

**ERİYİK YIĞMA İLE MODELLEME (FDM)
YÖNTEMİNDE FİLAMENT KALINLIĞININ ÜRETİLEN
PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE DİNAMİK
DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Taha MEMUR



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ERİYİK YIĞMA İLE MODELLEME (FDM) YÖNTEMİNDE FİLAMENT
KALINLIĞININ ÜRETİLEN PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE
DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Taha MEMUR
0009-0003-3810-1544

Prof. Dr. Rukiye ERTAN
0000-0002-9631-4607

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Taha MEMUR tarafından hazırlanan “ERİYİK YIĞMA İLE MODELLEME (FDM) YÖNTEMİNDE FİLAMENT KALINLIĞININ ÜRETİLEN PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

- Başkan** : Prof. Dr. Rukiye ERTAN İmza
0000-0002-9631-4607
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL İmza
0000-0001-8589-6931
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğretim Üyesi Halil BAYRAM İmza
0000-0002-4664-3883
Amasya Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN

Enstitü Müdürü

.././....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07/06/2023

Taha MEMUR

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı
Tarih

Prof. Dr. Rukiye ERTAN

07.06.2023

Öğrencinin Adı-Soyadı
Tarih

Taha MEMUR

07.06.2023

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ERİYİK YIĞMA İLE MODELLEME (FDM) YÖNTEMİNDE FİLAMENT KALINLIĞININ ÜRETİLEN PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Taha MEMUR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

Endüstrideki imalat şekilleri ve prosesleri teknolojinin ilerlemesiyle birlikte sürekli bir gelişim içerisinde. Bu gelişim son zamanlardaki bilgisayar, yazılım ve elektronik alanlarındaki hızlı ilerlemelerle çok daha aktif bir ivme kazanmıştır. Teknolojinin getirdiği en güncel imalat yöntemlerinden olan Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) teknolojisi gibi 3 boyutlu (3B) yazıcılarla gerçekleştirilen üretim yöntemleri otomotiv, savunma ve yapay organ üretimleriyle biyomühendislik sektöründeki payını büyük ölçüde arttırmıştır. Eklemeli imalatta 3B baskı yönteminde nihai ürünün mekanik ve dinamik davranışlarını etkileyen birçok üretim parametresi vardır. Bu parametrelere üretim esnasındaki; tarama açısı, katman kalınlığı, doluluk oranı, baskı hızı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, ortam sıcaklığı, fan hızı, desen çeşidi örnek olarak verilebilir. Bu tez çalışması kapsamında PC-ABS malzeme ile bütün üretim parametreleri sabit tutularak katman kalınlığı değişiminin mekanik ve dinamik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Mekanik özellikler için farklı filament kalınlığında (0,127 mm, 0,178 mm, 0,254 mm) üretilen çekme çubuklarıyla çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri sonucunda farklı katman kalınlıklarına ait elastisite modülleri bulunmuş ve bu parametreler bilgisayar ortamında modal analiz simülasyonlarında kullanılmıştır. Dinamik özellikler için üç adet plaka üretilmiş ve bu plakalar üzerinde modal test ve analiz yapılmıştır. Yapılan modal analizler sonucunda plakalara ait modal parametreler (doğal frekans, sönüm oranı, mod şekli) elde edilmiştir. Bilgisayar ortamındaki modal analiz simülasyonu sonuçlarıyla fiziksel modal test sonuçları karşılaştırılmış ve mod şekillerinin birbirleriyle olan uyumlarını gösteren Modal Güvence Matrisleri (MGM) elde edilmiştir. Sonuç ve yorumlama kısmında elastisite modülü ve kopma mukavemeti göz önünde bulundurularak mekanik özellikler yorumlanmış, modal parametreler göz önünde bulundurularak da dinamik davranışlar yorumlanmıştır. Mekanik ve dinamik davranışlar için en uygun katman kalınlığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: FDM, filament kalınlığı, katman kalınlığı, elastisite modülü, modal analiz, deneysel modal test

2023, xiii + 67 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE EFFECT OF THE FILAMENT THICKNESS ON MECHANICAL PROPERTIES AND DYNAMIC PROPERTIES OF THE PRODUCED PLATES IN THE FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM) METHOD

Taha MEMUR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

Manufacturing methods and processes in the industry are in a continuous development with the advancement of technology. This development has gained a much more active momentum with the rapid advances in computers, software and electronics. Production methods performed with 3D printers such as Fused Deposition Modelling(FDM) technology, which is one of the most up-to-date manufacturing methods brought by technology, have greatly increased its share in the automotive, defense and bioengineering sectors. In additive manufacturing, there are many production parameters that affect the mechanical and dynamic behavior of the final product in the 3D printing method. These parameters during production; scanning angle, layer thickness, fill rate, printing speed, nozzle temperature, table temperature, ambient temperature, fan speed, pattern type can be given as examples. Within the scope of this thesis, the effect of layer thickness variation on mechanical and dynamic properties was investigated by keeping all production parameters constant with PC-ABS material. For mechanical properties, tensile tests were carried out with tensile testing parts produced in different filament thicknesses (0,127mm, 0,178mm, 0,254mm). As a result of tensile tests, elasticity modules belonging to different layer thicknesses were found and these parameters were used in model analysis simulations in computer aided simulation environment. Three plates were produced for dynamic properties and modal testing and analysis were performed on these plates. As a result of the modal analysis, the modal parameters (natural frequency, damping ratio, mode shape) of the plates were obtained. The results of the modal analysis simulation were compared to the physical modal test results, and Modal Assurance Matrices (MGM) were obtained showing the compatibility of the mode shapes with each other. In the conclusion and interpretation part, the mechanical properties were interpreted by considering the modulus of elasticity and breaking strength, and the dynamic behaviors were interpreted considering the modal parameters.

Key words: FDM, filament thickness, layer thickness, elasticity module, experimental modal analysis, modal test

2023, xiii + 67 pages.

TEŐEKKÖR

Eğitim hayatım boyunca beni hep destekleyen başta babam, annem olmak üzere aileme, yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Rukiye ERTAN ve Prof. Dr. Ferruh ÖZTÖRK'e, tez çalıŐmalarına imkan veren MARELLİ MAKO firmasına, test ve analiz süreçlerinde benden yardımlarını esirgemeyen Test, Analiz ve Prototip bölümlerindeki tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Taha MEMUR
20/05/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1 Eklemeli İmalat.....	7
2.1.1 Eriyik Yiğme Modelleme (FDM).....	9
2.1.2 SLA (Stereolithography).....	13
2.1.3 Lamine Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing- LOM).....	14
2.1.4 Çoklu Püskürtme (Polyjet -PJ).....	15
2.1.5 SLS (Selective Laser Sintering).....	16
2.2 Titreşim.....	17
2.2.1 Periyodik (Harmonik) Titreşim.....	18
2.2.2 Sönümsüz Titreşim.....	19
2.3 Deneysel Modal Analiz.....	21
2.3.1 Frekans Cevap Fonksiyonu.....	24
2.3.2 Koherans.....	26
2.3.3 Tepe Yakalama Yöntemi.....	27
2.3.4 Modal Güvence Matrisi (MGM).....	28
2.4 İvmeölçer.....	29
2.5 Veri Toplama Sistemi.....	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
3.1 FDM 3B Yazıcı Makinesi.....	34
3.2 Modal Çekiç.....	35
3.3 İvmeölçer.....	36
3.4 Çekme Cihazı.....	37
3.5 Veri Toplama Sistemi.....	38
3.6 Kullanılan Yazılımlar.....	39
3.7 Test Numuneleri.....	39
4. BULGULAR.....	41
4.1 Numunelerin çekme testleri.....	43
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modal Analiz.....	47
4.3 Darbe Çekici ile Modal Analiz.....	52
4.4 Modal Güvence Matrislerinin (MGM) Karşılaştırılması.....	55
4.5 Test Numuneleri Mikroskop Görüntüleri.....	62
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	64
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	67

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
T	Periyot (s)
f	Frekans (Hz)
ω_n	Sönümsüz açısal doğal frekans (rad/s)
ω	Açısal doğal frekans (rad/s)
k	Yay katsayısı (N/m)
m	Cismin kütlesi(kg)
\emptyset	Faz açısı (rad)
A	Salınım genliği(mm)
ζ_n	Sönüm oranı
$\{\Phi\}_{test}$	Test modal vektörü
$\{\Phi\}_{analiz}$	Analiz modal vektörü
t	Zaman(s)
x(t)	Kütlenin t anındaki yer değiştir miktarı(mm)
$\dot{x}(t)$	Kütlenin t anındaki hızı
$\ddot{x}(t)$	Kütlenin t anındaki ivmesi (m/s^2)
X(f)	Giriş uyarı transfer fonksiyonu
Y(f)	Çıkış uyarı transfer fonksiyonu
H(f)	Transfer fonksiyonu
S_{yy}	Çıkış sinyalinin oto spektral yoğunluğu
S_{xy}	Giriş ve çıkış sinyalinin spektral yoğunluğu
S_{xx}	Giriş sinyalinin oto spektral yoğunluğu
S_{yx}	Giriş ve çıkış sinyalinin spektral yoğunluğu
a_0	Fourier serisi sabiti
b_n	Fourier serisi sabiti
a_n	Fourier serisi sabiti
Kısaltmalar	Açıklama
FCF	Frekans Cevap Fonksiyonu
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
MGM	Modal Güvence Matrisi
TSDS	Tek Serbestlik Dereceli Sistem
3B	3 boyutlu
FDM	Eriyik Yığıma Modelleme, Fused Deposition Modelling
PC-ABS	Polikarbonat/Akrilonitril Bütadien Stiren
SLS	Selective Laser Sintering
SLA	Stereolithography
LOM	Laminated Object Manufacturing
PJ	Polyjet
DLP	Digital Light Processing
UV	Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri (Sürmen, 2019).....	8
Şekil 2.2. Eklemeli İmalat Üretim Prosesi.....	9
Şekil 2.3. FDM Bileşenleri (Anonim, 2008)	10
Şekil 2.4. Üretim sonrası kostik karışımında bekleme.....	11
Şekil 2.5. SLA çalışma prensibi (Coros, 2020).....	13
Şekil 2.6. LOM üretim Yöntemi (Sürmen, 2019).....	14
Şekil 2.7. Polyjet Üretim Yöntemi (Udroiu ve Braga, 2017).....	15
Şekil 2.8. SLS Üretim Yöntemi (Anoni, 2008)	16
Şekil 2.9. İskoç topuzu periyodik salınım hareketi (Rao, 2011).....	18
Şekil 2.10. Sönümsüz titreşim hareketi gösterimi (Kıral, 2017).....	19
Şekil 2.11. Bir plakanın doğal frekanslardaki mod şekilleri (Gjelstrup, 2021).....	22
Şekil 2.12. Deneysel modal analiz genel akış gösterimi (Şekerci, 2013).....	22
Şekil 2.13. Çekiç ucu frekans bandı aralığı (Gjelstrup, 2021)	23
Şekil 2.14. Zaman ve frekans alanında transfer fonksiyonu gösterimi.....	24
Şekil 2.15. Transfer fonksiyon genlik ve faz grafiği (Anonim, 2020a).....	26
Şekil 2.16. Rezonans, anti-rezonans ve koherans gösterimi (Anonim, 2020a).....	27
Şekil 2.17. Tepe tutma yöntemi gösterimi (Ondra, 2013).....	28
Şekil 2.18. İvmeölçer frekans kullanım alanı.....	30
Şekil 2.19. IEPE tipi ivmeölçer iç yapısı (Anonim, 2020b).....	31
Şekil 2.20. Analog sinyali dijitale dönüştürme süreci.....	32
Şekil 2.21. Periyodik sinyalin FFT görünümü (Kalhara vd., 2017).....	33
Şekil 3.1. Fortus 400mc 3B FDM yazıcı (Anonim, 2015a).....	34
Şekil 3.2. DJB Instrument IH-01 model modal çekiç (Anonim, 2017).....	35
Şekil 3.3. Dytran 3055D2 ivmeölçer (Anonim, 2019).....	36
Şekil 3.4. INSTRON 34TM-50 çekme cihazı (Anonim, 2018).....	37
Şekil 3.5. DEWESoft SIRIUS 16 kanallı veri toplama cihazı (Anonim, 2015b)	38
Şekil 3.6. ISO 527-2 1B standardına göre çekme numunesi.....	39
Şekil 3.7. Eşit parçalara bölünmüş test plakaları.....	40
Şekil 4.1. a-) Çekme testi, b-) Çekme numuneleri.....	43
Şekil 4.2. 0,127mm katman kalınlığına ait çekme testi sonuçları.....	44
Şekil 4.3. 0,178mm katman kalınlığına ait çekme testi sonuçları.....	45
Şekil 4.4. 0,254mm katman kalınlığına ait çekme testi sonuçları.....	46
Şekil 4.5. Birinci mod izotropik görünüş.....	49
Şekil 4.6. Birinci mod üstten görünüş.....	49
Şekil 4.7. İkinci mod izotropik görünüş.....	50
Şekil 4.8. İkinci mod üstten görünüş.....	50
Şekil 4.9. Üçüncü mod izotropik görünüş.....	51
Şekil 4.10. Üçüncü mod üstten görünüş.....	51
Şekil 4.11. Çekiç gezdirme modal test genel görünüşü.....	52
Şekil 4.12. (a) 0,127mm (b) 0,178mm ve (c) 0,254mm bazı FCF sonuçları.....	53
Şekil 4.13. (a) 0,127mm plakanın 1.mod şekli(47,9 Hz) (b) 2.mod şekli(118 Hz) (c)3.mod şekli(233 Hz).....	54
Şekil 4.14. MEScope akış şeması (Ay, 2019).....	55
Şekil 4.15. 0,127mm MGM grafiksel gösterimi.....	56
Şekil 4.16. 0,127mm MGM tablosal gösterimi.....	56
Şekil 4.17. 0,178mm MGM grafiksel gösterimi.....	57

Şekil 4.18.	0,178mm MGM tablosal gösterimi.....	57
Şekil 4.19.	0,254mm MGM grafiksel gösterimi.....	58
Şekil 4.20.	0,254mm MGM tablosal gösterimi.....	58
Şekil 4.21.	0,127mm ile 0,178mm MGM grafiksel gösterimi.....	59
Şekil 4.22.	0,127mm ile 0,178mm MGM tablosal gösterimi.....	59
Şekil 4.23.	0,127mm ile 0,254mm MGM grafiksel gösterimi.....	60
Şekil 4.24.	0,127mm ile 0,254mm MGM tablosal gösterimi.....	60
Şekil 4.25.	0,178mm ile 0,254mm MGM grafiksel gösterimi.....	61
Şekil 4.26.	0,178mm ile 0,254mm MGM tablosal gösterimi.....	61
Şekil 4.27.	0,127mm çekme numunesi mikroskop görüntüsü 32 katman.....	62
Şekil 4.28.	0,178mm çekme numunesi mikroskop görüntüsü 23 katman.....	62
Şekil 4.29.	0,254mm çekme numunesi mikroskop görüntüsü 16 katman.....	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Fortus 400mc 3B FDM yazıcı teknik özellikler.....	34
Çizelge 3.2. DJB Instrument IH-01 modal çekiç teknik özellikleri.....	35
Çizelge 3.3. Dytran 3055D2 teknik özellikleri.....	36
Çizelge 3.4. INSTRON 34TM-50 model çekme cihazı.....	37
Çizelge 3.5. DEWESoft SIRIUS 16 kanallı veri toplama cihazı özellikleri.....	38
Çizelge 3.6. FDM plaka yazdırma parametreleri.....	40
Çizelge 4.1. 0,127mm katman kalınlığına ait mekanik özellikler.....	44
Çizelge 4.2. 0,178mm katman kalınlığına ait mekanik özellikler.....	45
Çizelge 4.3. 0,254mm katman kalınlığına ait mekanik özellikler.....	46
Çizelge 4.4. Katman kalınlığına göre ortalama elastisite modülü ve yoğunluk....	47
Çizelge 4.5. Modal analiz simülasyon malzeme kartı.....	48
Çizelge 4.6. Modal analiz simülasyon ilk 3 doğal frekans.....	48

1. GİRİŞ

Endüstrideki imalat şekilleri ve prosesleri teknolojinin ilerlemesiyle sürekli bir gelişim içerisinde. Bu gelişim son zamanlardaki bilgisayar, yazılım ve elektronik alanlarındaki ilerlemelerle çok daha aktif bir ivme kazanmıştır. İlerlemeler sonucunda eklemeli imalat yöntemleri içerisinde yer alan yazıcılarla üretim ortaya çıkmıştır. Bu üretim yöntemi 3 boyutlu (3B) olarak isimlendirilmiştir ve diğer üretim metodlarından farklı olarak katman katman üretim esasına dayanmaktadır. Çıktığı ilk zamanlarda endüstriyel olmaktan ziyade hobi, hediyelik eşya amaçlı çok küçük ürünleri bastırma amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Zaman içerisinde kendini kanıtlayan 3B üretim teknolojisi otomotiv, uzay, havacılık ve hatta yapay organ üretimleriyle biyo-mühendislik sektöründeki payını büyük ölçüde arttırmıştır. 3B yazıcı teknolojileri çok kısa sürede devreye alınma ve düşük yatırım gibi avantaj sağlamaktadır. Sağladıkları bu avantajlarla geliştirme süreçlerindeki prototipleme, numune üretimi gibi süreçler oldukça kolaylaşmış ve bu süreçteki maliyetler giderek azaltılmıştır.

Zaman içerisinde katmansal 3B üretim yöntemine dayanan farklı üretim çeşitleri geliştirilmiştir. Teknolojinin getirdiği en güncel 3B imalat yöntemlerinden bir tanesi de Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) yöntemidir. FDM ilk olarak 1980 yıllarının başında ortaya çıkmıştır. Filament şeklinde olan plastik malzemenin, makara vb. gibi bir sistem yardımıyla sıcak olan bir nozula yönlendirilmesi ve burada eriyik halde dışarı akıtılması sonucunda katılaşma prensibine dayanmaktadır. Son derece ucuz ve kurulumu kolay olan bir sistemdir. FDM yöntemi zaman içerisinde çok geliştirilmiş ve profesyonel olarak birçok alanda kullanılmaktadır.

Eklemeli imalata dayalı 3B baskı yöntemlerinde süreç ve maliyet anlamında kazanım sağlanmış olursa da bazı durumlarda nihai ürünün mekanik ve dinamik davranışlarını etkileyen birçok üretim parametresi vardır. FDM üretim yönteminde nihai ürünü etkileyen parametrelere; tarama açısı, katman kalınlığı, doluluk oranı, baskı hızı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, ortam sıcaklığı, fan hızı, desen çeşidi örnek olarak verilebilir. Yapılan çalışmalarda bu değişiklikleri saptamak adına çok fazla parametre incelemesi gerçekleştirilmiştir ve

yapılan çalışmalar sonucunda optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çünkü üretim proses parametrelerinin herhangi birinin sürekli artması veya azalması, çoğu zaman malzemenin özellikleriyle doğrusallık göstermemektedir.

Üretim parametrelerinin malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisi çekme testleri, eğme testleri vb. gibi testler ile belirlenebilmektedir. Dinamik özelliklere olan etkiler ise deneysel modal analiz ile belirlenebilir. Modal test ve analiz yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemek ve harici olarak uygulanan kuvvetlerin yapılarda meydana getirdiği titreşim hareketlerini anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Uygulama ve süreç olarak diğer yöntemlere nazaran kurulumu basit olmakla birlikte, yorumlanması da oldukça kolaydır. Deneysel modal testten sonra sonuçların yorumlanması modal analiz olarak isimlendirilir. Analiz sonuçları bizlere yapılara ait modal parametreleri (doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı) vermektedir. Modal parametreleri belirlemek yapıların hangi şartlar altında çalışması veya çalışmaması gerektiği konusunda yardımcı olacaktır. Çünkü örneğin yapılar doğal frekans bölgelerinde tahrik edildiklerinde rezonansa girmektedir ve uyarı sonucu cevap sinyalleri sonsuz genliğe doğru yükselme eğiliminde olmaktadır. Ayrıca meydana gelen titreşim ve gürültü oldukça fazla hissedilmektedir. Bu tip istenmeyen olgulardan kaçınmak, yapı güvenliğini sağlamakla birlikte yapının kullanım ömrünü arttıracaktır. Modal test ve analiz sonucu öngörülen yapısal iyileştirmeler aynı zamanda yapılan testlerin doğruluğuyla mümkün olacaktır. Test ve doğrulama alanlarının çoğunda olduğu gibi modal analizi de doğrulamak için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olan parametre Modal Güvence Matrisidir (MGM). Yapılan testlerin simülasyonlarla olan korelasyonunu anlamak için kullanılan bu yöntem elde edilen analiz sonuçlarının bilgisayar ortamındaki simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması prensibine dayanmaktadır.

