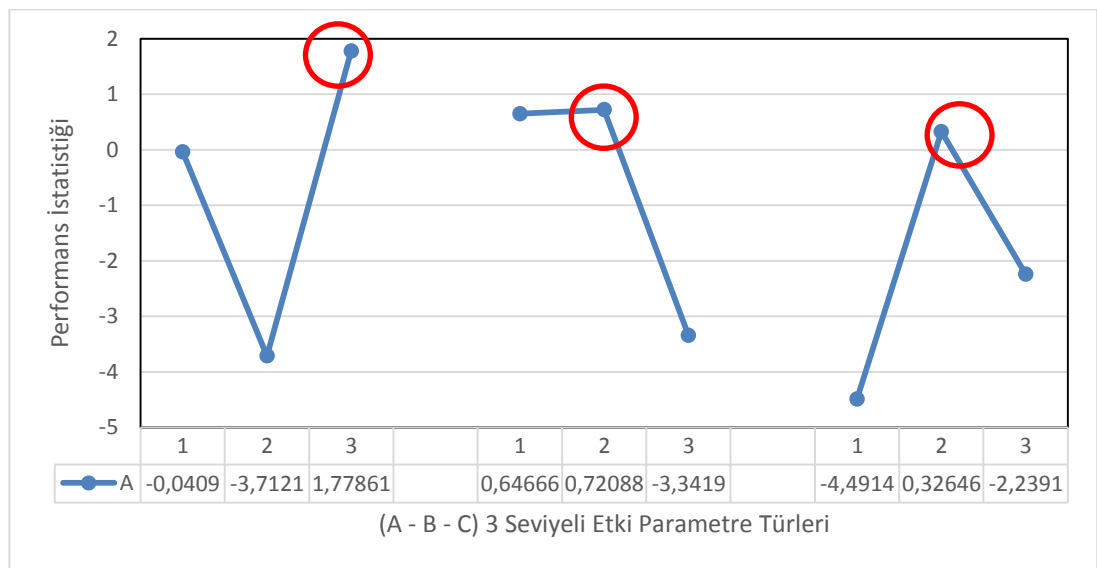


Şekil 4.11. İki yönlenmesindeki tüm numunelerin doğal frekans bakımından en iyi numune tahmin grafiği



Şekil 4.12. Üç yönlenmesindeki tüm numunelerin doğal frekans bakımından en iyi numune tahmin grafiği

Sandviç kompozit numunelerin doğal frekans bakımından en iyi numunesi; katkı türü SiC, katkı oranı %2 ve çekirdek yüksekliği 15mm olan numune olduğu belirlenmiştir. Sönüm oranı bakımından en iyi numunelerin tahmininde kullanılan grafikler Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Bir yönlenmesindeki tüm numunelerin sönüm oranı bakımından en iyi numune tahmin grafiği

Şekil 4.13’de elde edilen grafikte, 3-2-2 deney numunesi taguchi yöntem tahmini gösterilmiştir. Bu değerler taguchi deney tasarım matrisinde sırasıyla katkı türü B₄C, katkı oranı %2 ve çekirdek yüksekliği 10 mm değerlerini ifade etmektedir. Bu özelliklerde kompozit sandviç numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.5’de üretimi gerçekleştirilen 3-2-2 deney numunesi için frekans güven aralıkları gösterilmiştir. Deney tasarımında belirlenen bu deney numunesi bulunmadığı için deney numunelerine ilave olarak 3-2-2 numunesinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel analiz sonucunda kompozit kırılganlık oranı %1,67 olarak PULSE ölçüm sisteminden okunmuştur. Daha sonra yapılan nümerik analizde sönüm oranı değeri %2,24 hesaplanmıştır. Elde edilen deney sonuçları ve nümerik analizler bu güven aralığı içerisinde kalmıştır.