Modal analiz gittikçe yaygınlaşan bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle gelişen sensör ve data toplama teknolojileri modal analiz yöntemini hızlı bir şekilde ileriye taşımaktadır. Bir otomobil aynasından inşaata kadar pek çok alanda kullanılmaktadır ve gittikçe yaygınlaşmaktadır. Özellikle sürekli değişen yüklere maruz kalan uçak motorları, türbinleri, kanatları ve rüzgar türbini kanatları gibi büyük ve pahalı yapılar için modal analiz vazgeçilmez bir test yöntemidir.

1.1 Tezin Amacı

İmalat çeşitlerinin ve parametrelerinin üretilen ürünlerin mekanik ve dinamik özelliklerine olan etkisi oldukça fazladır. Üretilen nihai ürünlerin kullanım yerine göre belli teknik özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bu sebeple istenilen üretim şartlarını göz önünde bulundurarak üretim yöntemi ve parametreleri seçilmediler. Aynı durum eklemeli imalat yöntemlerinden olan 3B yazıcılar ile üretim içinde geçerlidir. Örneğin tek yönde yığma şekliyle FDM ile üretilen bir plakanın yığma yönüne olan çekme mukavemeti çok yüksek olacaktır fakat aynı ürünün yığma yönüne dik yöndeki çekme mukavemeti çok zayıf olacaktır. Bu durumda malzeme izotropik olmayan bir davranış sergilemiş olur ve bundan kaçınmak için katmanları birbirine dik yığma yöntemiyle üretim yapılabilir. Bu şekilde üretilen parçanın mekanik özellikleri her iki yönde de eşit olacaktır ve tek yönde yüksek mekanik özellik gösterme eğilimden uzaklaşmış olacaktır.

Bu tez çalışmasında PC-ABS (Polycarbonate – Acrylonitrile Butadiene Styrene) malzeme kullanılarak FDM üretim parametresinin mekanik ve dinamik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Üretim esnasında tüm mevcut üretim parametreleri sabit tutulurken sadece katman kalınlığı değiştirilmiştir. FDM ile üretim esnasında katman kalınlığının değiştirilebilmesi için nozul ucunun değişmesi gerekmektedir. Fortus 400mc 3B FDM yazıcı T10(0.127mm), T12(0,178mm), T16(0.254mm) ve T20(0.330mm) olmak üzere standart 4 farklı boyutta nozul uç tipi sunmaktadır. Bu tez çalışmasında 3 çeşit uç ile denemeler yapılmış ve 0.330mm olan uç tipi çalışmaya dahil edilmemiştir. Öncelikle ile ISO-527-2 1B standardına göre çekme çubukları üretilmiş ve çekme testleri yapılmıştır. Çekme Testleri Instron çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Testlerin sonuçlarından numunelerin kopma mukavemetleri ve elastisite modülleri çıkarılmıştır. Testler 7 numune üzerinden yapılmış ve kopma bölgesi kabul kriterine göre olan 5 numune üzerinden hesaplanmıştır.

Yapılan çekme testleri sonucunda farklı katman kalınlıklarına sahip numunelerinin elastisite modülleri bulunmuş ve elde edilen elastisite modülleri bilgisayar ortamında modal analiz simülasyonu yapabilmek için AnsysWB® programına aktarılmıştır. AnsysWB® ile modal simülasyon sonucunda plakaların ilk üç modal parametreleri (doğal frekans, sönüm oranı ve

mod şekli) elde edilmiştir. Deneysel modal testler yapabilmek için ayrıca 300x300x3mm boyutlarında plakalar üretilmiştir. Daha sonra üretilen plakalar üzerinde çekiç gezdirme yöntemiyle deneysel model test yapılmıştır. Plakalar eşit boyuttaki düğüm noktalarına ayrıldıktan sonra modal çekiç ile uyarı verilerek sabit ivmeölçer noktasından cevap alınmıştır. Deneysel modal testler DEWESoft® data toplama cihazı ve yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Mevcut tüm düğüm noktalarında verilen uyarı kuvvetine karşılık gelen ivme çıktıları sonucunda Frekans Cevap Fonksiyonu (FCF) hesaplanmıştır. Elde edilen tüm FCF'ler işlenmek üzere MEScope® yazılımına aktarılmış ve burada modal parametreleri hesaplanmıştır. Deneysel modal analiz sonucunda elde edilen modal parametreler, bilgisayar ortamında simülasyon sonucunda elde edilen modal parametreler ile her bir uç tipi için kendi arasında karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda mod şekillerin birbirine olan uyumlarını gösteren Modal Güvence Matrisleri (MGM) elde edilmiştir. Böylece deneysel modal analiz ile bilgisayar ortamındaki modal analizlerin birbirleriyle olan korelasyonu belirlenmiştir. Ayrıca test için kullanılan plakaların yapısı incelenmiş ve mikroskop ile görüntülenmiştir. Elde edilen tüm testlerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmış, ilgili kısımlara ait yorumlar yapılmış ve optimum uç ile buna bağlı olarak katman kalınlığı belirlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Üç boyutlu (3B) yazıcılar artık endüstrinin vazgeçilmez üretim yöntemleri arasında yerini almıştır. Özellikle çok kısa sürede düşük maliyetle imal edilebilirlik prototipleme süreçlerini hızlandırmış ve 3B yazıcı ile üretimi daha rekabetçi bir hale getirmiştir. Bu yazıcılar ile üretilen ürünlerin fiziksel özellikleri, üretim çeşitleriyle değişmekle birlikte aynı zamanda ilgili üretime ait üretim parametreleriyle de değişmektedir. Bu yöntemler arasında yer alan FDM yönteminde, üretim maliyeti ve işlem süresinin düşük olması nedeniyle birçok endüstri tarafından özellikle otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde sıklıkla tercih edilmektedir.

FDM yönteminde ürün kalitesini ve özelliklerini etkileyen üretim parametreleri ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlar arasında Es Said vd. (2000) üretim parametrelerinin mekanik özelliklere olan etkilerini incelemek üzere 5 farklı katman oryantasyonuyla yaptıkları üretimde kopma dayanımı, darbe mukavemeti gibi mekanik özelliklerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Tek yönde yığılma ile üretim sonucu en yüksek çekme ve darbe mukavemeti elde ettiler. Tek yönde yığılma ile ürettiği oldukları bu numunelerle izotropik olmayan bir yapı elde etmiş oldular. Bu durumun malzemenin örme yönüne dik yöndeki mekanik özelliklerini oldukça düşürdüğünü gözlemlediler. Ahn vd. (2002) daha sonra yaptıkları çalışmada izotropik olmayan bir ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) malzeme 5 farklı üretim parametresi (tarama yönü, renk, sıcaklık, hava boşluğu, örme yönü) değiştirerek malzemenin basma ve çekme mukavemetlerine olan etkisini DOE (Design of Experiment) yardımıyla incelemişlerdir. Lee vd. (2005) yaptıkları çalışmada, ABS malzeme kullanarak elastisite modülü optimizasyonu yapmayı amaçladılar. Katman kalınlığı ve tarama açısını değiştirerek Taguchi yöntemiyle optimum elastisite modülünü sağlayan parametreleri belirlediler.

Sbriglia vd. (2016), dinamik karakteristikleri belirlemek üzere yaptıkları bir çalışmada üç farklı malzeme için örgü hızı, nozul başlığı, destek plaka sıcaklığı, katman kalınlığı gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Özcanlı (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, FDM ile üretilen parçaların modelleme, test, validasyon ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmasına yönelik olarak öncelikle üretilen parçaların modal analizi ile doğal

frekansları bulunmuş ve yapısal testler üzerinde yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Test sonuçları sonlu elemanlar yöntemiyle kıyaslanmış ve testler doğrulanmıştır.

İyibilgin vd. (2019) birbirinden farklı 7 tip (kare, bal peteği, üçgen, dikdörtgen vb.) iç yapı geometrisine sahip kirişlerin dinamik karakteristiklerini belirlemek için modal test yöntemi uygulamıştır. Öncelikle farklı tip geometrilere ait modelleri bilgisayar ortamında üç boyutlu tasarladıktan sonra FDM yöntemiyle aynı üretim koşulları altında üretmişlerdir. Kirişleri modal titreşim testi yapısına montajladıktan sonra serbest-serbest sınır koşulları altında testleri gerçekleştirmiştir. Modal testler sonucu Frekans Cevap Fonksiyonlar (FCF) saptanmış ve modal parametreler elde edilmiştir. Sonuçları değerlendirdiklerinde yapılara ait titreşim özelliklerinde bariz değişiklikler olduğunu belirlemişlerdir. Sönüm oranı parametresi göz önünde bulundurulduğunda optimum değer bal peteği formunda olduğunu, en rijit olan yapının ise içi en dolu malzeme olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca malzemenin iç yapısının titreşim karakteristiğine olan etkisinin yüksek frekanslarda daha belirgin hale geldiğini saptamışlardır. Kannan ve Ramamoorthy (2020) yaptıkları çalışmada, ABS, PC (Polycarbonate) ve PC-ABS malzemelerinin modal parametreleri ve mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. PC-ABS malzemenin diğer iki malzeme türüne göre daha mukavemetli olduğu saptanmıştır. Dinamik davranışları incelemek adına her malzemeden üç adet kiriş üretilmiş ve doğal frekansları karşılaştırılmıştır. Test sonucunda PC-ABS malzemenin PC ve ABS malzemelere göre daha yüksek doğal frekansa sahip olduğu saptanmıştır. Nguyen vd. (2022) FDM ile üretilen yapıların modal analiz ve titreşim cevap çıktılarını değerlendirmek üzere deneysel bir çalışma yapmıştır.

Bu çalışmada ise FDM makinesinde PC-ABS malzeme ile çekme numuneleri ve test plakaları üretilmiştir. Numunelerin çekme testleriyle elastisite modülleri belirlenmiştir. Ayrıca üretilen plakalar üzerinden deneysel modal analizleri yapılmıştır. Modal parametreler elde edildikten sonra katman kalınlığına bağlı olan değişimler incelenmiş ve yorumlanmıştır. Analiz sonuçları ile bilgisayar ortamında yapılan modal simülasyonlar karşılaştırılmış ve testin doğruluğu gösteren MGM'ler elde edilmiştir. Çalışma içerisinde ilgili üretim yöntemine, kullanılan ekipmanlara, test ve analiz yöntemine dair bilgiler verilmiştir.

2.1 Eklemeli İmalat

Genel imalat yöntemleri 1970'li yıllara kadar talaşlı ve talaşsız olmak üzere ikiye ayrılmaktaydı. Bu imalat yöntemleri bilindiği üzere üretilecek olan parçanın üzerinden talaş kaldırma ve kaldırmamaya göre ayrılmaktaydı. Talaşlı imalatta ana parçayı üretmek için ilgili parçanın hacminden daha büyük parça kullanılmaktadır. Daha sonra çeşitli talaşlı imalat yöntemleriyle ürün son halini almaktadır. Talaşlı imalat yöntemlerinden tornalama, cnc işleme, frezeleme ve tel erozyon en başta gelenleridir. Bu tip üretim yöntemiyle üretilen parçalar seri üretime uygundur. Ayrıca bu üretim yöntemleri yüksek hassasiyetli parça üretimine imkan sağlamaktadır fakat üretim esnasında parçadan talaş kaldırıldığı için verimi düşüktür. Üretilecek parçanın boyutsal ve geometrik düzeninden dolayı bazen üretimi zorlayabilmektedir. (Bıyıklıoğlu, 2019)

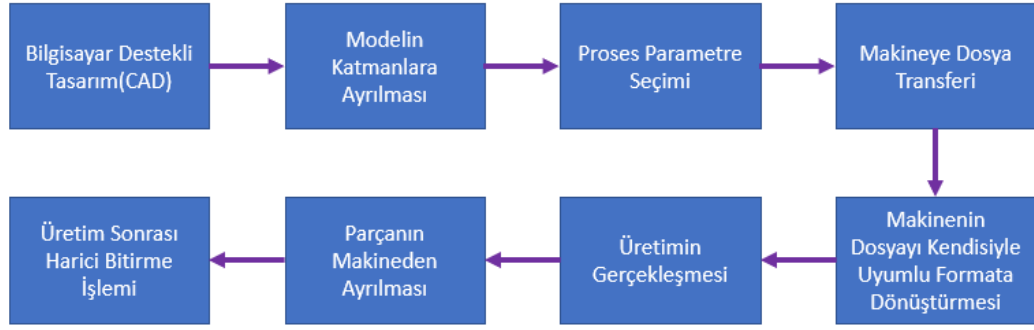
Talaşsız imalat yönteminde ise ana parça üretilirken talaş kaldırmadan bu işlem gerçekleşir. Birkaç farklı üretim prosesi aracılığıyla istenilen ürünün formu elde edilir. Bu tip üretim yöntemine döküm, haddeleme, presleme ve ekstrüzyon örnek verilebilir. Fakat talaşsız imalatta üretilen parçaların geometrik karmaşıklığı talaşlı imalatla kıyaslandığında daha azdır çünkü döküm yöntemi hariç talaşsız imalatta çok karmaşık geometrilerin üretimine imkan sağlamamaktadır. Bu üretim yöntemi metal dışında seramik, plastik gibi malzemelerinde üretimini mümkün kılmaktadır bu sebeple kullanılan malzeme açısından talaşlı imalattan avantajlıdır. (Bıyıklıoğlu, 2019)

Teknolojik gelişmeler neticesinde eklemeli imalat ile yeni bir üretim yöntemi ortaya çıkmıştır. Eklemeli imalat malzemelerin üst üste katman şeklinde yığılmasıyla gerçekleşen son derece hızlı ve uygulaması kolay olan bir üretim yöntemidir. Eklemeli imalat yöntemleri ilk ortaya çıktığı zamanlarda hızlı prototipleme adıyla anılmaktaydı. Hızlı prototipleme ilk zamanlarda planlanan üretim yönteminden önce fiziksel ürün ortaya koymak amacıyla kullanılmaktaydı. Daha sonra teknolojinin ilerlemesiyle birlikte hızlı prototipleme yöntemiyle elde edilen ürünlerin nihai ürün olarak kullanılabilmesi fark edildi ve bu şekilde hızlı prototipleme eklemeli imalat yöntemine çevrildi. Bu biçimde üretilen parçalar artık prototip değil ana ürün olarak şekillenmeye başladı. (Gawel, 2020) Eklemeli imalatı diğer

yöntemlerden ayıran en önemli özelliği ürünlerin katman katman olarak üretilme şeklidir. Neredeyse tüm eklemeli imalat yöntemleri bu temel prensip ile çalışmaktadır. Eklemeli imalat süreçlerinde ilk önce bilgisayar ortamında model tasarlanır ve kullanılacak makinedeki yazılımın istediği formata dönüştürülür. Daha sonra ilgili üretim yöntemine ait proses parametrelerinin girdisi yapılır. Prensip olarak katman şeklinde ilerleyen üretimden dolayı yazılım tasarımı belli katmanlara ayırarak gerçekleştirir. Eklemeli imalat yapısı itibarıyla çok karmaşık geometrilerin üretimine imkan sağlamaktadır. Fakat eklemeli imalat yöntemlerinden her çeşit malzemenin üretimine olanak sağlayan bir üretim çeşidi yoktur. Genel olarak eklemeli imalat yöntemleri Şekil 2.1’de deki gibi ayrılmıştır.

	TIP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER	
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	-Düşük yazıcı maliyeti -Çoklu malzeme ile baskı -Yüksek mukavemet -Düşük parça çözünürlüğü -Zayıf yüzey iş-sonu -Düşük baskı hızı	
		Polimerize edilebilir	Fotopolimerizasyon	SL (SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV ışını	-Yüksek baskı hızı -Yüksek parça çözünürlüğü -Yüksek detay -Malzeme maliyeti yüksek	
				DLP		Projeksiyon	-Yüksek baskı hızı -Çözünürlük,projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır	
			Malzeme püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	UV ışını	-Çoklu malzeme ile baskı -İyi yüzey iş-sonu -Yüksek doğruluk -Yüksek detay	
	KATI	Yapışık objeler	Sac laminasyon	LOM	Kağıt Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	-İyi yüzey iş-sonu -Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük -Büyük boyutlu malzeme basabilme -Dikey yönde zayıf mukavemet	
	TOZ	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Metal tozu, Seramik tozu	Yüksek-Güçlü Lazer Işını	-Yüksek doğruluk -Yüksek detay -Tam dolu parça üretimi -Yüksek mukavemet -Destek yapıları gerekmez
				DMSL				
				SLM				
		EBM	Erimiş metal tozu	Lazer Işını	-Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme -Son-işlem gerekir			
		Direk enerji depolama				LENS		
EBAM								
Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal Enerji	-Renkli obje baskısı -Destek yapıları gerekmez -Geniş malzeme seçeneği -Yüksek baskı hızı -Son-işlem için infiltran malzeme gerektirir -Düşük dayanım -Yüksek gözeneklilik			

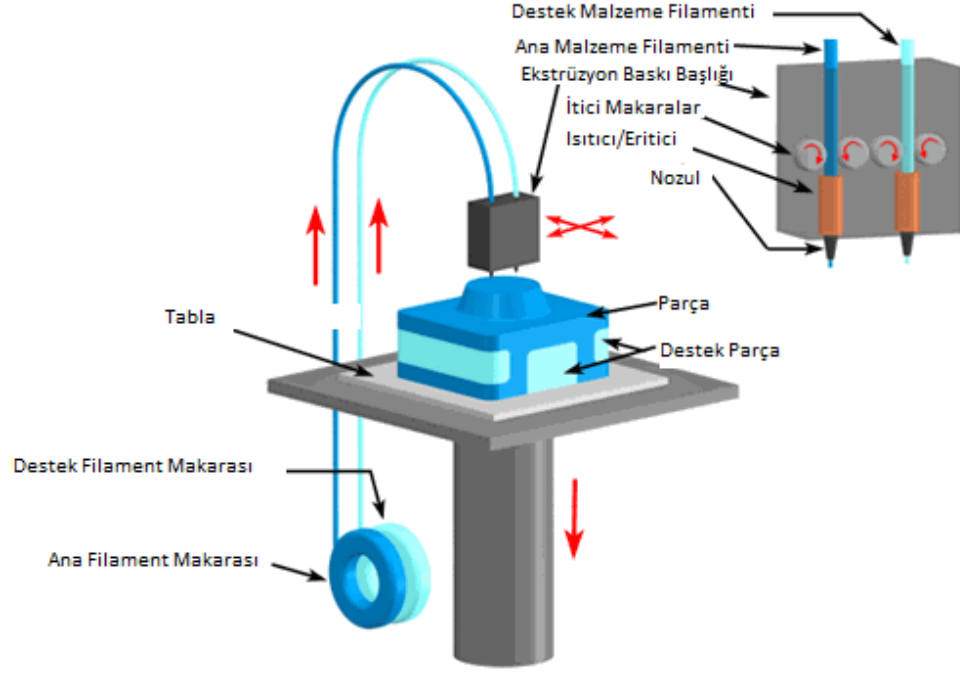
Şekil 2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri (Sürmen, 2019)



Şekil 2.2. Eklemeli İmalat Üretim Prosesi

2.1.1 Eriyik Yığma Modelleme (FDM)

FDM teknolojisi sıcak nozul üzerinden plastik malzemenin eritilerek üst üste katman şeklinde yığılmasıyla üretim prensibine dayanır. FDM genel olarak ABS, PC, SLA gibi geniş kullanımı olan termoplastik malzemeler ile gerçekleştirilen popüler 3B yazıcı ile üretim şeklindedir. Bu üretim metodunun popüler olmasının en büyük sebepleri arasında çok kompleks geometrilerin üretimine elverişli olması ve ayrıca çok kısa sürede prototip üretimine imkan sağlaması gelmektedir. FDM diğer eklemeli imalat yöntemleri ile kıyaslandığında maliyet açısından daha ucuz olan bir üretim şeklindedir. Bu üretim teknolojisinin mucidi Steven S. Crump'dur ve 1989 yılında bu teknoloji kendi adına patentlenmiştir. Bazı kompleks geometrilerin üretimi esnasında ana geometri oluşturulmadan önce ana geometriyi ayakta tutacak bir destek geometri oluşturulur. Destek geometri parça üretimi tamamlandıktan sonra ana parçadan ayrılır. Gelişen teknoloji ile birlikte 3B yazıcıların kabiliyetleri de artmış ve birçok sektörde üretim anlamında yer bulmuştur. Teknolojik gelişmeler ile birlikte ayrıca üretim sürecine yapılacak girdilerin sayısı da artmıştır. Bu durum üretime dahil olan proses parametrelerinin, mekanik ve dinamik özelliklere olan etkisini araştırmanın önünü açmış ve bu anlamda birçok çalışma yapılmıştır. Üretim parametrelerine örnek olarak; katman kalınlığı, nozul sıcaklığı, platform sıcaklığı, yığma hızı, filament kalınlığı, yığma yönü, yığma açısı, doluluk oranı, dolgu tipi, soğutma fan hızı, nozul genişliği vb. verilebilir. Bu tez kapsamında ise filament kalınlığının etkisi incelenmiştir. FDM teknolojisi başta otomotiv olmak üzere savunma, uzay ve biyomedikal alanlarda tercih edilmektedir.



Şekil 2.3. FDM Bileşenleri (Anonim, 2008)

FDM ile Üretim Nasıl Gerçekleşir

Öncelikle bilgisayar ortamında çizilen 3B CAD dosyası (.STL) formatında kaydedilir ve 3B yazıcıya aktarılır. 3B yazıcıda ilgili data açıldıktan sonra malzeme, renk ve katman kalınlığı gibi üretim parametreleri belirlenir. Eğer istenilen parçanın üretimi için bir destek geometri gerekiyorsa bu destek geometri belirlenir gerekmiyorsa ana geometri üzerinden ilerlenir. Daha sonra istenilen yığıma yönü vb. gibi parametreler seçilir. Bu adımdan sonra artık 3B yazıcı içerisindeki algoritma istenilen geometriyi katmanlara ayırır, ana parça ve destek için üretim esnasında izlenecek takım yollarını oluşturur. Oluşturulan bu takım yollarıyla birlikte aslında ekstrüzyon nozulunun hangi zamanda hangi koordinatlarda, eğer makinenin tablası hareketli ise tablanın hangi zamanda hangi koordinatlarda, malzeme makarasının ne zaman ne kadar malzeme taşıyacağı ve filamentin nerede ne kadar ısınacağı gibi parametreler belirlenmiş olur. Algoritmanın tanımladığı proses onaylandıktan sonra yazıcı tarafından yazdırılmaya hazırdır.

Yazdırma işlemine başlamadan hemen önce, baskı nozulu ucunun sıcaklığı ile baskı plakasının sıcaklığının ayarlanan sıcaklığa gelmesi için ön ısıtma başlatılmalıdır. Ön ısıtma sonrasında ayarlanan sıcaklık değerlerine ulaşıldığında, filament tutucular filamenti eritme ve yazdırma işlemi için yazıcı nozula doğru iter. Erimiş halde bulunan filamentler baskı için nozulun ucuna ulaştığında algoritmada ayarlandığı gibi hareket ederek dışarıya doğru akarken istenilen geometri oluşmaya başlar. Nozuldan dışarıya çıkan eriyik haldeki plastik malzeme tablanın üzerine katman katman olarak yığılır ve hemen soğuyarak katılaşmaya başlar. Bazı durumlarda soğutma işlemini daha hızlı gerçekleştirebilmek için baskı nozuluna harici olarak soğutma fanı takılır. Bir sonraki katmanı oluşturmak için nozul veya tablanın yer değiştirmesi gerekmektedir. Genel FDM makinelerinde nozul X, Y ve Z ekseninde hareket edebilmektedir. Z ekseninde hareket etmeyen yazıcılarda ise tabla aşağı yukarı hareket ederek Z eksenindeki koordinat değişimini tamamlamış olur. Üretim tamamlana kadar baskı nozulunu ya da tabla bu şekilde yer değiştirir. Üretim tamamlandıktan sonra destek malzemeyi ana üründen ayırmak için birkaç farklı işlem mevcuttur. Bu çalışmada kostik ile temizleme yapılmıştır. (Şekil 2.4). Her üretim çeşidinde olduğu gibi bu üretiminde avantajları ve dezavantajları mevcuttur.



Şekil 2.4. Üretim sonrası kostik karışımında bekleme

- **FDM teknolojisinin avantajları:**

Bu teknolojinin en belirgin özelliği sunmuş olduğu kolay erişebilirlik ve ucuz maliyettir.

Çok kısa sürede üretim özelliğiyle prototipleme vb. süreçleri hızlandırması.

Kompleks olan geometrilerin kolayca üretimine imkan sağlaması.

Portatif olması, az yer işgal etmesi ve kolay kullanıma sahip olması.

Kompleks olmayan üretim mantığının olması.

Çok çeşitli termoplastik malzeme kullanımına olanak sağlaması.

Filamentlerin tekrardan kullanılabilir olması.

Sürdürülebilir bir üretim yönteminin olması ve geri dönüştürülebilir malzeme kullanması.

- **FDM teknolojisinin dezavantajları:**

Yüksek derecede hassasiyet, yüzey kalitesi gibi özelliklerin sağlanamaması.

Uzun ve geniş yüzeylerin üretimi esnasında parçada çarpılmaların meydana gelmesi.

Filamentin nozulda sıkışıp nozulu tıkmaması ve geometrinin bozulması.

Zayıf kalibrasyona sahip olması ve sürekli kalibrasyon ihtiyacı duyması.

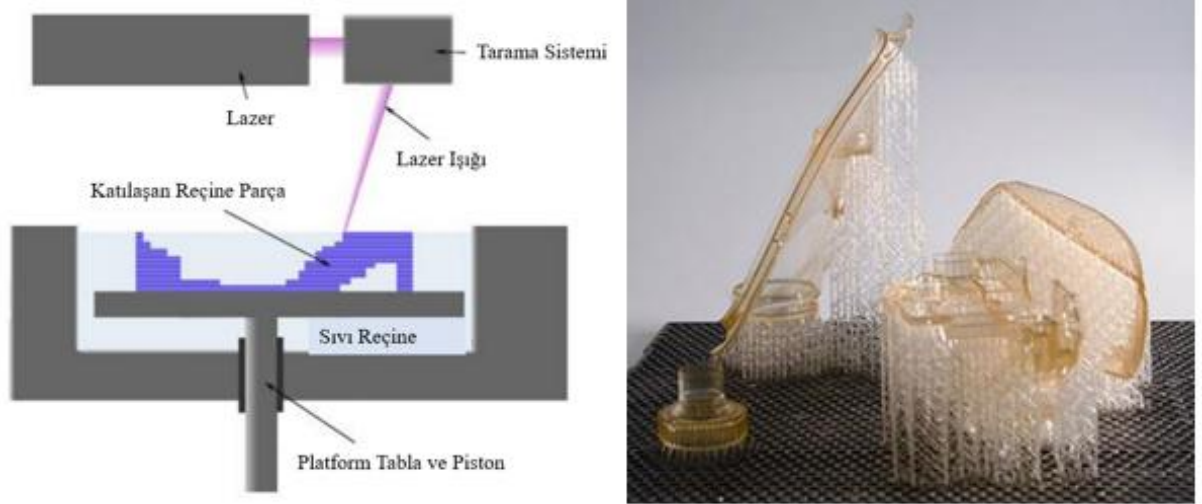
Aynı hacimdeki ürünü bazen diğer üretimler göre daha uzun sürede üretmek

Katmanlar arası yapışmanın bazen zayıflaması ve katmanların açılması

Genelde üretilen parçanın izotropik özelliklere sahip olmaması

2.1.2 SLA (Stereolithography)

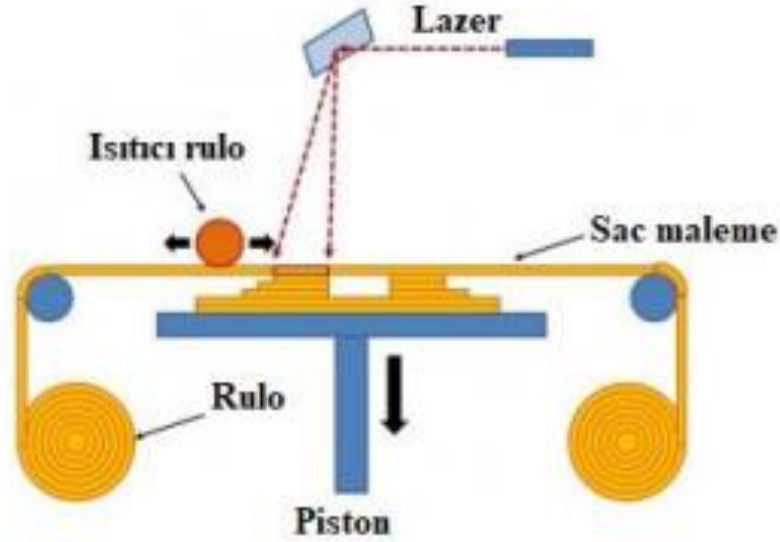
SLA eklemeli imalat yöntemlerinden en eski olan yöntemdir. Yüzey kalitesi oldukça iyi olan bir üretim yöntemidir ve genellikle bu sebeple tercih edilmektedir. Tank içerisinde bulunan ışığa duyarlı fotopolimer reçinenin üzerine Ultraviyole (UV) ışık düşürülmesiyle polimerizasyon gerçekleşir ve reçine katılarak sertleşir. Reçinenin sertleşmesiyle birlikte ilk katman oluşturulmuş olur. Diğer katmanları oluşturmak için tabla aşağı yönde hareket ettirilir. Bir sonraki aşamada kullanılacak olan reçine tabakası, oluşturulan katmanın üzerine yönlendirilir. Sistem tekrardan ilk katman oluşturulmasında olduğu gibi ışığı istenilen geometriye uygun şekilde yönlendirir ve bu işlemler sürekli döngüsel olarak parça tamamlanana kadar tekrar eder. (Wang vd., 2016) Işık yansıtıcı aynalar üzerinden motor vb. gibi sistemlerle kontrol edilir. Ana parça oluşturulduktan sonra destek parçalar ana parçadan kırılarak ayrılır. Uzun süre ışığa maruz bırakılan parçalar kırılğan hale gelebilmektedir bu sebeple polimerizasyon süresi gibi parametreler parçaların mekanik özellikleri için oldukça önemlidir. SLA yöntemi Digital Light Processing (DLP) denilen yöntemle çok benzerdir. SLA üretimi sonrası parça üzerinde polimerizasyonu gerçekleşmeyen reçineler alkol vb. ile temizlenebilmektedir.



Şekil 2.5. SLA çalışma prensibi (Coros, 2020)

2.1.3 Lamine Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing- LOM)

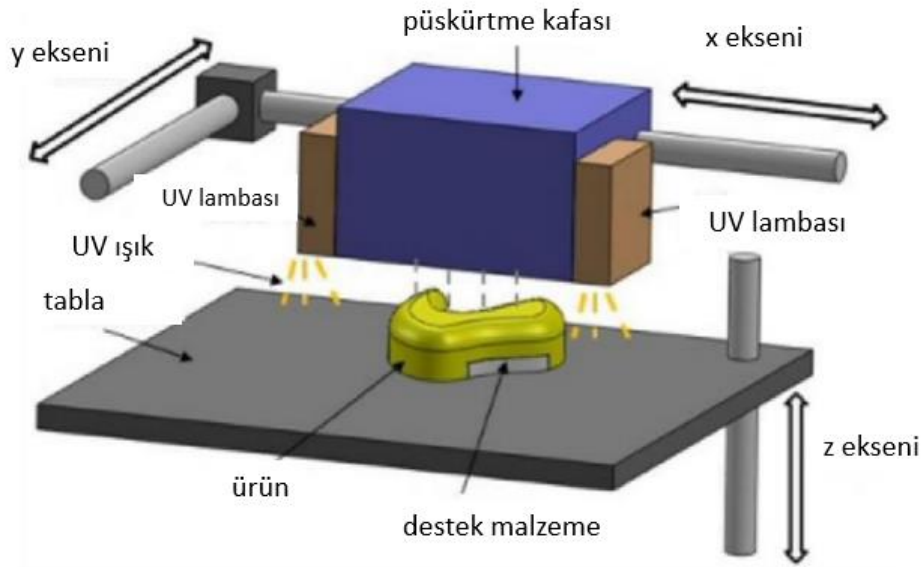
LOM üretim teknolojisi bir nesnenin imalatında ekleme ve çıkartmanın beraber kullanıldığı bir yöntemdir. Metalik sac, kâğıt, plastik film gibi malzemeler LOM üretim yönteminde en çok kullanılan malzemelerdir ve genellikle sac formundadırlar. Sac formundaki malzemeler karbondioksit tabanlı lazer kullanılarak kesme işlemine tutulurlar. Bu işlem tamamlandıktan sonra malzemeyi tutan tabla platform işleme tabi tutulan sacın kalınlığı kadar aşağı iner ve bir sonraki malzeme tablaya getirilir. Katmanlar basınç ve ısıtma yöntemiyle termal bir bağlayıcı vasıtasıyla birbirine yapıştırılır. Proses boyunca kesilen kısım sonraki aşamada kesilecek olan parça için destek görevi sağlamaktadır. Tasarım tamamlana kadar bu süreç döngü şeklinde devam eder. LOM üretim teknolojisi proses olarak diğer eklemeli imalat yöntemlerinde olan üretim sonrası işlemler ve destek yapıları ihtiyaç duymamaktadır. Ayrıca üretim esnasında herhangi bir çarpılma ya da deformasyon olmamaktadır. LOM teknolojisi düşük maliyetli bir üretim çeşididir. Tüm LOM teknolojisini avantajlı kılmaktadır. (Sürmen, 2019) Üretilen parçalar yüksek mekanik özelliklere sahip olmadıklarından dolayı sanayide endüstriyel kullanıma pek uygun değildirler bu sebeple genellikle estetik ve görsel amaçlı kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. LOM üretim Yöntemi (Sürmen, 2019)

2.1.4 Çoklu Püskürtme (Polyjet -PJ)

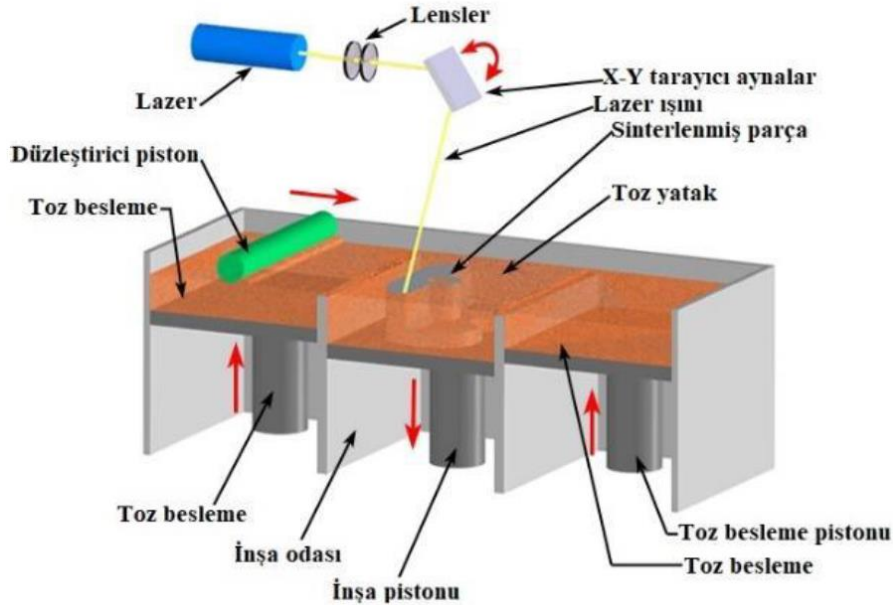
PJ üretim teknolojisi, Inkjet teknolojisi kullanarak fiziksel ürünler ortaya koyan bir eklemeli imalat yöntemidir. Inkjet başlığı üretim esnasında x ve y ekseninde hareket ederek fotopolimer malzeme dağıtımını gerçekleştirir. Bu fotopolimer malzeme her bir katman bitiminden sonra kürleşerek katlaşır. Diğer eklemeli imalat yöntemlerinde olduğu gibi katman üstüne katman şeklinde üretim gerçekleşir. Bu üretim teknolojisiyle elde edilen katmanlara ait kalınlıklar $16\mu\text{m}$ 'dir ve bu durum üretilen parçaların çok yüksek ve hassas çözünürlüğe sahip olduğunu göstermektedir. Fakat her şeye rağmen bu teknoloji ile üretilen malzemelerin mekanik özellikler SLA gibi diğer eklemeli imalat yöntemleriyle kıyaslandığından zayıf kalmaktadır. Sarkan çıkıntı bölgelerindeki yapıları desteklemek amacıyla jel tipi polimer kullanılmaktadır. İşlem tamamlandıktan sonra bu malzeme su jeti vasıtasıyla temizlenmektedir. (Wong ve Harnandez, 2012) PJ üretim teknolojisi çoklu püskürtme sayesinde renkli parçaları üretmeye imkan sağlamaktadır. Çok hassas ve pürüzsüz yüzeylerin istenildiği durumlarda bu teknoloji öne çıkmaktadır.



Şekil 2.7. Polyjet Üretim Yöntemi (Udroiu ve Braga, 2017)

2.1.5 SLS (Selective Laser Sintering)

SLS teknolojisi SLA teknolojisi gibi üretim esnasında lazer ışığı kullanmaktadır. SLS teknolojisi SLA'dan farklı olarak toz halinde bulunan malzemeyi katılaştırarak üretim gerçekleştirir. Toz halindeki malzemeler havuz gibi tankın içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca tankın içerisinde üretim boyunca hareket edebilen taşıyıcı bir platform bulunmaktadır. Platformun yukarı veya aşağı yöndeki hareketleriyle katmanlar oluşturulmaktadır. Bir katman oluşturulduktan sonra platform hareket ettirilir ve silindirik tarzı sistem yardımıyla bir sonraki aşamada kullanılacak olan toz serpilir. Lazer vasıtasıyla toz katılaştırılır ve bir önceki katmana yapıştırılır. Fazla tozu uzaklaştırmak için kullanılan ilave sistemler mevcuttur. Üretim esnasında destek malzeme ihtiyacı duyulmamaktadır. SLS teknolojisi metal alaşımları, polimerler, titanyum, seramik gibi malzemelerle de üretim sağlamaktadır. Bu üretim yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri oldukça yüksektir. Üretim sonrası çeşitli proses işlemlerine tabi tutularak iyileştirmeler yapılabilmektedir. Çünkü üretilen parçaların yüzeyleri genellikle gözenekli olarak kalmaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmak için çeşitli yapıştırıcı malzemeler kullanılmaktadır. (Butler, 2011)



Şekil 2.8. SLS Üretim Yöntemi (Anonim, 2008)

2.2 Titreşim

Bir cismin denge konumu etrafında yaptığı salınım hareketine titreşim denir. Meydana gelen titreşimler etraftaki dış kuvvetlerden ve sistemin bu etki eden kuvvetlere karşı vermek istediği tepkiden kaynaklanmaktadır. Dış kuvvetler dönen sistemlerde dengelenmemiş kütle, deprem anında etki eden kuvvet, motor gibi parçalarda hareket eden kütle olabilir. Titreşim genel olarak istenmeyen ve kaçınılmaya çalışılan fiziksel bir olgudur. Örneğin bir motorun çalışırken sürekli titreşmesi, seyahat halinde giden bir aracın aynasının titreşimden dolayı sallanması, seyir halindeki bir uçağın kanadında meydana gelen titreşim istenilmeyen durumdur çünkü titreşim yapılarında hasar ve yıkım meydana getirmektedir. Bir uçağın gövdesinde meydana gelen titreşim yapıda yorulmaya sebep olacaktır. Aynı şekilde deprem anında oluşan titreşim binalarda çatlak ve yıkıma sebep olmaktadır. Bu sebeple meydana gelen titreşimleri engellemek tamamen mümkün olmadığından dolayı sürekli azaltmak üzere çalışılmaktadır. Bu sebeple mühendislik çalışmaları bu isterler doğrultusunda şekillenmektedir. (Kıral, 2017)

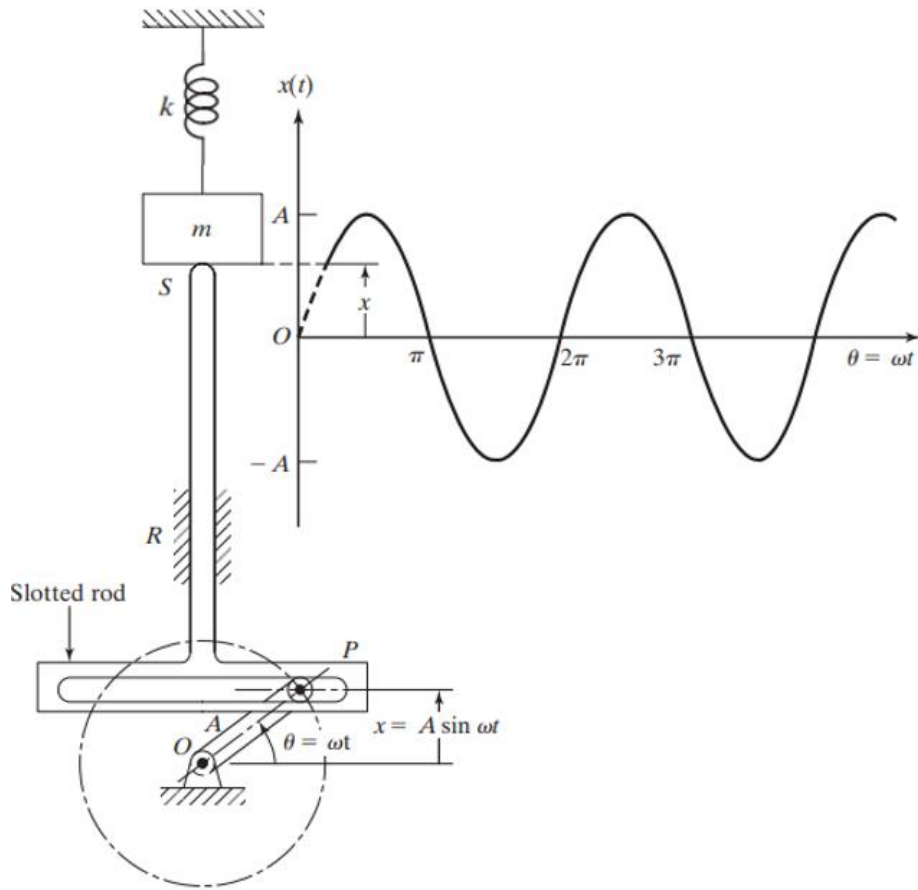
Bazı durumlarda ise titreşime ihtiyaç duyarız. Kulak zarı ve diğer işitme organlarımızın işitme işlevini yerine getirebilmesi için titreşime ihtiyacı vardır. Telli çalgılar ve diğer bazı çalgılarda titreşim sesin oluşması için istenilen bir durumdur.