Çizelge 4.5. 3-2-2 numunesi için sönüm oranı değerleri güven aralığı

3-2-2 Numunesi Güven Aralığı	
Minimum	Maksimum
0,53	4,93
1,37	7,19
0,52	1,69

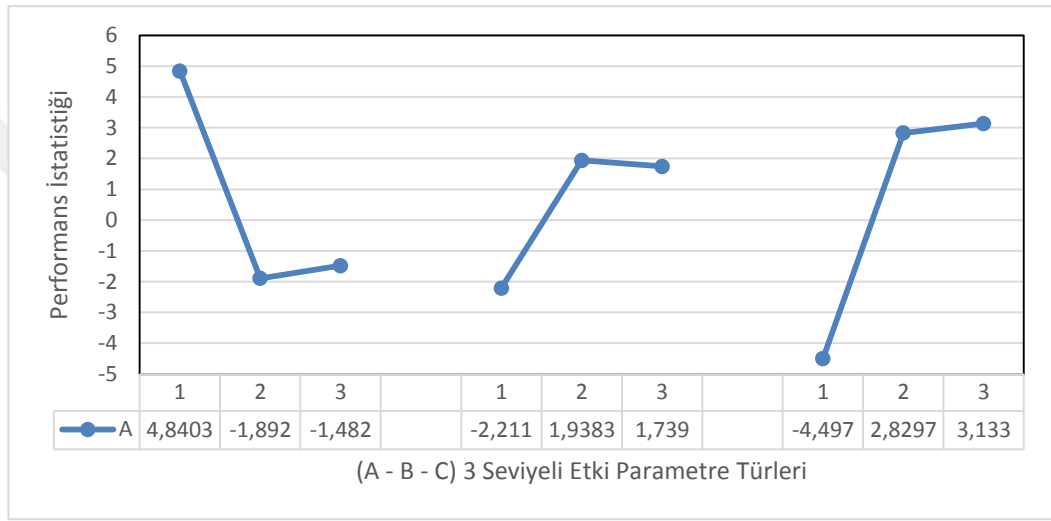
Taquchi L9 yöntemine göre üretimi gerçekleştirilen 3-2-2 deney numunesi için anova tablosu Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. 3-2-2 numunesi için sönüm oranı değerleri anova tablosu

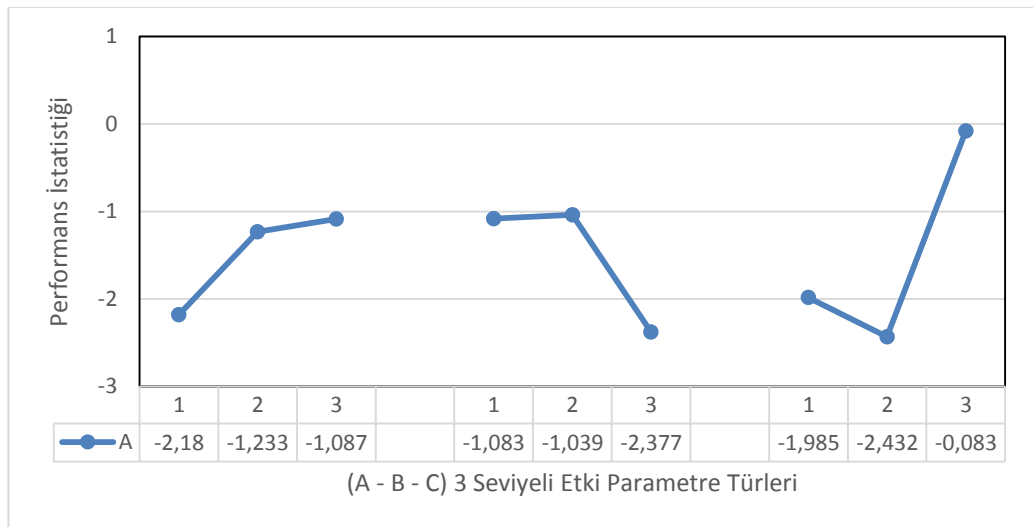
ANOVA SN				
	DOF	SUM SQUARE	VARIANCE	F-RATIO
A	2	46,93521	23,46761	1,077102
B	2	32,42058	16,21029	0,744010
C	2	139,5252	69,76259	3,201921

Çizelge 4.6. (devam)

D	2	43,57546	21,78773	
HATA	2	43,57546	21,78773	
TOPLAM	8	306,0319	153,0159	5,023033



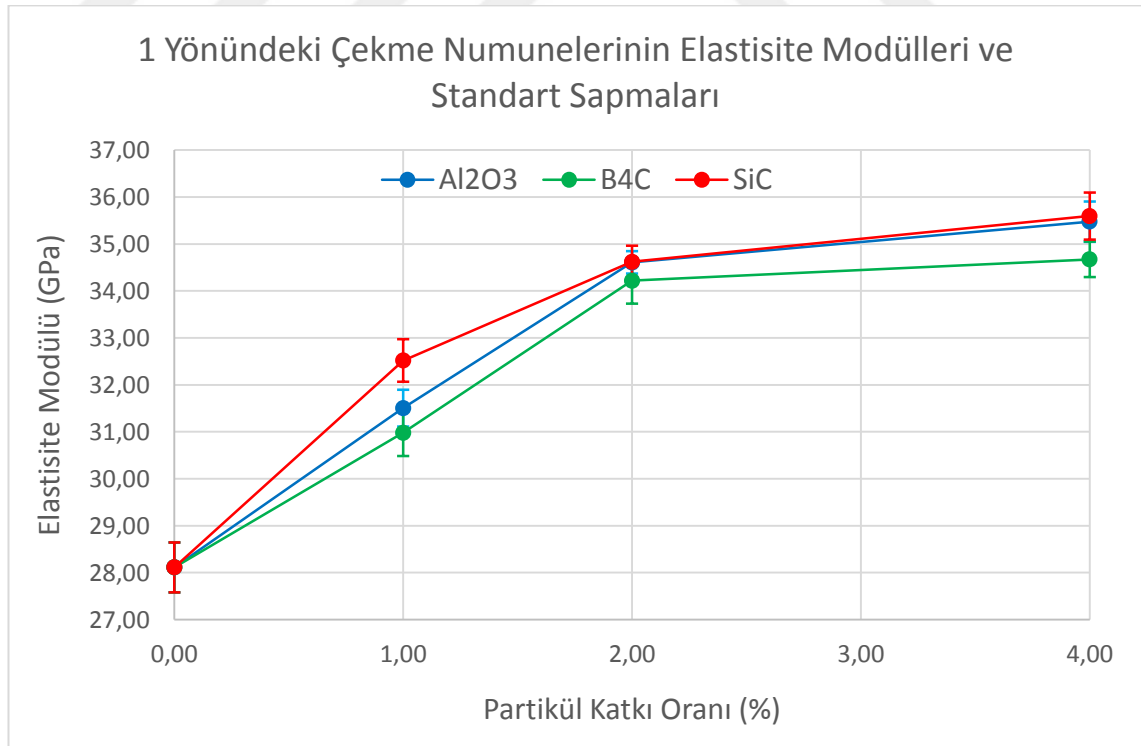
Şekil 4.14. İki yönlenmesindeki tüm numunelerin sönüm oranı bakımından en iyi numune tahmin grafiği



Şekil 4.15. Üç yönlenmesindeki tüm numunelerin sönüm oranı bakımından en iyi numune tahmin grafiği

Kompozit sandviç kirişlerin frekans ve sönüm oranı bakımından özellikleri incelenmiştir. Numunelerin nümerik analizinde kullanılan mekanik özellikler, üretilen numunelerden elde edilmiştir. Üretilen levha 25 mm eninde ve 227 mm boyunda kesilerek çekme cihazında test edilmiştir. Çekme cihazından elde edilen sonuçlar her bir numune için beşer adettir. Çekme cihazından elde edilen değerler, ortalamaları alınarak nümerik analizde kullanılmıştır. Nümerik analizlerin ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Diğer taraftan taguchi yöntemi kullanılarak her parametrenin etkileri incelenerek optimum numuneler belirlenmiştir.