Titreşim hareketi periyodik ve rastgele olarak 2 sınıfa ayrılır. Periyodik salınımının kendini bir saniyede tekrar etme sayısı “frekans”, bir salınım için gerekli süre ise “periyot” olarak ifade edilir. Frekansın Hertz (Hz), periyot ise saniye(s) ile ifade edilmektedir. (Denklem 2.1) Bu tez çalışması kapsamında periyodik ve sönümsüz titreşimlere değinilecektir.

$$f = T^{-1} = \frac{1}{T} \quad 2.1$$

2.2.1 Periyodik (Harmonik) Titreşim

Salınım hareketi, basit bir sarkaç sisteminde olduğu gibi sürekli olarak kendini tekrar edebilir veya deprem sırasında zeminde gerçekleştiği gibi oldukça düzensizlik gösterebilir. Eğer salınım hareketi eşit zaman aralığında kendini tekrar ediyorsa bu harekete periyodik hareket denir. En basit periyodik hareket türü harmonik harekettir. İskoç topuzu mekanizmasında m kütesinin sergilemiş olduğu basit bir harmonik hareket Şekil 2.9'da görülmektedir. Yarıçapı A olan bir krank merkezi O olan bir nokta etrafında dönmektedir. Krankın diğer ucu olan P noktası kılavuz içerisinde ileri geri hareket etmektedir. (Rao, 2011)



Şekil 2.9. İskoç topuzu periyodik salınım hareketi (Rao, 2011)

Krankın dönme açısal hızı ω olduğu varsayarsak yay-kütle sisteminin $x(t)$ anında yapacağı yer değiştirme, hızı ve ivmesi sırasıyla aşağıdaki denklemlerdeki gibi olacaktır.

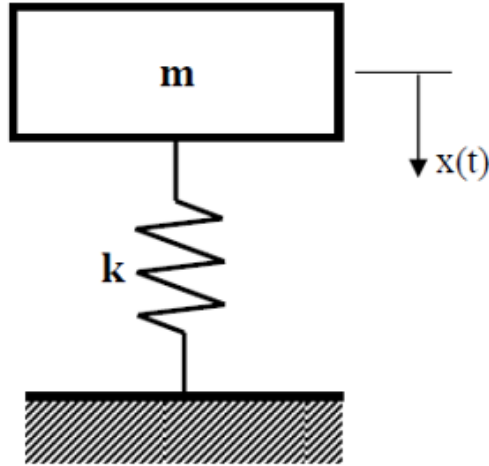
$$x(t) = A \sin \theta = A \sin \omega t \quad 2.2$$

$$\frac{dx}{dt} = \omega A \cos \omega t \quad 2.3$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 x \quad 2.4$$

2.2.2 Sönümsüz Titreşim

Sönümsüz serbest titreşim hareketi gerçek olmayan teorik bir harekettir. Çünkü her sistem kendisini bir şekilde sönümlenmektedir. Sönümsüz olmasının sebebi teorik olarak yapılan hesapları kolaylaştırmak içindir (Ay, 2019). Şekil 2.10'da sönümsüz bir kütle-yay titreşim sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Sönümsüz titreşim hareketi gösterimi (Kıral, 2017)

Sönümsüz serbest titreşim sistemin çözümü için $x(t) = ae^{st}$ kabulü yapılır. Kabul edilen çözüm ve türevler elde edilen hareket denklemlerinde yerine koyulur.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad 2.5$$

$$x(t) = ae^{st} \quad 2.6$$

$$\dot{x}(t) = sa e^{st} \quad 2.7$$

$$\ddot{x}(t) = s^2 a e^{st} \quad 2.8$$

$$|ms^2 + k| \cdot ae^{st} = 0 \quad 2.9$$

Çözümün geçerli olabilmesi için ae^{st} değerinin sıfır olmaması gerekmektedir bu durumda $|ms^2 + k|$ sifira eşit olmalıdır ve denklemin 0 yapan s kökleri sistemin öz değerleri olarak adlandırılır ve her iki s değeri de karakteristik denklemini sağlar. (Kıral, 2017)

$$ms^2 + k = 0 \rightarrow s_{1,2} = \mp \sqrt{-\frac{k}{m}} = \mp \sqrt{\frac{k}{m}} i = \mp i\omega_n \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \left(\frac{rad}{sn} \right) \quad 2.10$$

$$x(t) = a_1 e^{i\omega_n t} \text{ veya } a_2 e^{-i\omega_n t} \quad 2.11$$

$$x(t) = a_1 e^{i\omega_n t} + a_2 e^{-i\omega_n t} \quad 2.12$$

Denklemdaki a_1 ve a_2 kompleks sabitlerdir.

Trigonometrik fonksiyonlarda Euler formülü aşağıdaki gibidir.

$$e^{\mp i\omega_n t} = \cos \omega_n t \mp i \sin \omega_n t \quad 2.13$$

$$x(t) = (a_1 + a_2) \cos \omega_n t + i(a_1 - a_2) i \sin \omega_n t \quad 2.14$$

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \text{ veya } x(t) = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t \quad 2.15$$

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad 2.16$$

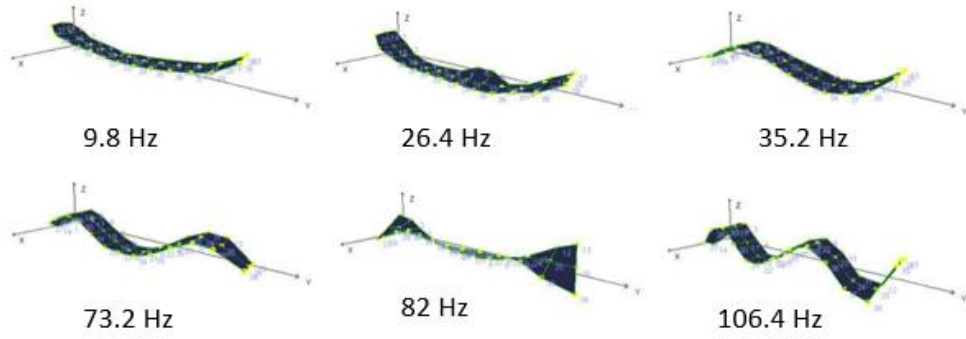
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \quad 2.17$$

2.3 Deneysel Modal Analiz

Modal analiz, yapıların yapısal dinamiklerini ve nasıl titreştiklerini aynı zamanda dışarıdan harici olarak maruz kaldıkları kuvvetlere karşı nasıl dirençli olduklarını anlamakta kullanılan vazgeçilmez bir analiz yöntemidir. Modal analiz ile birlikte yapılar optimize edilebilir, yapısal güvenlikleri doğrulanabilir. Modal analiz başta havacılık, inşaat mühendisliği, otomotiv olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modal analiz ile yapıların modal parametreleri elde edilir. Modal parametreler doğal frekans, sönüm oranı ve mod şeklinden oluşmaktadır. Günümüzdeki modal analiz uygulamalarının neredeyse hepsinde sonuçlar görselleştirebilir ve yapılara ait geometrilerle modal analizler yorumlanabilir. Doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranından oluşan grup Modal Model olarak isimlendirilir. Her yapıya ait modal model birbirinden farklılık göstermektedir. Yapıların dinamik davranışlarını yorumlamada gerekli olan modal modelin doğru elde edilmesi yalnızca doğru modal test ve analiz ile mümkündür. Modal model sonuçları incelendiğinde yapı hakkında genel bilgiler elde edilebilir. Bu bilgiler doğrultusunda mühendisler yapıların tasarımını ve çalışma noktasını optimize ederek daha sağlıklı bir hale getirebilmektedir. Sönüm oranı çok düşük ve kritik seviyede olan rezonans frekanslarında, çok ufak bir kuvvetle dahil uyarılsa çok yüksek şekilde titreşim tepkisi verebilmektedir. Genellikle uçak kanatları, türbin kanatları, otomobillerin şase altyapılarında modal analiz yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. (Gjelstrup, 2021)

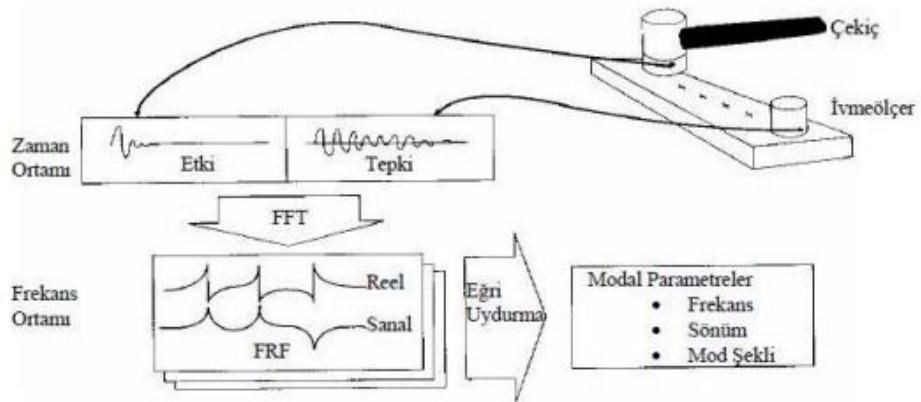
Modal Test için gerekli olan ekipmanlar;

- Darbe çekici veya modal sarsıcı
- Uyarı olarak verilen kuvveti ölçmede kullanılan kuvvet sensörü
- Uyarı sonucu oluşan ivme değerini ölçmede kullanılan ivmeölçer
- Test boyunca data kaydetmek ve bu dataları işlemek için Veri Toplama Sistemi
- Modal test ve analizi gerçekleştirebileceğimiz bilgisayar ve yazılım programı



Şekil 2.11. Bir plakanın doğal frekanslardaki mod şekilleri (Gjelstrup, 2021)

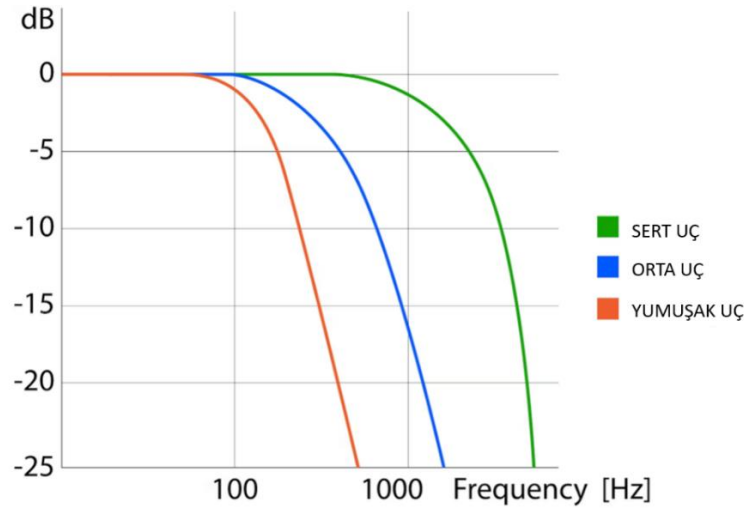
Deneysel modal testi uygulamanın birçok farklı yöntemi mevcuttur. Bunlardan en yaygın olanları tek referanslı ivmeölçer ile çekiç gezdirme yöntemi, tek referanslı çekiç ile ivmeölçer gezdirme yöntemi, tek referanslı sarsıcı yöntemidir. Ayrıca bu yöntemlerin aynı şekilde çoklu yöntemleri de mevcuttur. Bu gibi durumlar da birden fazla ivmeölçer ve birden fazla sarsıcı kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında tek referanslı ivmeölçer ile çekiç gezdirme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, ivmeölçer test yapısı üzerinde belli bir düğüm noktasında sabitlendikten sonra diğer düğüm noktaları sırasıyla modal çekiç ile uyarılarak test gerçekleştirilir. Modal testlerde elde edilmesi beklenen fonksiyon Frekans Cevap Fonksiyonudur (FCF). FCF çıkıştaki ivme genliği değeri büyüklüğünün girişte uyarı olarak verilen kuvvet değerine oranı ile hesaplanmaktadır.



Şekil 2.12. Deneysel modal analiz genel akış gösterimi (Şekerci, 2013)

Modal testler yapılırken testin doğruluğunu arttırmak amacıyla test esnasında alınan ölçüm sayısı arttırılabilir. Çünkü bütün ölçümler bir şekilde sisteme ait olmayan gürültü içermektedir. Gürültü gerek uygulamada kullanılan sensörlerden gerek bu sensörlere ait kablolardan ve bazı durumlarda diğer harici etkenlerden kaynaklanmaktadır. Bu gürültüler minimize edildiği durumlarda elde edilen test sonuçları doğru olacaktır. Tek referanslı ivmeölçer ile çekiç gezdirme yönteminde her bir referans düğüm noktası için ortalama 5-10 arası ölçüm yeterlidir. Bu durum testin doğrulunu ve kalitesini arttıracaktır

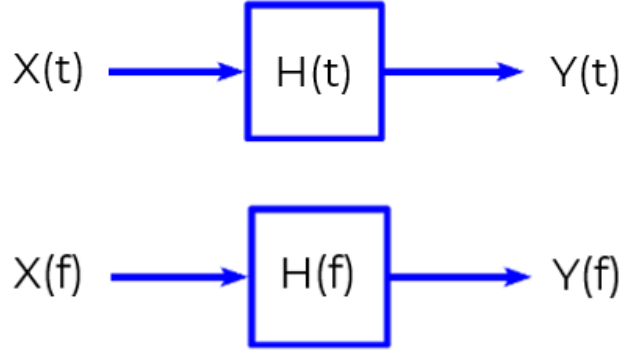
Ayrıca darbe çekiç yöntemiyle gerçekleştirilen testlerde darbe çekicinin tipi ve çekicinin ucunda uyarıcı sağlayan çekiç ucu da oldukça önemlidir. Yapının test esnasında tahrik edilmesi için gereken kuvvet fazla ise daha büyük modal çekiçler tercih edilmelidir. Darbe çekici boyutsal olarak büyüdüğü durumda ölçüm aralığı artacaktır fakat hassasiyeti azalacaktır. Bu sebeple çekiç yöntemiyle olan modal analizler küçük yapılar için daha verimlidir. Sert çekiç ucu yüksek frekans ölçüm aralığı sağlamaktadır. Yumuşak çekiç ucu ise daha düşük frekans ölçüm aralığı sağlayacaktır. Test esnasında çekiç ile vurulurken bir ölçüm aralığı tamamlanmadan diğer ölçüm alındığı durumlar olabilmektedir. Bu istenmeyen durum çift vuruş olarak isimlendirilmektedir ve test esnasında hataya sebep olmaktadır.



Şekil 2.13. Çekiç ucu frekans bandı aralığı (Gjelstrup, 2021)

2.3.1 Frekans Cevap Fonksiyonu

FCF temel ifadeyle çıktı olarak elde edilen büyüklüğün girdi olarak verilen uyarı büyüklüğüne olan matematiksel oranıdır. Modal testlerde iki düğüm noktası arasındaki frekans cevap fonksiyonu ölçülmektedir. Belirli bir düğüm noktasına bir ivmeölçer takılarak ve yapıyı başka bir düğüm noktasından kuvvet ölçümü alınan çekiçle tahrik ettiğimiz durumda, sistemin bu uyarı kuvvetine cevap vermesi beklenmektedir. Sistemin yanıt ivmesini ve uyarı kuvvetini ölçerek elde edilen fonksiyon modal testlerdeki FCF olacaktır. Modal Testlerde elde edilen FCF'lerin büyüklüğü g/N olarak ifade edilmektedir. FCF şekil 2.11'de gösterildiği gibi tanımlandıktan sonra denklem 2.1' deki gibi gösterilmektedir. $H(f)$ frekans cevap fonksiyonunu, $Y(f)$ sistemin frekans alanındaki çıktı sinyalini, $X(f)$ ise sistemin frekans alanındaki girdisini göstermektedir. Modal analizlerde FCF genellikle tek giriş ve tek çıkış analizlerinde, $H1$ ve $H2$ fonksiyonlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu iki fonksiyonun dışında FCF'leri hesaplamak için başka yöntemlerde mevcuttur fakat en yaygın olan yöntem $H1$ ve $H2$ yöntemidir.



Şekil 2.14. Zaman ve frekans alanında transfer fonksiyonu gösterimi

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (2.1)$$

$H1$ denklem 2.2'de gösterildiği gibi, fonksiyonun girişte gürültü sinyallerinin yok denecek kadar az olduğu ve gürültünün çıkış sinyallerinden kaynaklandığı varsayımına dayanır.

$$H1(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (2.2)$$

H2 ise denklem 2.3’de gösterildiği gibi, gürültünün çıkış sinyallerinden ziyade giriş sinyallerinden kaynaklandığına dayanır.

$$H2(f) = \frac{S_{yy}(f)}{S_{yx}(f)} \quad (2.3)$$

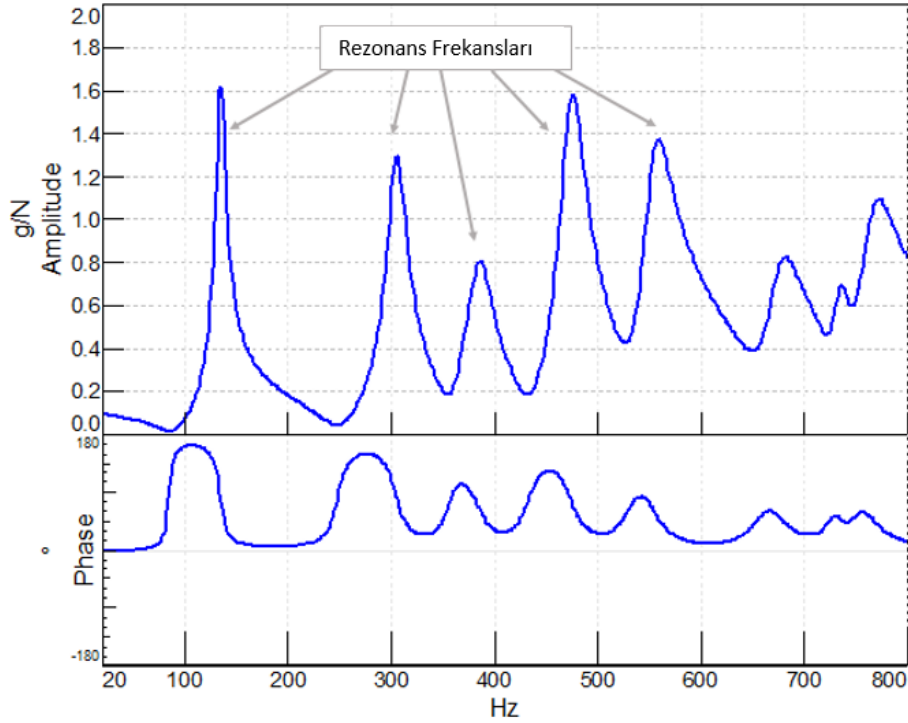
Formülde görüldüğü gibi H1(f) frekans cevap fonksiyonudur, $S_{xy}(f)$ ise X(t) ve Y(t)’nin frekans alanındaki çapraz spektral yoğunluğudur. $S_{xx}(f)$ ise X(t)’nin frekans alanındaki oto spektral yoğunluğudur.

$$H1(f) = \frac{\text{Giriş ve çıkış sinyalinin çapraz spektral yoğunluğu}}{\text{Giriş sinyalinin oto spektral yoğunluğu}} \quad (2.4)$$

Aşağıdaki formülde görüldüğü gibi H2(f) frekans cevap fonksiyonudur, $S_{yx}(f)$ ise X(t) ve Y(t)’nin frekans alanındaki çapraz spektral yoğunluğudur. $S_{yy}(f)$ ise Y(t)’nin frekans alanındaki oto spektral yoğunluğudur.

$$H2(f) = \frac{\text{Çıkış sinyalinin oto spektral yoğunluğu}}{\text{Giriş ve çıkış sinyalinin çapraz spektral yoğunluğu}} \quad (2.5)$$

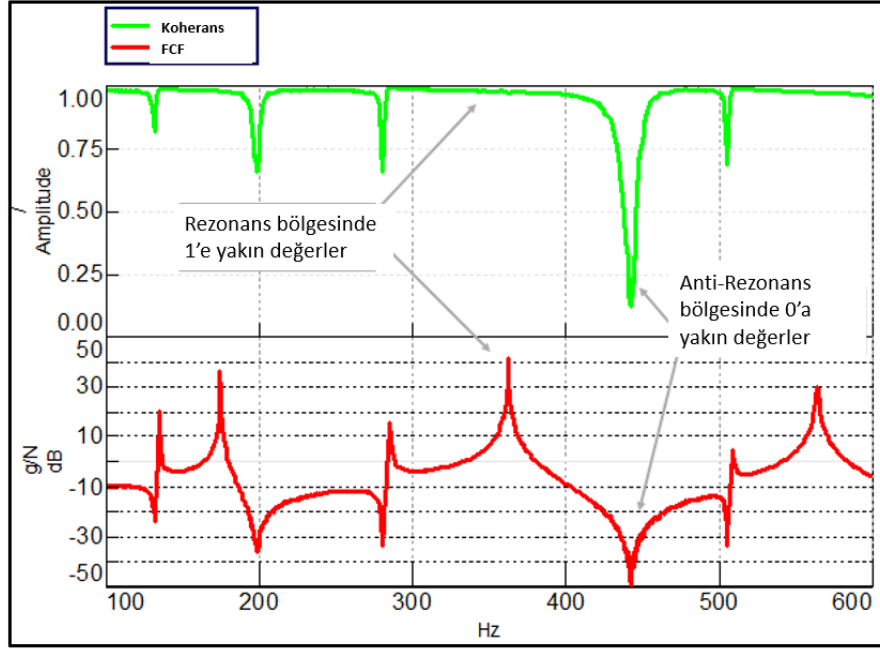
FCF hesaplanırken sistemin zamana bağlı değişken olmadığı ve lineer olduğu varsayılmaktadır. Zaman alanında toplanan datalar frekans alanına dönüştürülüp FCF’ler elde edildikten sonra, genellikle 2 eksenli grafikler elde edilir. Sistemin faz açısını ve genliğini gösteren bu grafiklerden sistem hakkında çeşitli bilgiler elde edilmektedir. Örneğin X ekseninde frekans Y ekseninde ise fonksiyonun genliğinin gösterildiği bu grafikler sistemin rezonans ve anti-rezonans bölgeleri hakkında bize bilgi vermektedir. Grafiğin pik yaptığı noktalar rezonans ve eksi yönde pik yaptığı noktalar ise anti-rezonans bölgesine işaret etmektedir. Ayrıca grafiklerden sistemin sönüm oranı ve mod şekli gibi diğer modal parametreleri de elde edilmektedir. Rezonans bölgesinde pikin geniş olması sistemin ağır sönüm oranına sahip olduğunu göstermektedir. Sadece FCF grafiğini göz önünde bulundurarak ve pik yaptığı noktalara rezonans bölgesi demek doğru bir yaklaşım değildir. Bu sebeple başka parametreleri de göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Doğru bir sonuca varmak için transfer fonksiyonundan elde edilen faz grafiğinin de incelenmesi gerekmektedir çünkü rezonans olan bölgelerde faz açısı yaklaşık 90° civarında dönmektedir. Bu koşul sağlanıyorsa burada daha belirgin ve net bir rezonans bölgesi olabilir.