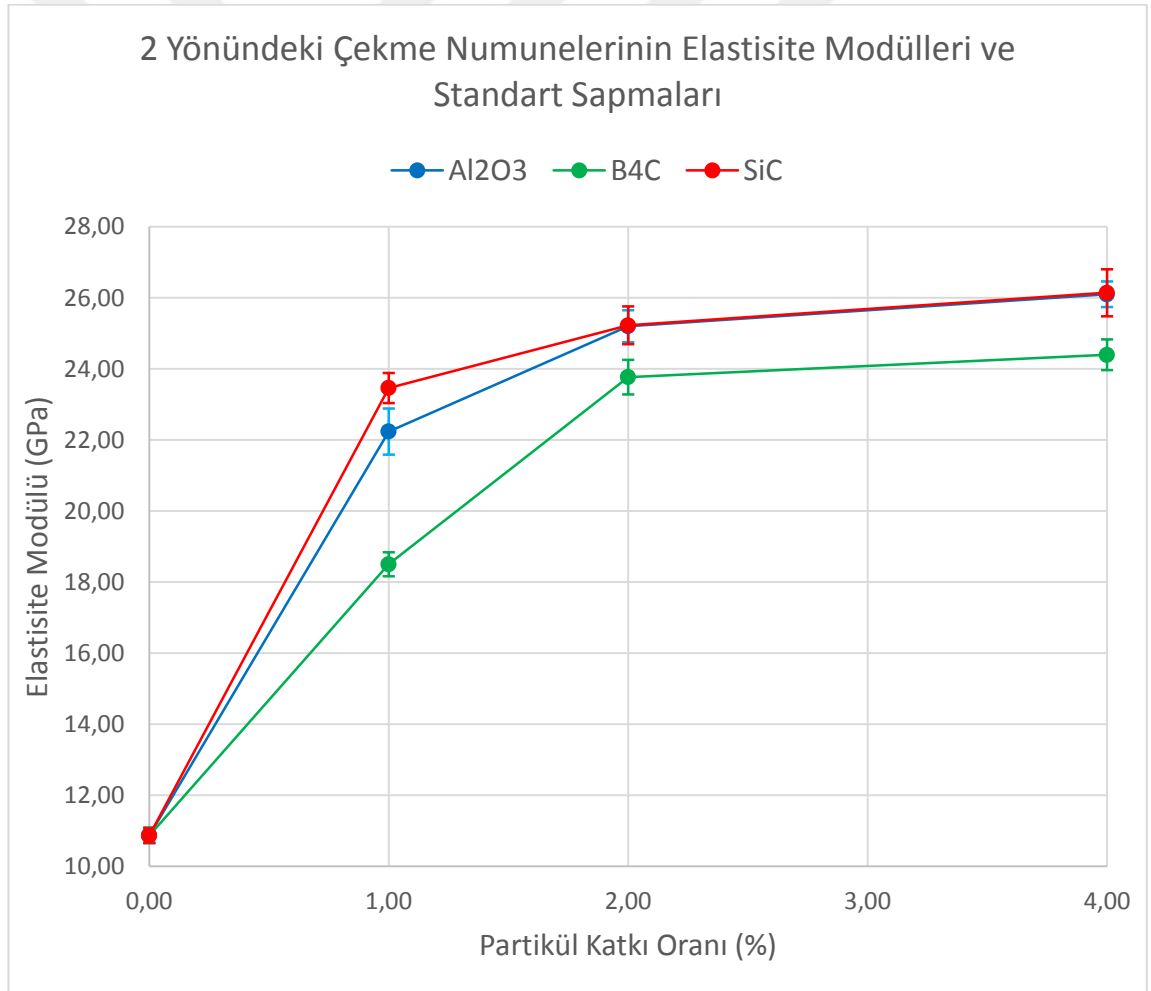
Deney numunelerinin alt ve üst levhalarının mekanik özellikleri, beş adet numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Her katkı türünde, katkı oranında ve yönlenmesindeki numune ayrı ayrı beşer adet üretilip çekme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçların değerleri ve standart sapmaları aşağıdaki grafiklerde ve tablolarda verilmiştir.