Şekil 2.15. Transfer fonksiyon genlik ve faz grafiği (Anonim, 2020a)

2.3.2 Koherans

Modal analizlerde testin doğruluğuna dair bilgi elde ettiğimiz diğer bir parametre ise koherans olarak adlandırılmaktadır. Koherans çıkış spektrumu ile giriş spektrumu arasındaki korelasyona dair bilgi vermektedir. Sistemdeki enerji transferinin kalitesini belirlemektedir. Modal testlerde ise koherans sisteme uyarı olarak verilen kuvvetin ne kadarının çıkışta titreşim enerjisine dönüştüğünü göstermektedir. Koherans 0 ile 1 arasında değer almaktadır ve 1'e yakın olduğu bölgelerde test esnasında ilgili düğüm noktasında sisteme verilen enerjinin çıkışta direk titreşim enerjisine dönüştüğü, gürültü veya sızıntının düşük olduğunu göstermektedir. Rezonans bölgelerini belirlerken koheransın 1 değerine yakın olup olmadığı kontrol edilir. Eğer koherans yaklaşık 0.90 – 1 arasında ise bu bölge rezonans bölgesidir eğer daha düşük bir değer ise rezonans bölgesi değildir. Bu gibi durumlarda çekiç ucu değiştirilebilir, vuruş sayısı artırılabilir ya da bu bölge için test tekrarlanabilir.



Şekil 2.16. Rezonans, anti-rezonans ve koherans gösterimi (Anonim, 2020a)

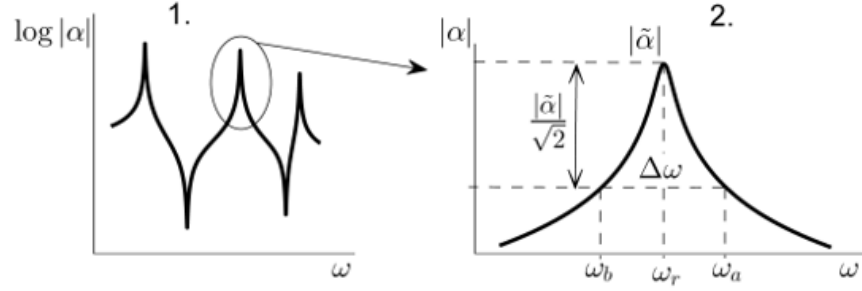
2.3.3 Tepe Yakalama Yöntemi

Diğer ismiyle “Yarım Güç Metodu” olan bu yöntem, tek serbestlik dereceli sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. FCF elde edildikten sonra sistemin sönüm oranını hesaplamak için kullanılmaktadır. Uygulaması oldukça basit olan bu yöntemi sınırlayan bazı durumlar vardır. Örneğin tepe yakalamanın uygulanacağı pik değerinin belirgin ayrık modlara sahip olması gerekmektedir. Fakat sistemin salınım yapmadan kendini sönmülemeye çalıştığı ağır sönümlü durumlarda, cevap çıktısı rezonans bölgesinden çok fazla etkileneceği için doğru bir sonuç almak zorlaşacaktır. İşlem olarak sistemin r. noktadaki sönüm oranı için:

Öncelikle FCF'in pik yaptığı frekans değeri doğal frekans olarak belirlenir. Doğal frekansa karşılık gelen sönüm oranı, doğal frekans noktasındaki FCF'in genliğinin $\sqrt{2}$ ye bölünmesine karşılık gelen genlik değerinin hesaplanmasıyla elde edilir. Bu genlik değeri hesaplandıktan sonra doğal frekanstan önce ve sonra bu genlik değerine denk gelen sistemin frekans değerleri (ω_a, ω_b) bulunur.

$$\omega_a, \omega_b = \frac{\alpha_{max}}{\sqrt{2}} \quad 2.6$$

$$\zeta_n = \frac{1}{2} \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{\omega_r^2} \cong \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad 2.7$$



Şekil 2.17. Tepe tutma yöntemi gösterimi (Ondra, 2013)

2.3.4 Modal Güvence Matrisi (MGM)

Modal Güvence Matrisi (MGM) modal analiz doğrulama ve karşılaştırmada kullanılan parametredir. Doğal frekans bölgesinde yapının yapmış olduğunu mod şeklinin bir diğer mod şekli ile karşılaştırılması ile gerçekleştirilir. MGM her bir düğüm noktasındaki hareketin vektörel olarak karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Genellikle fiziksel olarak yapılan modal analiz sonuçlarıyla bilgisayar ortamında simülasyon ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. MGM sayısal olarak 0 ile 1 değer almaktadır. Değerin yüksek olması karşılaştırılan mod şekillerinin birbiri ile benzer olduğunu göstermektedir. Değerin 0'a yakın olduğu durumlarda ise karşılaştırılan mod şekillerinin birbirinden oldukça uzak olduğu anlaşılmalıdır. Genelde MGM değerinin 0.8' den olduğu durumlarda karşılaştırılan mod şekillerinin birbiri ile iyi korelasyon içerisinde olduğu kabul edilmektedir. Aşağıda MGM denklemi gösterilmiştir, denklemde t vektörün transpozisini, * ise karmaşık eşleniğini göstermektedir.

$$\text{MGM} (\{\Phi\}_{test}, \{\Phi\}_{analiz}) = \frac{|\{\Phi\}_{test}^{*t} \{\Phi\}_{analiz}|^2}{(\{\Phi\}_{test}^{*t} \{\Phi\}_{test})(\{\Phi\}_{analiz}^{*t} \{\Phi\}_{analiz})} \quad 2.8$$

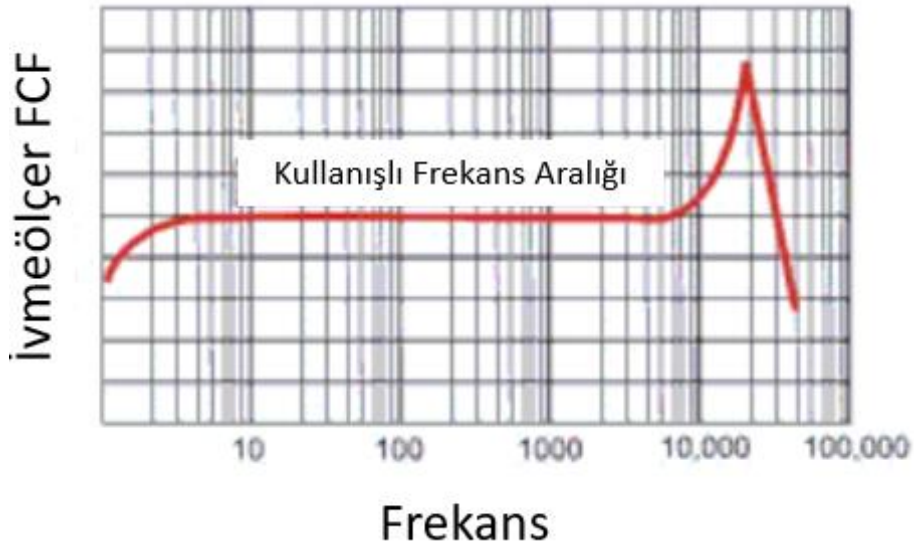
2.4 İvmeölçer

İvmeölçer makine ve yapılarıdaki titreşim ve şok sinyallerini ölçmek için kullanılan sensördür. İvmeölçerler genelde fiziksel büyüklük olarak ivme çıktısı verirler. Aynı zamanda ivme büyüklüğünün yanı sıra tek integral ile hız, çift integral ile yer değiştirme büyüklüğü elde edilebilir. İvmeölçerler ivmeye maruz kaldıklarında içindeki kütle yer değiştirir. Bu yer değiştirme ölçülerek ilgili fiziksel büyüklüklere çevrilir.

Çok farklı tip ivmeölçer çeşidi olmasına karşılık ivmeölçerler statik ve dinamik olmak üzere iki tiptir. Dinamik ivmeölçer sadece dinamik ivmeleri ölçerler. Statik ivmeölçer hem statik hem de dinamik ivmeleri ölçerler. Dinamik ivmeölçerlere IEPE (Integrated Electronics PiezoElectric) ve Yük tipi ivmeölçerler örnek olarak verilebilir. Statik ivmeölçere ise MEMS, Piezoresistive, Kapasitif örnek olarak verilebilir. Genel olarak uygulamalarda dinamik ivmeölçer kullanılmaktadır. IEPE ile yük tipi dinamik ivmeölçer arasındaki en önemli fark çıkış büyüklükleri ve çalışma sıcaklık aralıklarıdır. IEPE tipi ivmeölçer çıktı olarak voltaj çıktısı verirler, yük tipi ivmeölçer çıktı olarak elektriksel yük çıktısı verirler. Ayrıca IEPE tipi ivmeölçer içerlerindeki bulundukları entegre elektronik devreden dolayı yüksek sıcaklıklarda çalışmaya elverişli değildirler bu sebeple yüksek sıcaklık altındaki çalışma koşullarında yük tipi ivmeölçerler kullanılmaktadır. Yük ve IEPE tipi ivmeölçerin aynı anda kullanıldığı durumlarda yük-voltaj dönüştürücüler sayesinde yük tipi ivmeölçer IEPE tipi olarak kullanılabilir. Bu durumda iki tip ivmeölçerde aynı sinyal koşullandırıcı veya veri toplama sistemine bağlanabilmektedir.

Piezoelektrik sensörler genellikle sismik kütle ve piezoelektrik malzeme olmak üzere iki çeşit bileşenden oluşmaktadır. IEPE tipi ivmeölçer içerisindeki piezoelektrik malzeme genellikle piezoseramik ya da kuartz tipi malzemedir. Piezoelektrik malzeme kuvvete maruz kaldığı durumda uygulanan kuvvete karşılık yük çıktısı oluşturur. Sensör içerisindeki piezoelektrik malzemenin bir ucu sensör tabanındaki zemine bağlıdır. Sismik kütle ise diğer tarafa bağlıdır. Uygulanan kuvvet neticesinde ivmeölçer titreşime maruz kaldığında, sistem içerisinde piezoelektrik malzemeye etki eden bir kuvvet üretilir. Newton hareket yasasına göre üretilen bu kuvvet sensör içerisindeki sismik kütle ile ivmenin çarpımına eşittir.

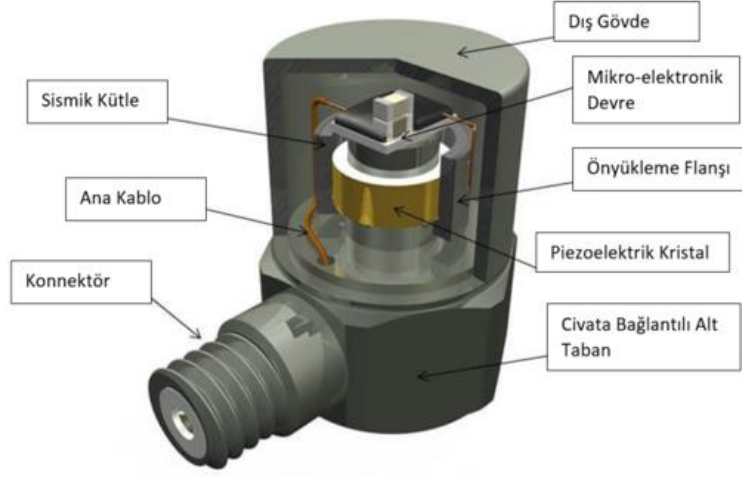
Piezoelektrik etki ile uygulanan kuvvetle orantılı bir yük çıkışı üretilir. Sismik kütlenin sabit oluşu, yük çıkış sinyalinin ivmeyle orantılı olmasını sağlamaktadır. Piezoelektrik element elektrodlar vasıtasıyla sensörün soketine bağlanmıştır. İçerisinde bulundurduğu devre ile voltaj çıktısı vermektedir. Voltaja çevrilen ivme çıktısı uzun kablolar vasıtasıyla kayıp ve gürültü olmadan taşınabilmektedir. Bu şekildeki bir sensör kütle-yay gibi özellik gösterecektir. Her yapının olduğu gibi sensöründe rezonans frekansı olacaktır bu sebeple kullanılabilir bant genişliğini belirleyen en önemli etken rezonans noktası olacaktır. Bu sebeple rezonans noktasını arttırmak kullanılabilir bant genişliğini arttıracaktır buda sismik kütlenin azaltılmasıyla mümkün olmaktadır. Sismik kütlenin azalması da sensörün hassasiyetinin azalmasına sebep olacaktır. (Weber 2017)



Şekil 2.18. İvmeölçer frekans kullanım alanı

İvmeölçerler kuvvete maruz kaldıkları durumda yüksek empedanslı yük çıktısı oluştururlar. IEPE tipi ivmeölçerler içerlerinde ilave olarak barındırdıkları entegre elektronik devresi vasıtasıyla yüksek empedansı düşük empedansa çevirirler. Bu durum kablo uzunluğundan bağımsız olarak ivmeölçere sabit bir hassasiyet değeri sağlar. IEPE tipi ivmeölçerlerin hassasiyet değerleri mV/g ile ölçülmektedir.

IEPE sensör içerisindeki elektronik devre sabit DC akımla harici bir güç kaynağı ya da VTS tarafından beslenmektedir. 2 ile 20 mA arasında değişen bu sabit akım değerinin optimum noktası 4mA seviyesidir. Besleme voltajı ise genellikle 18-30 VDC arasındadır.

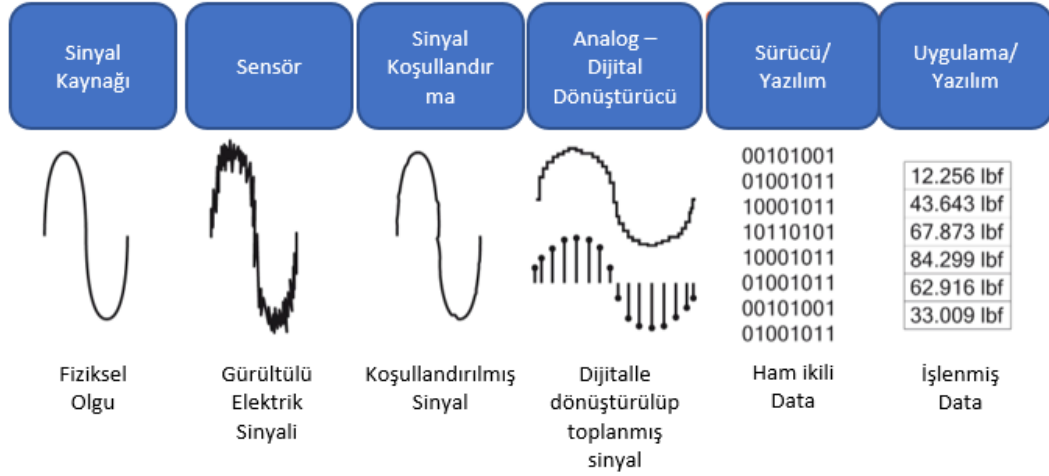


Şekil 2.19. IEPE tipi ivmeölçer iç yapısı (Anonim, 2020b)

2.5 Veri Toplama Sistemi

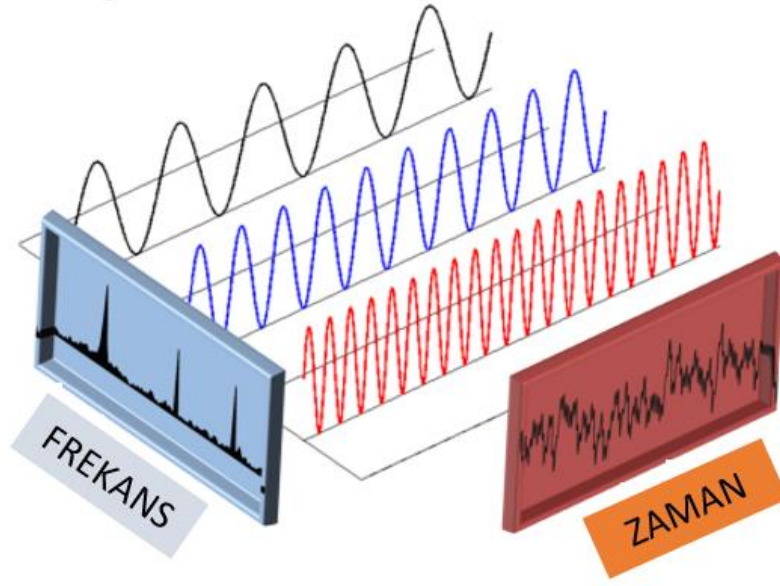
Modal Test yaparken kullanılan bir diğer ekipman ise Veri toplama sistemidir. Veri Toplama Sistemi (VTS) veya Sinyal Analizörü, fiziksel büyüklükleri (sıcaklık, kuvvet, ivme, basınç vb.) len bu sinyalleri belirli aralıklarla toplayıp örnekleyen ve bu verileri bir bilgisayar yazılımı tarafından anlaşılabilir formata dönüştüren elektronik cihazlara denir. Bir veri toplama sisteminin birincil amacı, verileri elde etmek ve depolamaktır. Ancak, verilerin gerçek zamanlı ve kayıt sonrası görselleştirilmesini ve analizini sağlamayı da amaçlarlar. Ayrıca, çoğu veri toplama sistemi kendi içerisinde yazılım ortamında birçok analitik analiz ve rapor oluşturma yeteneklerine sahiptir. (Smith, 2022)

VTS sistemleri tek başına kullanılabilir cihazlar değildirler bu sebeple kapalı çevrim diyebileceğimiz bir döngü içerisinde çalışırlar. Sensörler maruz kaldıkları fiziksel büyüklükler sonucunda ürettikleri voltaj çıktılarını VTS cihazına iletirler fakat iletilen bu sinyaller ham yani işlenmemiş sinyallerdir. Bu sinyaller bilgisayar ortamına doğruca aktarılıp analitik işlemler için kullanılmazlar çünkü bu sinyaller zayıf sinyaller ile birlikte gürültü içerirler. Zayıf sinyallerin gclendirilmesi ve gürültünün filtrelenmesi için VTS amplifikasyon ve filtre devreleri içerir. Devrelerde koşullandırılmış olan bu analog sinyaller dijital olarak bilgisayar ortamına aktarılmalıdır ve yine bu işlem VTS içerisindeki analog-dijital sinyal dönüştürücü tarafından gerçekleştirilir.