Şekil 4.16. Bir yönündeki çekme numunelerinin elastisite modülleri ve standart sapmaları

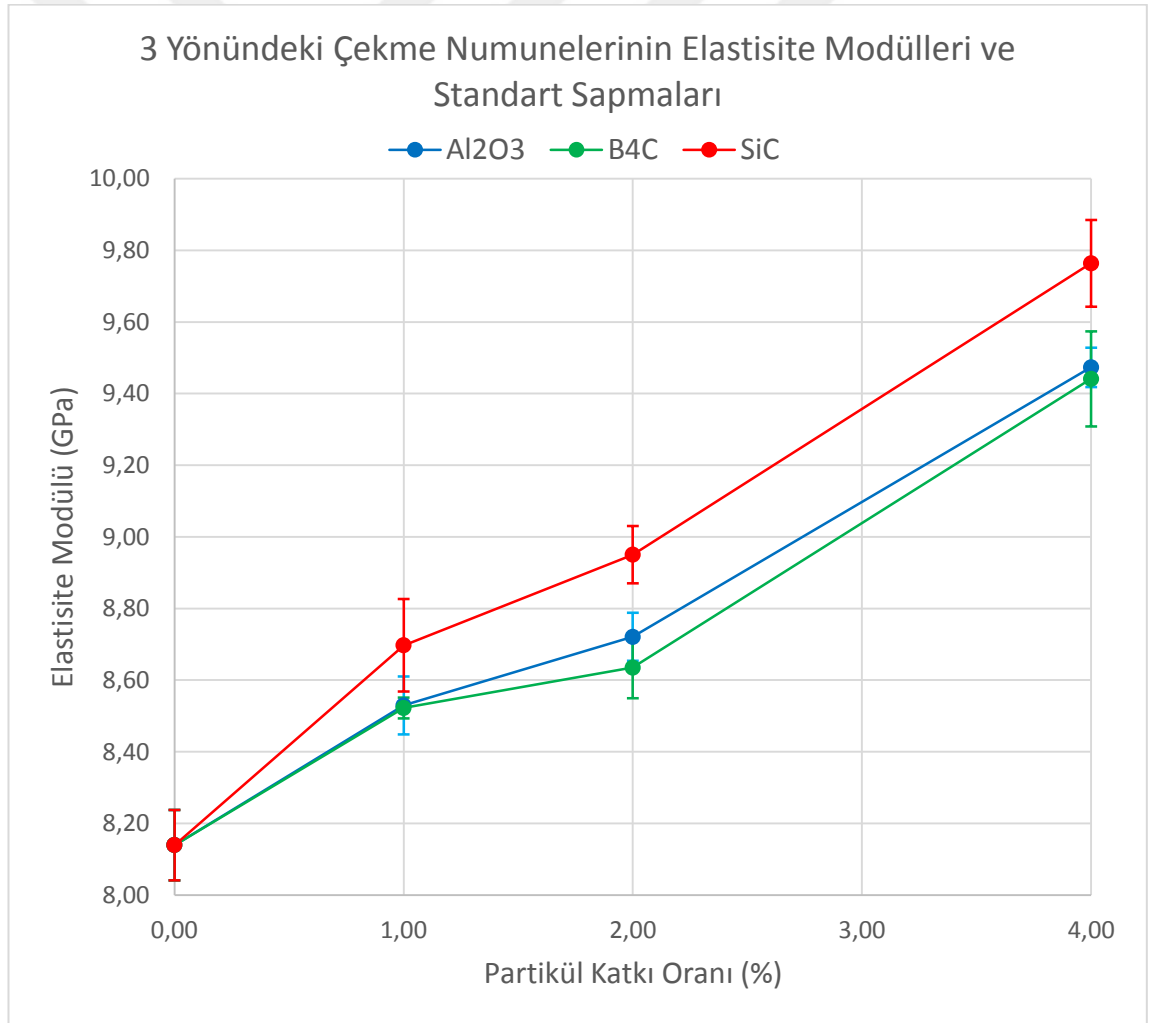
Çizelge 4.7. Bir yönündeki çekme numunelerinin standart sapma değerleri

	Partikül Katkı Oranı (%)			
	0,00	1,00	2,00	4,00
Al ₂ O ₃	0,533	0,391	0,239	0,430
B ₄ C	0,533	0,498	0,489	0,377
SiC	0,533	0,453	0,339	0,501

**Şekil 4.17.** İki yönündeki çekme numunelerinin elastisite modülleri ve standart sapmaları

Çizelge 4.8. İki yönündeki çekme numunelerinin standart sapma değerleri

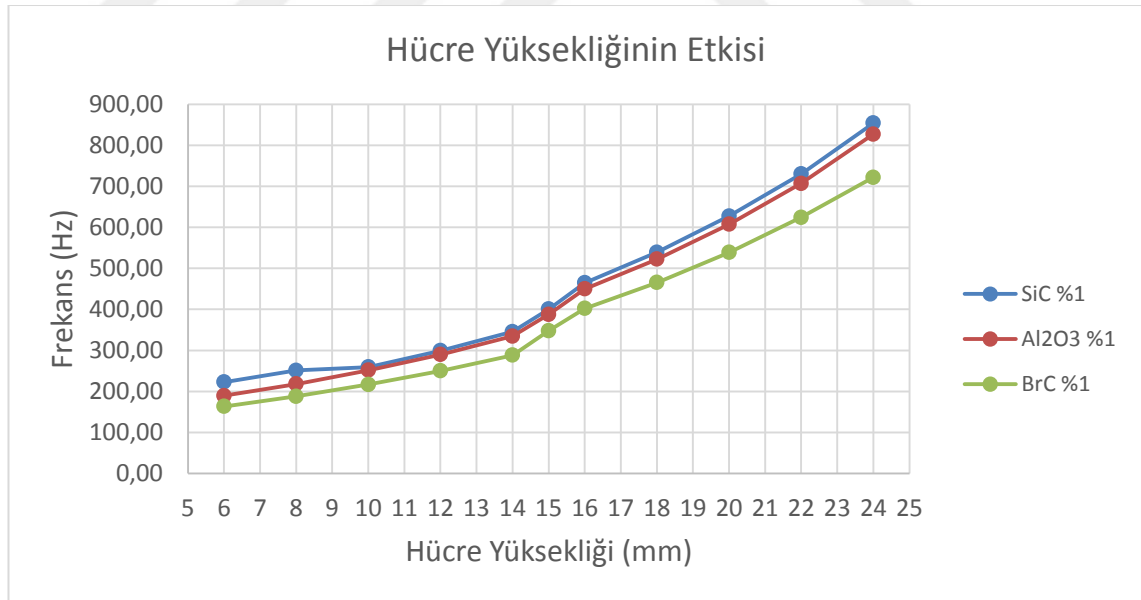
	Partikül Katkı Oranı (%)			
	0,00	1,00	2,00	4,00
Al ₂ O ₃	0,211	0,652	0,450	0,363
B ₄ C	0,211	0,338	0,489	0,432
SiC	0,211	0,424	0,533	0,661

**Şekil 4.18.** Üç yönündeki çekme numunelerinin elastisite modülleri ve standart sapmaları

Çizelge 4.9. Üç yönündeki çekme numunelerinin standart sapma değerleri

	Partikül Katkı Oranı (%)			
	0,00	1,00	2,00	4,00
Al ₂ O ₃	0,098	0,081	0,067	0,055
B ₄ C	0,098	0,029	0,086	0,133
SiC	0,098	0,129	0,080	0,121