Şekil 2.20. Analog sinyali dijitale dönüştürme süreci

VTS sistemi tarafından kullanıma hazır hale getirilen dijital datalar bilgisayar ortamına zaman alanında aktarılır. Mühendislik uygulamalarının çoğunda zaman alanından toplanan datalar, zaman alanında incelenmekten ziyade frekans alanında incelenmektedir. Zaman alanında elde edilen tüm fiziksel çıktıları frekans alanına çevirmek incelenen fiziksel büyüklük hakkında çok daha fazla bilgi verecektir. VTS ile birlikte kullanılan bilgisayar yazılımları bu işlemi matematiksel Fast Fourier Transform (FFT) ile gerçekleştirirler. Fourier'e göre herhangi bir periyodik fonksiyon, sinüs ve kosinüs dalgalarının toplam veya fark serisi olarak ifade edilebilir. Bu matematiksel dönüşüm dijital sinyal işleme, veri toplama, veri işleme, ses ve gürültü ölçümü, şok ve titreşim ölçümü gibi birçok alanda çok yaygın olarak kullanılmaktadır. FFT analizi kullanarak sinyal karakteristiklerini incelemek elde edilen sinyalleri çok daha detaylı incelemeyi mümkün kılar.



Şekil 2.21. Periyodik sinyalin FFT görünümü (Kalhara vd., 2017)

Fourier Transform açılımı yapılacak olursa 2.6'daki denklem elde edilir.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \quad 2.6$$

Burada, a_0 , a_n ve b_n ifadeleri Fourier katsayılarıdır ve aşağıdaki denklemlerden bulunurlar.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad 2.7$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad 2.8$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad 2.9$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan sensör, cihaz, makine ve yazılımlar bu bölümde tanıtılmıştır.

3.1 FDM 3B Yazıcı Makinesi

Bu tez kapsamında çekme numuneleri ve test plakaları Stratasys® firmasının Fortus 400mc modeli ile üretilmiştir. Profesyonel sanayide kullanılan bir 3B yazıcı tipidir. Fortus 400mc'ye ait görsel Şekil 3.1'de teknik özellikler ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.



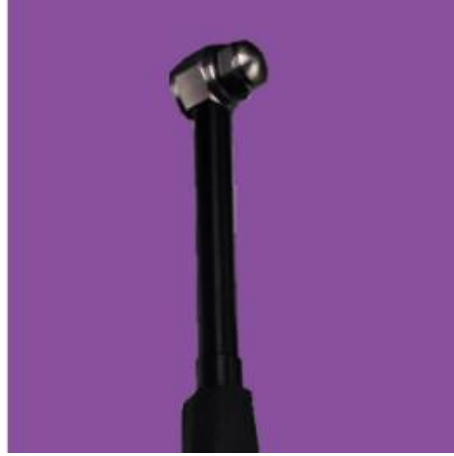
Şekil 3.1. Fortus 400mc 3B FDM yazıcı (Anonim, 2015a)

Çizelge 3.1. Fortus 400mc 3B FDM yazıcı teknik özellikler

Malzemeler	ABS-M30, ABS-M30i, ABSi, ABS-ESD7, PC-ABS, PC-ISO, PC, ULTEM 9085, PPSF/PPSU
Destek Malzemeler	Çözünebilir Destek Malzemeleri:
	ABS-M30, ABS-M30i, ABSi, ABS-ESD7, PC-ABS
	Kırmalı Destek Malzemeleri: PC, PC-ISO, ULTEM 9085 ve PPSF/PPSU
Çalışma Hacmi	355 x 254 x 254 mm (14 x 10 x 10 in.)
Malzeme Çeşitleri	1 Ana Malzeme Bölmesi
	1 Destek Malzeme Bölmesi
Hassasiyet	+/- .127 mm (+/- .005 in.)
Katman Kalınlığı	0,330 mm (0.013 in.)
	0,254 mm (0.010 in.)
	0,178 mm (0.007 in.)
	0,127 mm (0.005 in.)
Güç Gereksinimi	230 VAC, 50/60 Hz, 3 faz, 16A/faz

3.2 Modal Çekiç

Çalışma kapsamında DJB® markasının IH-01 modal çekiçi kullanılmıştır. Genel amacıyla yapısal doğrulama, rezonans belirleme ve modal analiz testlerinde kullanılmaktadır. Sensör kendi içerisinde voltaj çıktısı veren bir IEPE tipi kuvvet sensörü içermektedir. Farklı uç opsiyonlarıyla geniş frekans bant aralığında test imkânı sunmaktadır. Modal darbe çekiçine ait görsel Şekil 3.2’de teknik özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir. (Anonim, 2017)



Şekil 3.2. DJB Instrument IH-01 model modal çekiç (Anonim, 2017)

Çizelge 3.2. DJB Instrument IH-01 modal çekiç teknik özellikleri

Hassasiyet	25mV/N
Çekiç ucu ağırlığı	28gr
Çekiç ucu çapı	18mm
Çekiç uzunluğu	250mm
Kablo çıkış bağlantısı	BNC
Çekiç ucu tipleri	Yumuşak, orta, sert ve alüminyum
Son kalibrasyon hassasiyet	16,6 mV/N

3.3 İvmeölçer

Çalışma kapsamında DYTRAN® markasının 100mV/g hassasiyete sahip tek eksen IEPE tipi ivmeölçeri kullanılmıştır. Yüksek hassasiyete sahip olması sebebiyle tercih edilmiştir. Şekil 3.3’de ivmeölçere ait resim ve Çizelge 3.3’de ivmeölçere ait teknik özellikler verilmiştir.



Şekil 3.3. Dytran 3055D2 ivmeölçer (Anonim, 2019)

Çizelge 3.3. Dytran 3055D2 teknik özellikleri

Ağırlık	10 gr.
Bağlantı konektörü	10-32 konektör
Ana gövde malzeme	Titanyum
Algılayıcı element	Seramik
Element tipi	Düzlemsel kayma
Hassasiyet	100mV/g
Maksimum İvme	50 g
Frekans Genişliği	0,54 – 10 000 Hz
Rezonans frekansı	>36 kHz
Çalışma sıcaklığı aralığı	-55°C ile +107°C
Besleme akımı aralığı	2-20 mA

3.4 Çekme Cihazı

Çekme testleri INSTRON® markasının 34TM-50 serisi çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. İlgili cihaza ait görsel Şekil 3.4’de ve teknik özellikler Çizelge 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. INSTRON 34TM-50 çekme cihazı (Anonim, 2018)

Çizelge 3.4. INSTRON 34TM-50 model çekme cihazı

Kuvvet	50kN
Mengene oynama mesafesi	1128mm
Maksimum hız	508mm/dakika
Minimum hız	0,05mm/dakika
Maksimum dönüş hızı	508mm/dakika
Pozisyon kontrol çözünürlüğü	24.1 nm
Maksimum güç ihtiyacı	1000 VA
Çalışma sıcaklığı	+5°C ile +40°C arası
Çalışma nem aralığı	10% ile 90% arası
Yer değiştirme doğruluğu	±0.02 mm
Yük ölçüm doğruluğu	±0.5%
Data toplama hızı	1kHz’e kadar

3.5 Veri Toplama Sistemi



Şekil 3.5 DEWESoft SIRIUS 16 kanallı veri toplama cihazı (Anonim, 2015b)

Çizelge 3.5. DEWESoft SIRIUS 16 kanallı veri toplama cihazı özellikleri

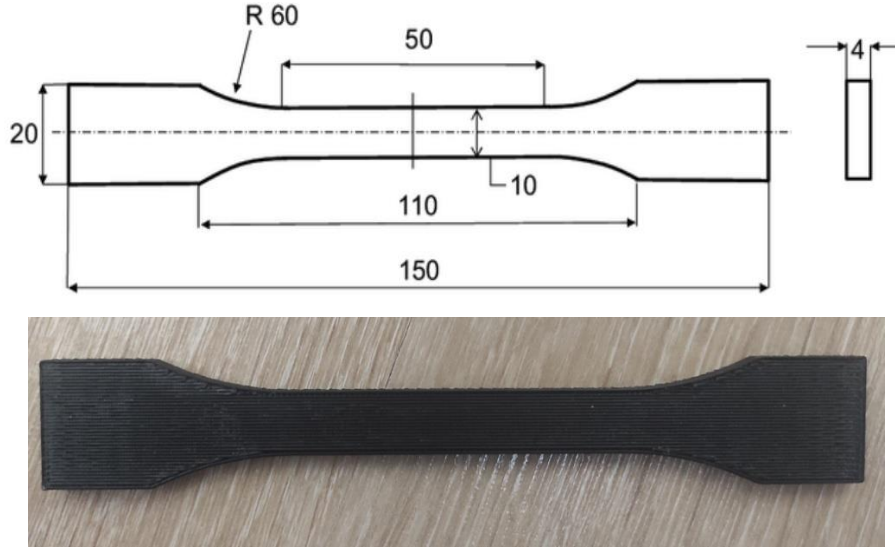
Giriş Tipi	Yarım, Tam, Çeyrek Voltaj tipi Köprü tipi Uzama
Analog dijital dönüştürücü tipi	24 bit delta sigma aliasing filtreli
Örnekleme frekansı	200 kS/saniye
Ölçüm aralıkları	10V,1V,100mV,10mV
Giriş Empedansı	10 M Ω
Evrensel analog girişler	RTD, akım, direnç, DSI adaptörleri, IEPE, termokupllar
Uyarma gerilimi	0-12VDC, maksimum 44mA
TEDS	9 pinli DSUB adaptörlerle
Kazanım lineerliği	<0.02 %
Kanal çapraz haberleşme	-120 dB @ 10 kHz
Girdi bağlaşımı	DC
Giriş Empedansı	10 M Ω
Maksimum Voltaj	\pm 12 V

3.6 Kullanılan Yazılımlar

Çekme numuneleri ve plakalar CATIA V5R21 3B tasarım programı ile oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemiyle modal analiz simülasyonları AnsysWB® 2020R2 programıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel modal analiz testleri DEWESoft® üzerinden gerçekleştirilmiştir. Modal analiz simülasyonlarıyla, deneysel modal analiz sonuçları 3.parti yazılım olan MEScope® ile karşılaştırılmıştır ve MGM sonuçları elde edilmiştir.

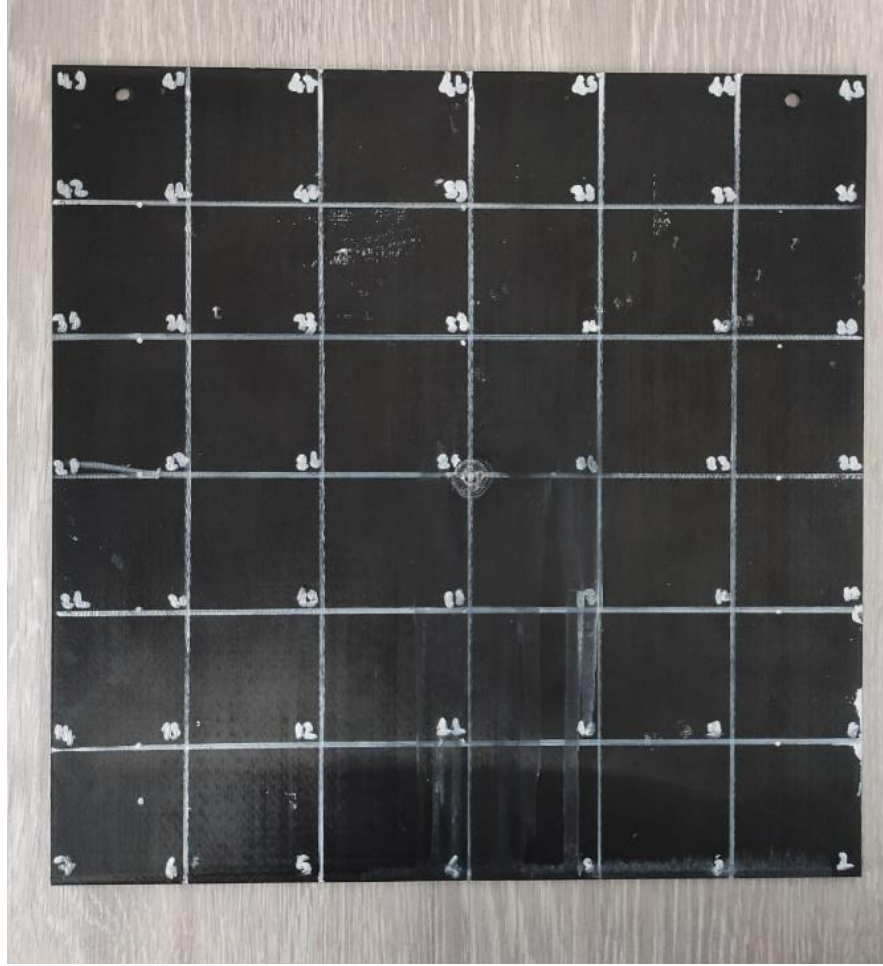
3.7 Test Numuneleri

Sonlu elemanlar yöntemiyle modal analiz simülasyonu gerçekleştirmek için malzemenin elastisite modülünün tanımlanması gerekmektedir. Elastisite modülü çekme testi yaparken hesaplanmaktadır. Çekme testi numuneleri ISO 527-2 1B standardına göre üretilmiştir. Her farklı katman kalınlığından an az 7 adet numune üretilmiştir. Üretilen numuneler çekme testine tabi tutulmuş ve test sonrasında uygun olan numunelerin elastisite modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler modal simülasyonlarda kullanılmakla birlikte dolaylı olarak deneysel modal testin doğrulanmasında da kullanılmıştır.



Şekil 3.6. ISO 527-2 1B standardına göre çekme numunesi

Deneysel modal testler 300mmx300mmx3mm olan plakalar ile gerçekleştirilmiştir. Plakalar test öncesinde düğüm noktalarını belirlemek için 36 parçaya ve 49 düğüm noktasına ayrılmıştır. (Şekil 3.7)



Şekil 3.7. Eşit parçalara bölünmüş test plakaları

Plakaların üretim parametreleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. FDM plaka yazdırma parametreleri

Parametre	Parametre Set Değeri
Nozul Sıcaklığı	260 °C
Tabla Sıcaklığı	90 °C
Yazdırma Hızı	50mm/s
Katman Kalınlığı	0,127- 0,178-0,254 mm

4. BULGULAR

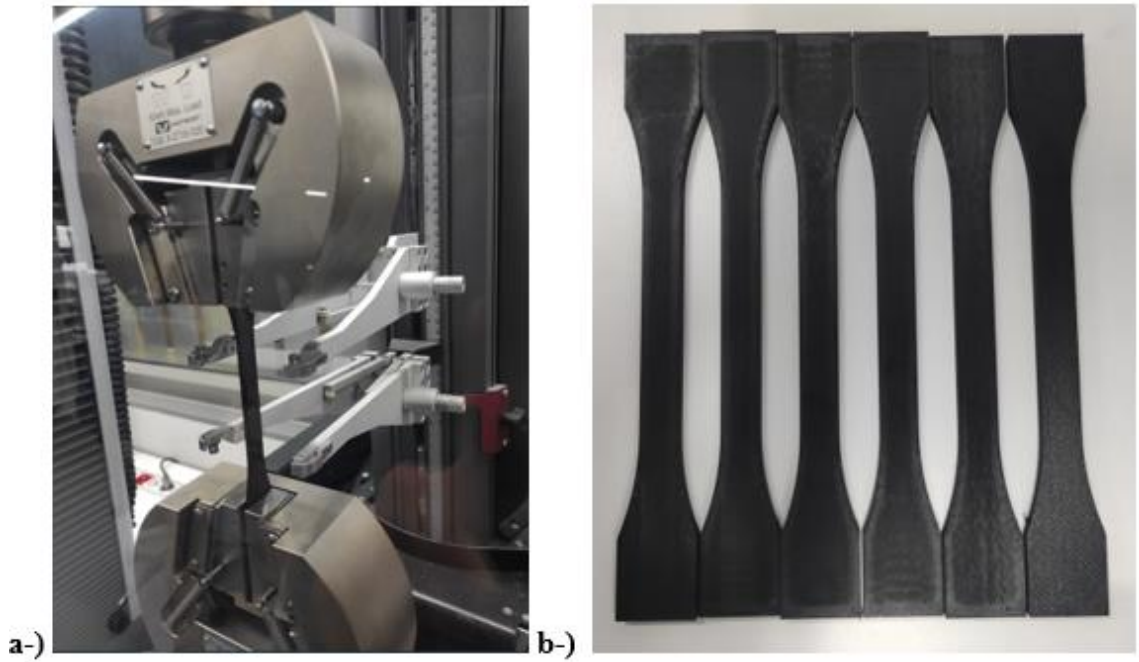
Test plakalarının elastisite modülünü belirleyebilmek için çekme numuneleri üretilmiş, çekme testi yapılmış ve edilen sonuçlar bilgisayar ortamında modal analiz simülasyonunda kullanılmıştır. Daha sonra plakaların deneysel modal analizleri yapılmış, sonuçları bilgisayar ortamındaki modal analiz simülasyonları ile karşılaştırılmış ve modal güvence matrisleri elde edilmiştir. FDM üretim, çekme testleri, deneysel modal analiz ve modal analiz simülasyon süreçleri aşağıdaki sırayla yapılmıştır;

1. Test plakaları FDM makinesinde, tüm parametreler sabit tutularak ve yalnızca katman kalınlığı değiştirilerek 0,127mm, 0, 178mm, 0,254mm katman kalınlıklarıyla üretilmiştir.
2. Farklı katman kalınlıklarına sahip olan bu plakaların mekanik özellikleri de farklı olacağından dolayı mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi adına çekme testleri için ISO 527-B standardına uygun çekme numuneleri üretilmiştir.
3. Numunelerin yine aynı standarda göre çekme testi yapılmış ve elastisite modülleri elde edilmiştir.
4. Katman kalınlığının farklı olmasından dolayı üretilen plakaların yoğunlukları da farklı olacaktır bu sebeple plakaların ağırlıkları ölçülüp yoğunlukları hesaplanmıştır.
5. Testlerden elde edilen elastisite modülleri ile yoğunluklar ANSYS WB® yazılımına girilmiş ve bilgisayar ortamında modal analiz simülasyonları yapılmıştır. Yapılan bu modal simülasyonlar neticesinde plakalara ait doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri belirlenmiştir.
6. Deneysel modal analizleri tamamlamak için deneysel modal testlerin tamamlanması gerekmektedir. Testler yapılmadan önce plakalar her iki köşesinden eşit 7 parçaya hayali olarak ayrılmış ve bu parçaların birleştirilmesi sonucunda 49 adet düğüm noktası oluşturulmuştur.
7. Her bir düğüm noktası 1'den 49'a kadar numaralandırılmıştır. Daha sonra plakalar serbest serbest koşullarını sağlayabilmek için köşelerden ufak delinerek elastik bant ile asılmıştır.

8. Test öncesinde plakanın geometrisi DEWESoft® yazılımında çizilmiş ve 49 eş parçaya bölünerek düğüm noktaları oluşturulmuştur. Bu sayede test esnasında ve sonrasında verilen uyartı kuvvetlerine karşılık gelen çıktılar ve hareket şekilleri görselleştirilmiştir.
9. Cevap çıktılarını alabilmek için ivmeölçer 25.düğüm noktasına hızlı yapıştırıcı ile montajlanmış ve test esnasında elektriksel gürültüyü minimize etmek için sensör kablosu bant ile kademeli sabitlenmiştir.
10. Deneysel modal testler çekiç gezdirme yöntemiyle 1.düğüm noktasından başlanarak 49.düğüm noktasına kadar her bir düğüm noktası için ortalama 5 vuruş ile tamamlanmıştır. Her bir vuruş sonrası ivme değerleri ve koheranslar kontrol edilmiş, maksimum test doğruluğunun elde edilmesi amaçlanmıştır.
11. Modal testler tamamlandıktan sonra her bir düğüm noktası için FCF sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra MEScope® yazılımında bir araya getirilen bu sonuçlar tüm plakaya ait FCF sonucunu bulmak için birleştirilmiştir.
12. Ortaya çıkan ve plakaya ait olan FCF'ler üzerinden tepe tutma metodu ile modal parametreler (doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri) hesaplanmıştır.
13. ANSYS WB® simülasyonlarından elde edilen mod şekilleri, deneysel modal analiz sonuçlarıyla MEScope® yazılımında karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma her numune için ilk 3 doğal frekans üzerinden gerçekleştirilmiştir.
14. Mod şekillerinin karşılaştırılması sonucu MGM'ler elde edilmiştir.
15. Tüm sonuç verileri elde edildikten sonra, karşılaştırma yapılmış ve katman kalınlığının mekanik ve dinamik özelliklere olan etkileri tüm parametreleri göz önünde bulundurarak yorumlanmıştır.

4.1 Numunelerin çekme testleri

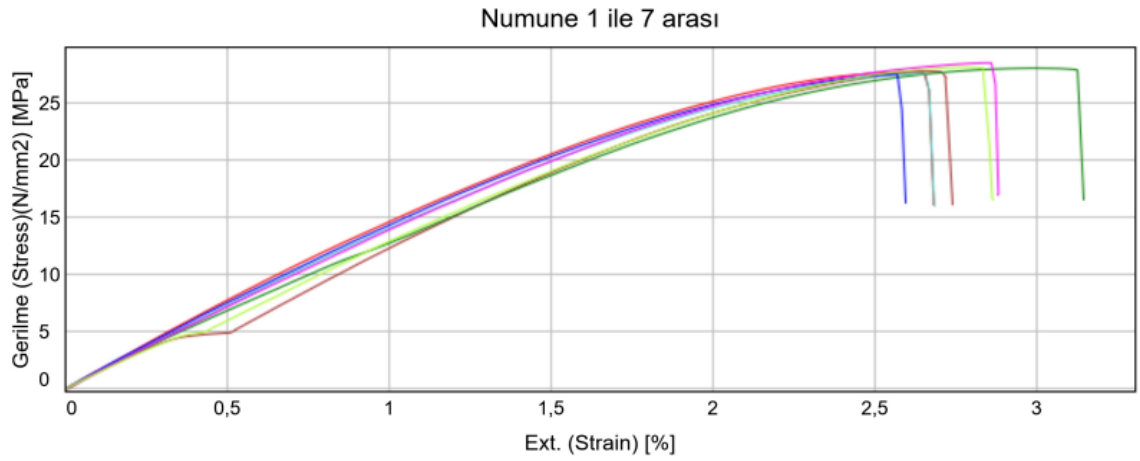
3 farklı katman kalınlığı için 7 adet numune üretilmiştir. Her numune için 7 adet çekme testi gerçekleştirilmiştir. Test sonucunda en fazla sapma gösteren numuneler işleme alınmamıştır. Ayrıca standart gereği ekstansometre dışında kalan alanda kopan numuneler hesaba dahil edilmemiştir. Böylece ortalama numune başına 5 değer aritmetik ortalaması alınarak elastisite modülleri hesaplanmıştır. Her katman kalınlığına ait elastisite modülü sonlu elemanlar analizinde kullanılmıştır.



Şekil 4.1. a-) Çekme testi, b-) Çekme numuneleri

Çizelge 4.1. 0,127mm katman kalınlığına ait mekanik özellikler

Numune	Maksimum Kuvvet (Max Force) [kN]	Akma Mukavemeti (Yield Strength) (0.2%) [N/mm ²]	Çekme Mukavemeti (UTS) [MPa]	Uzama (Break Strain) [%]	Elastik Modül (E) [MPa]	Kopma Yeri Uygunluğu (Gauge Length In/Out)
1	1,14	20,96	27,760	2,68	1380	
2	1,14	23,44	27,803	2,74		X
3	1,16	20,40	28,082	3,14	1216	
4	1,14	22,15	27,635	2,68	1299	
5	1,14	21,45	27,522	2,60	1345	
6	1,19	22,77	28,544	2,88		X
7	1,16	23,86	28,170	2,86	1038	

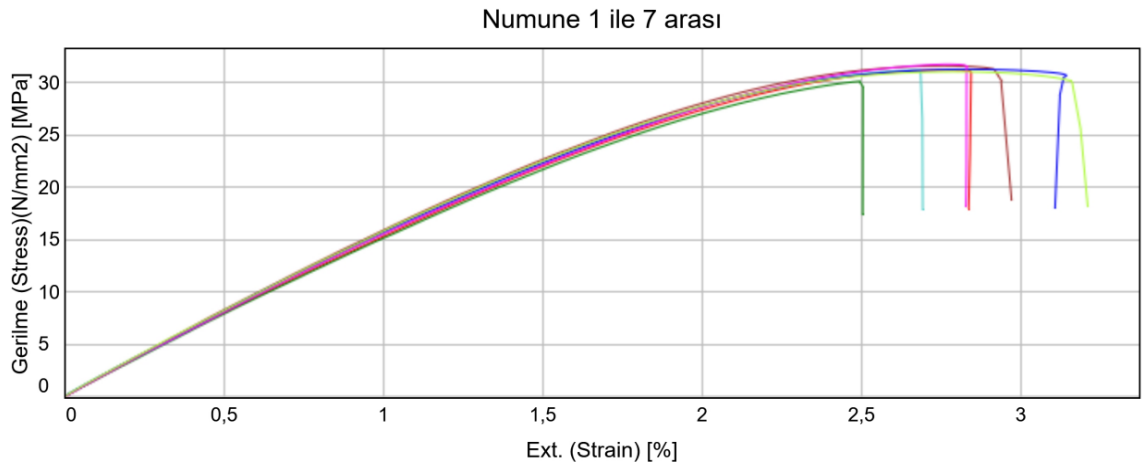


Şekil 4.2. 0,127mm katman kalınlığına ait çekme testi sonuçları

0,127mm katman kalınlığı için hesaplanan ortalama elastisite modülü 1309 MPa'dır.

Çizelge 4.2. 0,178mm katman kalınlığına ait mekanik özellikler

Numune	Maksimum Kuvvet (Max Force) [kN]	Akma Mukavemeti (Yield Strength) (0.2%) [N/mm ²]	Çekme Mukavemeti (UTS) [MPa]	Uzama (Break Strain) [%]	Elastik Modül (E) [MPa]	Kopma Yeri Uygunluğu (Gauge Length In/Out)
1	1,29	24,28	31,185	2,84		X
2	1,30	25,14	31,575	2,97	1477	
3	1,25	24,58	30,092	2,50		X
4	1,29	25,85	31,165	2,69	1460	
5	1,30	25,30	31,245	3,14	1467	
6	1,32	25,09	31,721	2,83	1483	
7	1,29	24,74	31,022	3,21	1470	

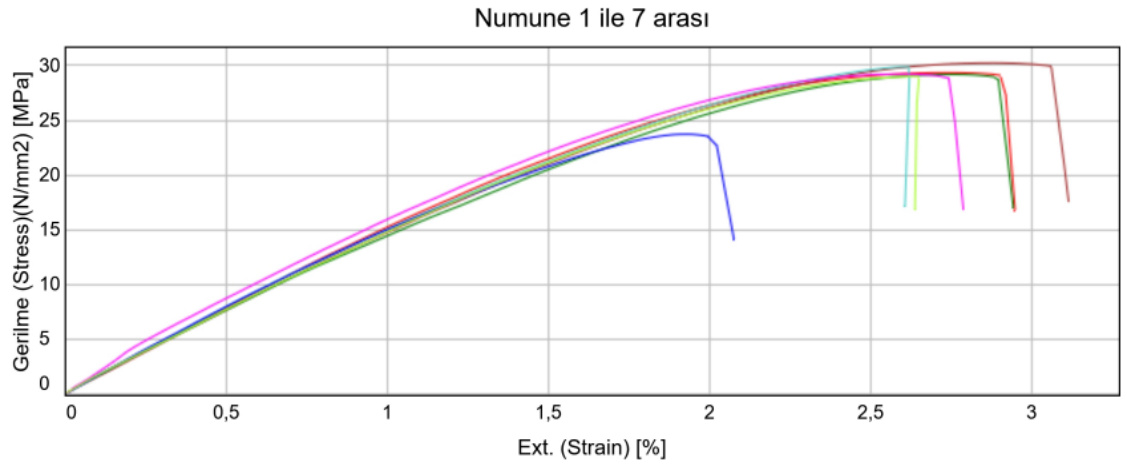


Şekil 4.3. 0,178mm katman kalınlığına ait çekme testi sonuçları

0,178mm katman kalınlığı için hesaplanan ortalama elastisite modülü 1473 MPa'dır.

Çizelge 4.3. 0,254mm katman kalınlığına ait mekanik özellikler

Numune	Maksimum Kuvvet (Max Force) [kN]	Akma Mukavemeti (Yield Strength) (0.2 %) [N/mm ²]	Çekme Mukavemeti (UTS) [MPa]	Uzama (Break Strain) [%]	Elastik Modül (E) [MPa]	Kopma Yeri Uygunluğu (Gauge Length In/Out)
1	1,23	23,61	29,359	2,95	1417	
2	1,26	23,56	30,243	3,11	1379	
3	1,23	21,68	29,189	2,94	1350	
4	1,25	22,67	29,876	2,62		X
5	0,99	20,33	23,726	2,08	1412	
6	1,22	16,55	29,226	2,79		X
7	1,21	24,20	29,011	2,65	1385	



Şekil 4.4. 0,254mm katman kalınlığına ait çekme testi sonuçları

0,254mm katman kalınlığı için hesaplanan ortalama elastisite modülü 1389 MPa'dır. Tüm katman kalınlıklarına ait ortalama elastisite modülleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Katman kalınlığına göre ortalama elastisite modülü ve yoğunluk

Numune	Ortalama Elastik Modülü (MPa)	Yoğunluk(g/cm ³)
T10 (0,127mm)	1309	0,99
T12 (0,178mm)	1473	1,03
T16 (0,254mm)	1389	1,02

4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modal Analiz

Yoğunlukları ve elastisite modülleri hesaplanan numunelerin ANSYS WB® ile sonlu elemanlar yöntemiyle modal analizlerinin yapılabilmesi için bazı parametreler ihtiyaç vardır. ANSYS WB® programında ihtiyaç duyulan bu parametreler malzeme kartına tanımlanmaktadır. Standart malzemeler program içerisinde hazır bulunmaktadır fakat bu çalışmada her malzeme farklı mekanik özellik gösterdiği için 3 farklı malzeme kartı oluşturulmuştur. (Çizelge 4.5) Malzeme kartı tanımlamalarında yoğunluk, elastisite modül, poisson oranı gibi parametreler istenmektedir. Yoğunluk ve elastisite modülü numuneler üzerinden hesaplanmıştır, poisson oranı ise PC-ABS malzeme için genel olarak tanımlanan değer olan 0,39 olarak alınmıştır ve sonlu elemanlar analizleri bu değerler ile hesaplanmıştır.

FDM ile üretilen plakalar art arda bir katman X yönünde yani 0°, diğer katman Y yönünde yani 90° olarak üretildiğinden dolayı X ve Y ekseninde lineer olan bir davranış sergileyecektir fakat eğer tek yönde yani X veya Y yönünde üretilmiş olsalardı her iki ekseninde farklı mekanik özelliklere sahip olacaklarından dolayı elastisite modülleri de değişmiş olacaktı. Bu şekilde olan malzemelere izotropik olmayan yani farklı eksenlerde farklı davranış sergilen malzeme denir. Bu tez kapsamında yapılan sonlu elemanlar analizlerinde malzeme X, Y ekseninde izotropiktir ve Z ekseninin etkisi çok az olduğundan dolayı ihmal edilip tamamen lineer olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.5. Modal analiz simülasyon malzeme kartı

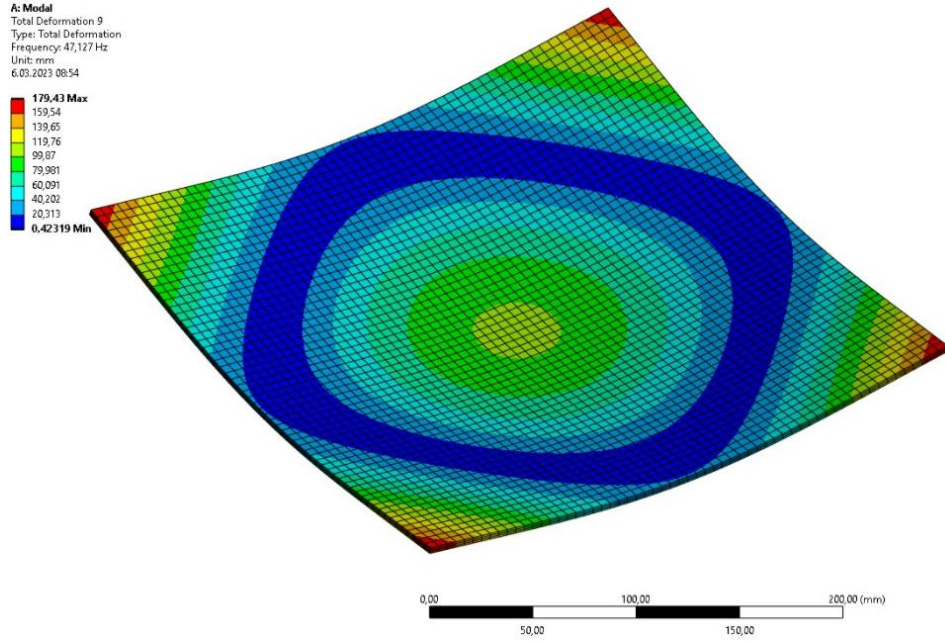
Katman Kalınlığı	Yoğunluk(g/cm ³)	Ortalama Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
T10 (0,127mm)	0,99	1309	0,39
T12 (0,178mm)	1,03	1473	0,39
T16 (0,254mm)	1,02	1389	0,39

Modal analiz simülasyonlarında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6’da gösterilmiştir. Simülasyon sonucunda en yüksek doğal frekans 0,178mm katman kalınlığı ile elde edilmiş, en düşük ise 0,127mm katman kalınlığı ile elde edilmiştir.

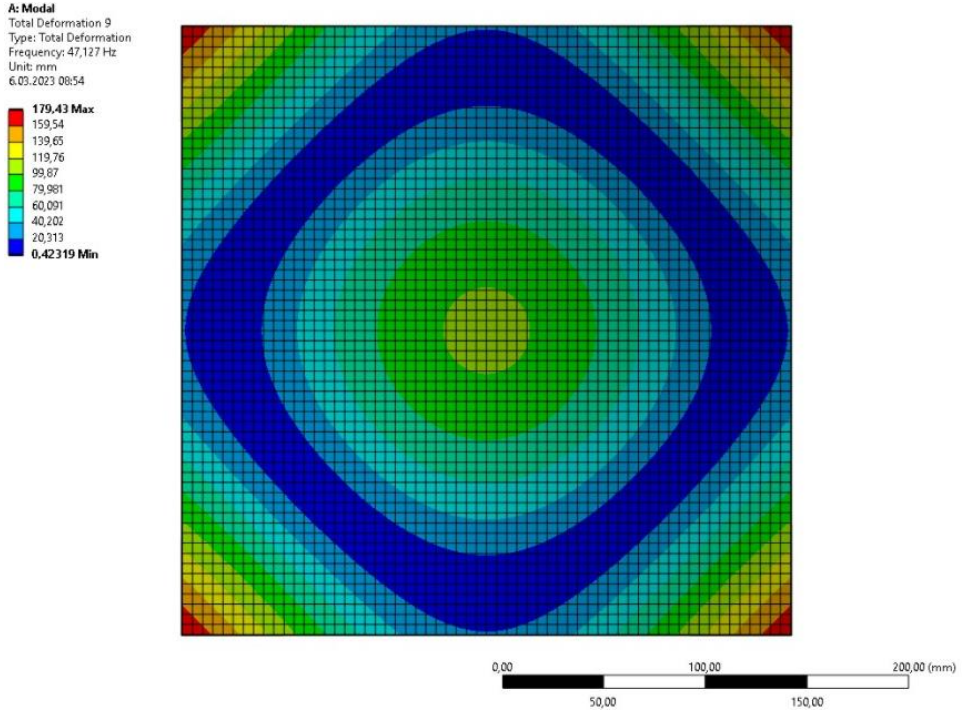
Çizelge 4.6. Modal analiz simülasyon ilk 3 doğal frekans

Katman Kalınlığı	1.Mod Frekans (Hz)	2.Mod Frekans (Hz)	3.Mod Frekans (Hz)
T10 (0,127mm)	47,1	116	234
T12 (0,178mm)	49	121	243
T16 (0,254mm)	47,8	118	237

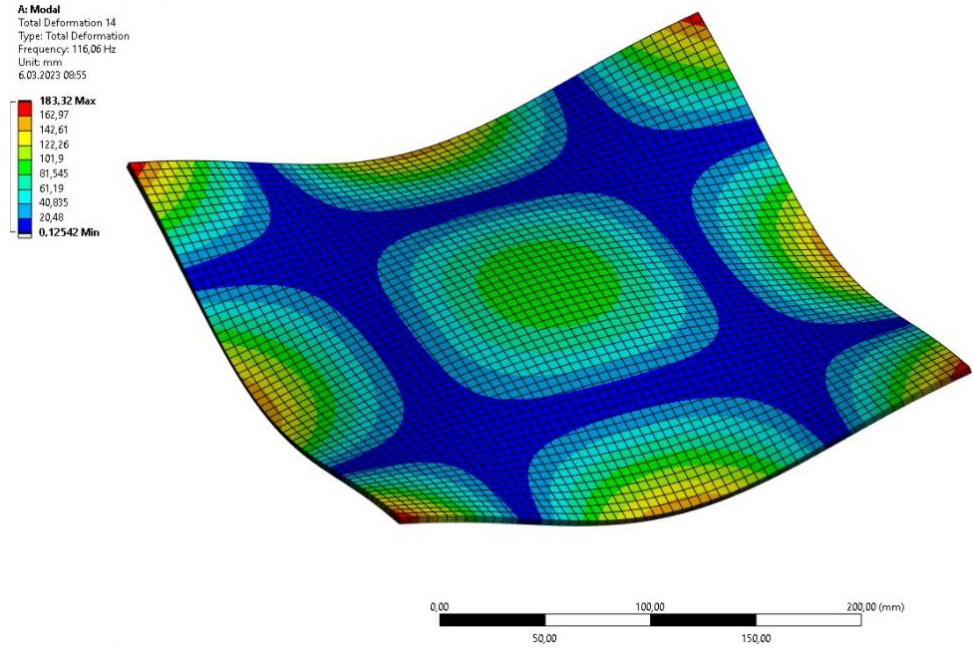
Simülasyonlar sonucunda plakaların mod şekilleri görselleştirilmiştir. Her numune için kullanılan geometri aynı olduğundan dolayı bu plakaların ilgili frekanslarda yapacakları mod şekilleri de aynı olacaktır fakat sadece sergiledikleri mod şekillerinin ilgili frekans noktaları ötelenecektir. Yani 0,127mm katman kalınlığındaki plakanın 47,1 Hz’de yapmış olduğu hareketi, 0,178mm katman kalınlığına sahip plaka 49 Hz’de yapacaktır. Plakalara ait sönüm oranları da bununla farklılık gösterecektir. Aşağıdaki şekillerde 0,127mm katman kalınlığına ait plakanın ilk 3 mod şekli gösterilmiştir.