Yapılan deneyler sonucunda numunelerin doğal frekansları karşılaştırılmıştır. %11 'lik ortalama hata ile nümerik analiz yöntemi doğrulanmıştır. Parametrik olarak modellenen analiz yönteminde hücre yüksekliğinin etkisi araştırılmıştır. Nümerik analizde bu durum araştırılırken %1 partikül oranı kullanılan levhaların mekanik özellikleri ele alınmıştır. Yapılan nümerik analiz sonuçları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

**Şekil 4.19.** Ankastre-serbest sınır şartındaki aynı yönlenmeye sahip kompozit yapıların nümerik analiz yöntemi ile doğal frekanslarına çekirdek yüksekliğinin etkisi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, partikül katkılı kompozit sandviç malzemelerin titreşim ve sönüm analizleri, deneysel ve nümerik olarak yapılmıştır. Sandviç numunelerin, alt ve üst levha kompozit malzemelerinin katkı türü ve oranları ile çekirdek yükseklikleri değiştirilerek farklı konfigürasyonlarda sandviç kompozit malzemeler üretilmiştir. Kullanılan alt ve üst levhalarda kalınlıklar bütün numunelerde eşit tutulmaya çalışılmıştır. Tüm numunelerde dört tabaka twill karbon elyaf kullanılmıştır. Üretim sonunda her numunenin ortalama 1mm kalınlıkta olduğu görülmüştür. Üretimi yapılacak deney numuneleri Taquchi L9 deney tasarım yöntemi kullanılarak üretilmiş ve bu yöntem kullanılarak deney sonuçları analiz edilmiştir. Deneysel sonuçların Minitab programı yardımıyla performans istatistiği grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerde bizim istediğimiz özelliklerdeki (en yüksek frekans ve en yüksek sönüm) numune L9 deney tasarım matrisinde yok ise ilave numune üretilmiştir.

Üretimi yapılan deney numunelerinin titreşim deneyleri PULSE titreşim ölçüm seti ile yapılmıştır. Bu sistem bize doğrudan numunelerin doğal frekanslarını ve sönüm oranlarını vermektedir. Ayrıca deneysel olarak çalıştığımız numuneler, Ansys Mechanical APDL programı ile parametrik olarak modellenmiş, doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve hata oranları hesaplanmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür. Literatürde %1,5 katkı oranından sonra numunelerin doğal frekansın azaldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada bu değer %2'dir. %2'den sonraki her değer numunelerin doğal frekans değerini düşürmüştür (Sayer 2014).

Partikül katkılı alt ve üst yüzey levhaların mekanik özellikleri katkısız alt ve üst yüzey levhalara göre daha yüksektir. Bu nedenle alt ve üst yüzeyleri katkılı kompozit

levhalardan oluşan sandviç yapıların doğal frekansları, aynı çekirdek yüksekliğine sahip katkısız sandviç numunelere göre daha yüksektir.

Aynı katkı türünde ve katkı oranında numuneler karşılaştırıldığında çekirdek yüksekliğindeki artış, numunelerin doğal frekanslarının artmasına neden olmuştur.

Aynı katkı türünde ve çekirdek yüksekliğinde ki numuneler karşılaştırıldığında katkı oranındaki artış, belirli bir noktaya kadar numunelerin doğal frekansını yükseltmiştir. %2 katkı oranından sonra doğal frekansın azaldığı görülmüştür. %2'den sonraki her değer numunelerin doğal frekans değerini düşürmüştür.

Farklı katkı türlerinin kullanılması, üretimi gerçekleştirilen tüm numunelerin doğal frekansını arttırmıştır. Kullanılan farklı partikül türlerinde, numunelerin doğal frekansında en fazla artışı SiC sağlamıştır.

Taguchi yöntemine göre üretimi gerçekleştirilen numunelerin doğal frekansları ile sönüm oranları araştırılmıştır. Deneysel ve numerik olarak hesaplanan doğal frekans ve sönüm oranı değerleri gözden geçirilmiştir. ANSYS programından elde ettiğimiz nümerik çözümler ile PULSE sisteminden elde ettiğimiz deneysel sonuçlar arasında frekans değerlerinde yaklaşık %11'lik bir hata payı olduğu görülmüştür. Bu değer sönüm oranında yaklaşık %18'dir. Deney tasarımı üç farklı seviye ve üç farklı parametre kullanılmıştır. Eğer L9 deney tasarım matrisi kullanılsaydı farklı konfigürasyonlarda toplam 27 adet numune üretimi gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. L9 deney tasarım matrisi kullanılarak %5 güven aralığına göre toplam 12 adet deney numunesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan sonuçların %5 güven aralığında kaldığı tespit edilmiştir.

Hata oranlarındaki farklılıklar, numunelerin üretilmesi, peteklerin düzgün kesilememesi, yapıştırılması ve ölçüm esnasında oluşan hatalar olarak söylenebilir. Alt ve üst yüzey levhaların çekirdeğe yapıştırma işlemi, el ile gerçekleştirildiği için her numuneye eşit şekilde yapıştırıcı sürülememektedir. Nümerik analizlerde yapıştırıcı farklı bir eleman

olarak modellenmemiştir. Analizlerde alt ve üst levhaların çekirdeğe mükemmel yapıştığı kabul edilmiştir.



KAYNAKLAR

- Adams, R. D. and Maheri M. R., 2003. Damping in advanced polymer-matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 355, 126-130.
- Aydıncak I., 2007. Investigation 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.
- Çallıoğlu H., Özdemir İ., Göde C., 2011. Effects of cold pressing and extrusion on the microstructures and mechanical properties of SiC and B₄C reinforced Alumix-231 alloys. *Scientific Research and Essays*, 6 (6), 1371-1379.
- Elomori S., Boukhili R., SanMarchi C., Mortensen A., Lloyd D. J., 1997. Thermal expansion responses of pressure infiltrated SiC/Al metal-matrix composites. *Journal of Materials Science*, 32 (8), 2131-2140.
- 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)
- 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
- 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*, 35, 205-231.
- Salam M. A., Bondok N. E., 2010. Free vibration characteristics for different configurations of sandwich beams. *IJMME-IJENS*, 10 (3), 41-54.
- Sayer M., 2014. Elastic properties and buckling load evaluation of ceramic particles filled glass/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 59, 12-20.
- 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., Bolat F. Ç., 2010. Bal peteği sandviç kompozit yapıların dinamik analizi. 2. Ulusal imalat ve analiz kongresi, Balıkesir.
- Şakar G., Yaman M., Temiz Ş., Göldoğan A. İ., 2011. Tübitak Rapor. Proje No: 108M544: Balpeteği Sandviç Kompozitlerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Erzurum.

- Türkmen İ., Köksal N.S., 2013. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (CTP) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi. C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 8 (2), 17-30
- 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.
- Zhang Y., Pickels C. A., Cameron J., 1992. The production and mechanical properties of silicon carbide and alumina whisker-reinforced epoxy composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 11, 1176-1186



ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Manisa-Demirci’de doğan Emrah Emin ÖZBALDAN, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Özel Gündüzalp İlköğretim Okulu ve Demirci Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. 2009 yılında kazandığı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümünü 2013 yılında başarıyla bitirmiştir. Aynı zamanda 2013 yılında İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlığı alanında kursa katılmış, 2016 yılında başarıyla sınavı tamamlayarak C Sınıfı İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanı olmuştur. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başlamıştır. 2013 yılından 2017 yılına kadar Atatürk Üniversitesi Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM) Müdürlüğünde Bilimsel Proje Uzmanı olarak çalışmıştır.