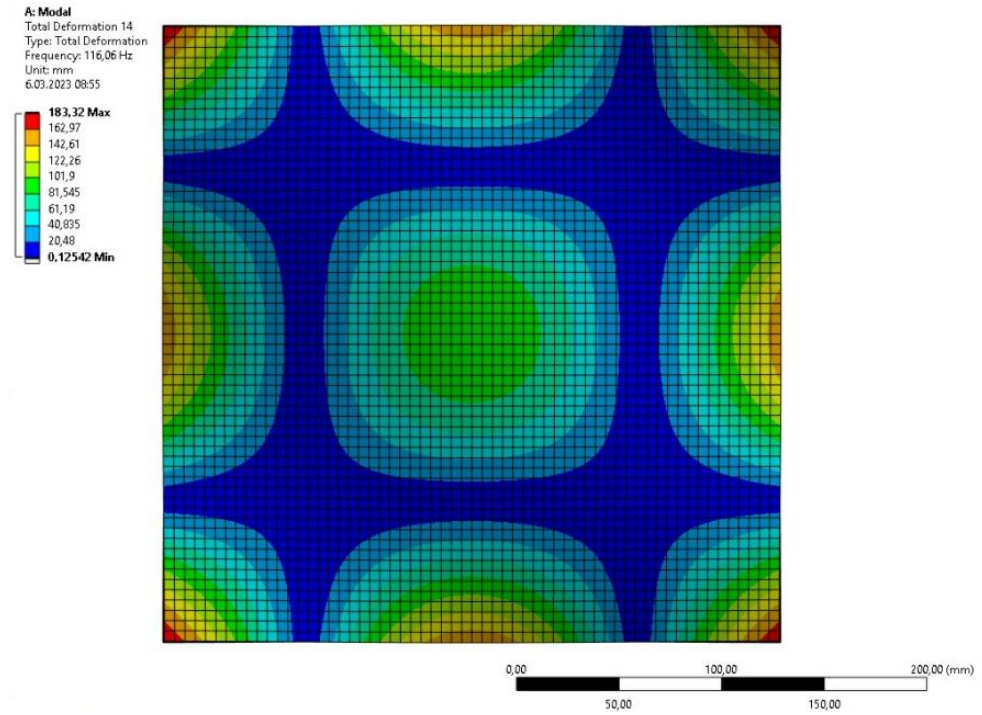
Şekil 4.5. Birinci mod izotropik görünüş



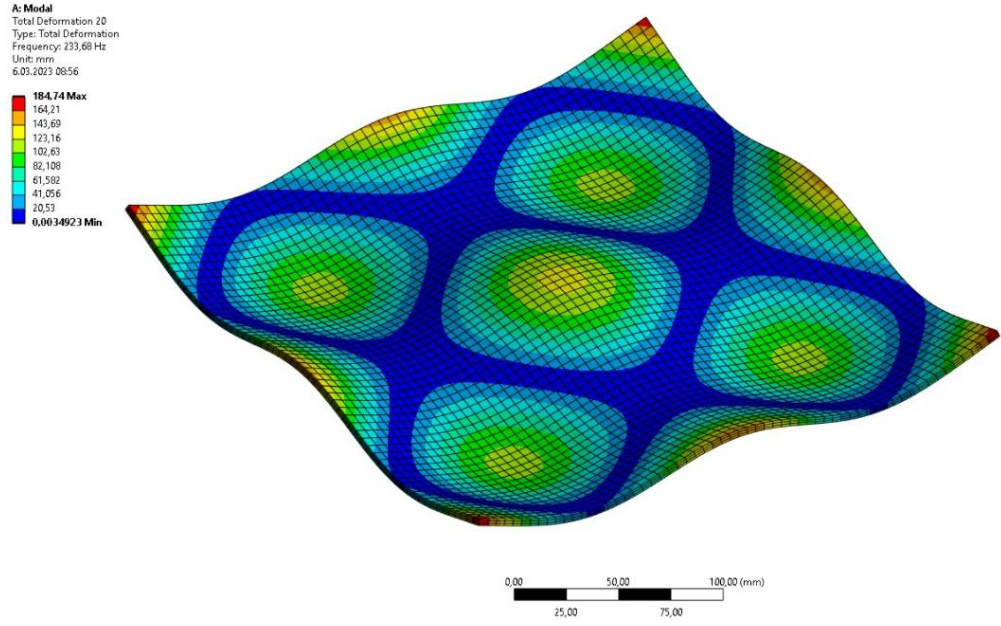
Şekil 4.6. Birinci mod üstten görünüş



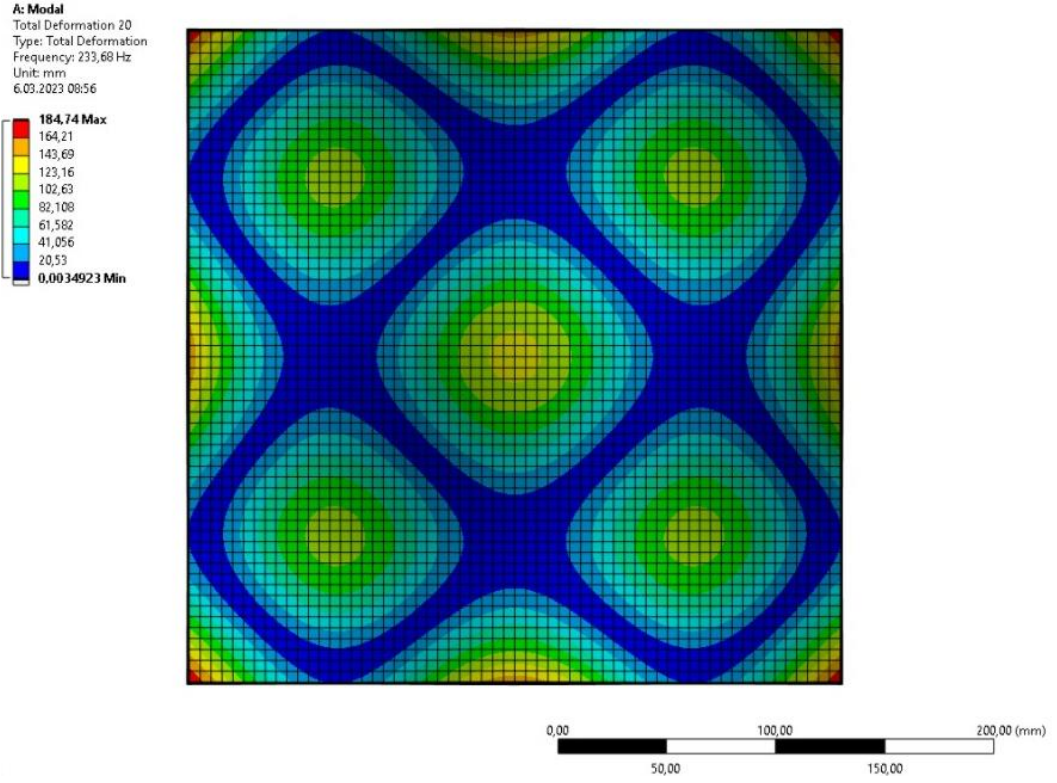
Şekil 4.7. İkinci mod izotropik görünüş



Şekil 4.8. İkinci mod üstten görünüş



Şekil 4.9.Üçüncü mod izotropik görünüş



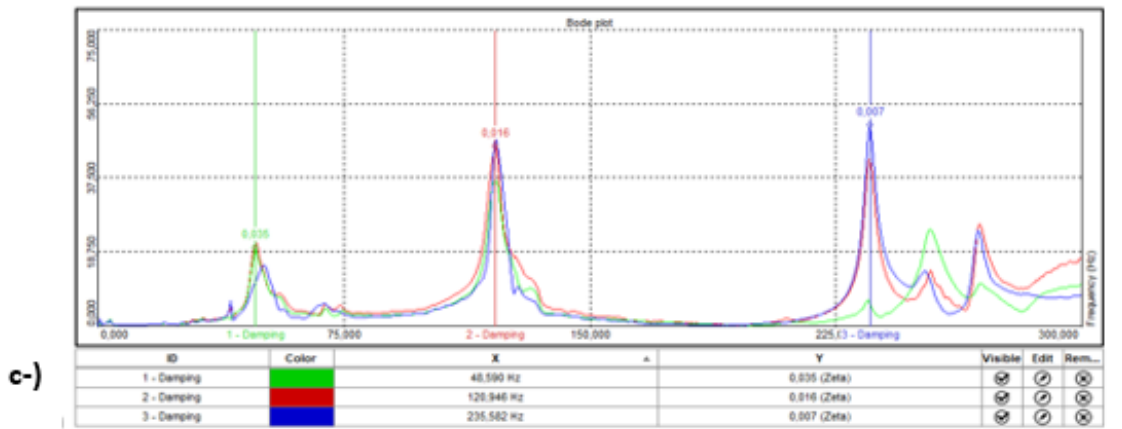
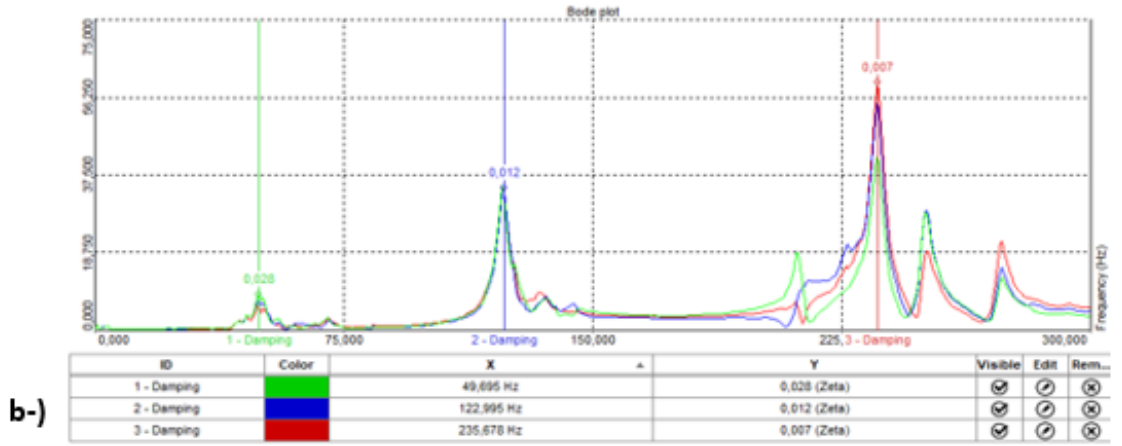
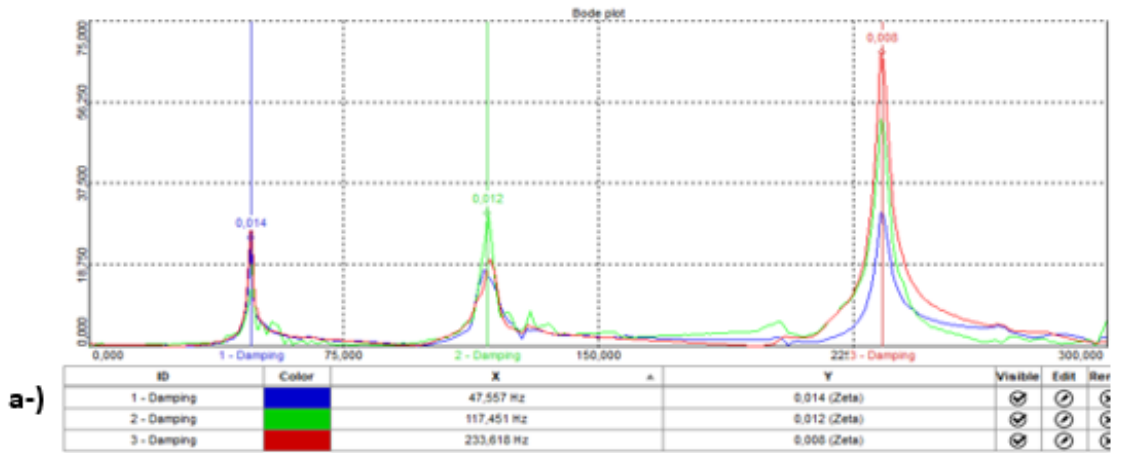
Şekil 4.10. Üçüncü mod üstten görünüş

4.3 Darbe Çekici ile Modal Analiz

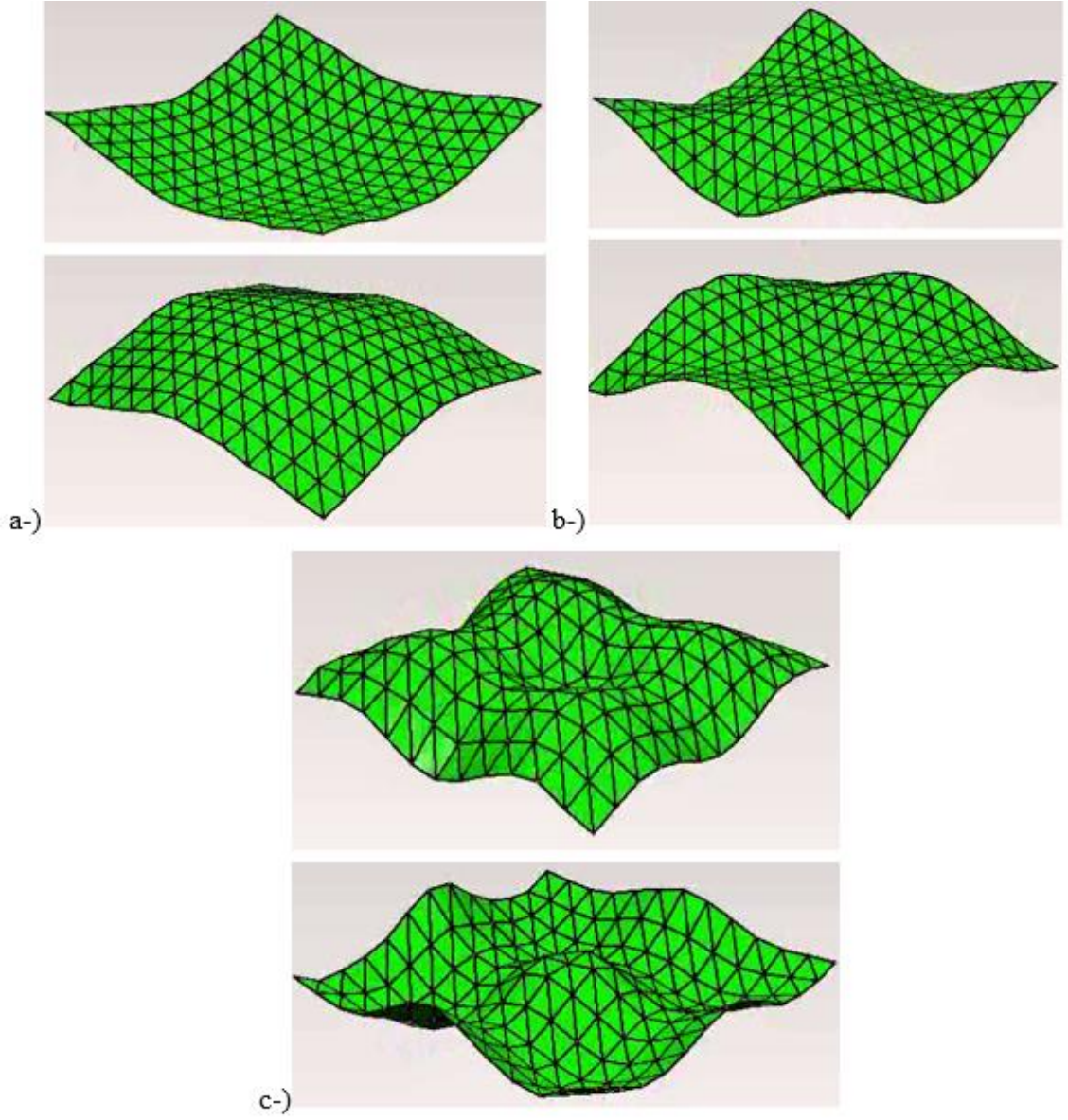
Deneyisel modal analiz yöntemlerinden çekiç gezdirme yöntemiyle modal test yapılmıştır. Test yapılmadan önce numunelerin üzerindeki uyartı bölgeleri yani çekiç ile vurulacak düğüm noktaları eşit parçalara ayrılmış ve toplamda 49 adet eş parça elde edilmiştir. İvme çıktılarını alabilmek adına 49 eşit parçaya bölünen plakanın 25. düğüm noktasına ivmeölçer yerleştirilmiştir. (Şekil 4.11)



Şekil 4.11. Çekiç gezdirme modal test genel görünüşü



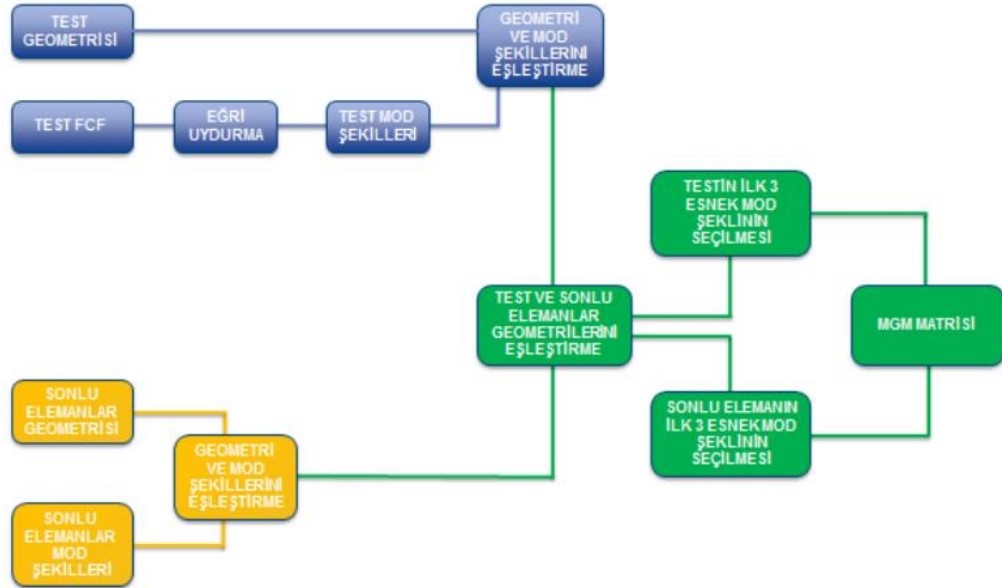
Şekil 4.12. (a) 0,127mm (b) 0,178mm ve (c) 0,254mm bazı FCF sonuçları



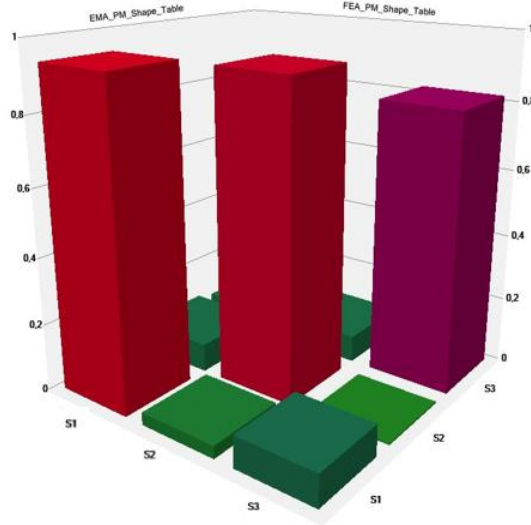
Şekil 4.13. (a) 0,127mm plakanın 1.mod şekli(47,9 Hz) (b)2.mod şekli (118 Hz) (c)3.mod şekli(233 Hz)

4.4 Modal Güvence Matrislerinin (MGM) Karşılaştırılması

Deneyisel modal testler tamamlandıktan sonra MEScope® yazılımında mod şekillerinin birbiri ile olan uyumlarını gösteren modal güvence matrisleri elde edilmiştir. Test esnasında DEWESoft® ile toplanan FCF'ler ve datalar MEScope® yazılımına atılmıştır. Simülasyon sonuçları da aynı şekilde kaydedilip yazılıma aktarılmıştır. Test sonucunda elde edilen her düğüm noktasına ait FCF'ler programa ait algoritma ile birleştirilmiş ve tek bir grafik edilmiştir. Bu grafik kullanılarak mod şekilleri, sönüm oranları ve doğal frekanslar elde edilmiştir. Test plakasına ait geometri yazılıma tanıtılmış ve simülasyonda kullanılan geometri ile eşleştirilmiştir. Eşleştirme sonucunda her bir düğüm noktasına ait hareket, yön ve büyüklük cinsinden elde edilen değerler simüle edilmiş, birbiriyle karşılaştırılarak MGM'ler elde edilmiştir. MGM'ler aynı katman kalınlığına sahip test plakasının deneysel modal test sonuçları ile modal analiz simülasyonun karşılaştırılması ve ayrıca tüm test plakalarının deneysel modal test sonuçlarının birbirleriyle karşılaştırılması sonucu elde edilmiştir. Yazılım akış şeması Şekil 4.13'de, MGM sonuçları Şekil 4.14'ten 25'e kadar vermiştir.



Şekil 4.14.MEScope akış şeması (Ay 2019)

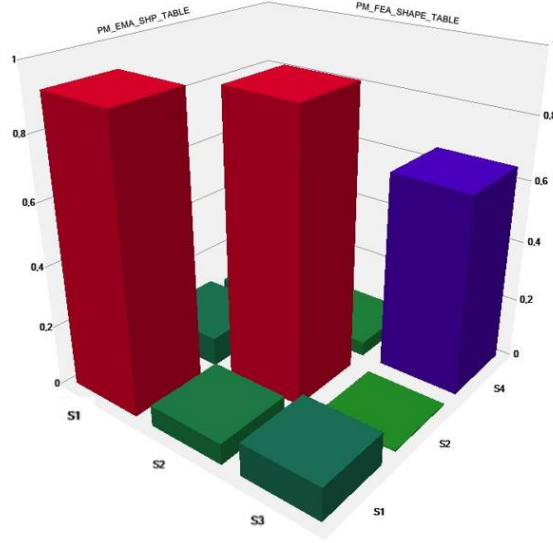


Şekil 4.15. 0,127mm MGM grafiksel gösterimi

				Shape 1	Shape 2	Shape 3	
	Label	EMA_PM_Shape_Table		Global-Poly	Global-Poly	Global-Poly	
		Frequency(or Time)		47,8	118	233	
	FEA_PM_Shape_Table	Damping		0,393	1,3	1,74	
			Damping (%)	0,822	1,11	0,744	
Shape 1		47,1	0	0	0,938	0,0843	0,0682
Shape 2		116	0	0	0,0376	0,921	0,0805
Shape 3		234	0	0	0,0945	0,00484	0,818

Şekil 4.16. 0,127mm MGM tablosal gösterimi

Şekil 4.16’de 0,127mm katman kalınlığına sahip plakanın deneysel modal analizi ile modal analiz simülasyonu karşılaştırılmıştır. Sol tarafta gösterilen ilk üç frekans değerleri simülasyon sonuçlarına, sağ tarafta gösterilen değerler ise deneysel modal analize aittir. 1. ve 2. doğal frekanslar arasındaki fark yaklaşık olarak %2 kadardır, 3.doğal frekans bölgesinde en az fark yakalanmıştır ve 1Hz’dir. Frekans değerleri artarken birbirine yaklaşan doğal frekans değerlerine rağmen, mod şekillerinin benzerliğinin azaldığı görülmektedir. 1.modun uyumu %93,8 iken 3.modda %81,8 e kadar düşmüştür ve sonuçlar Şekil 4.15’de görselleştirilmiştir.

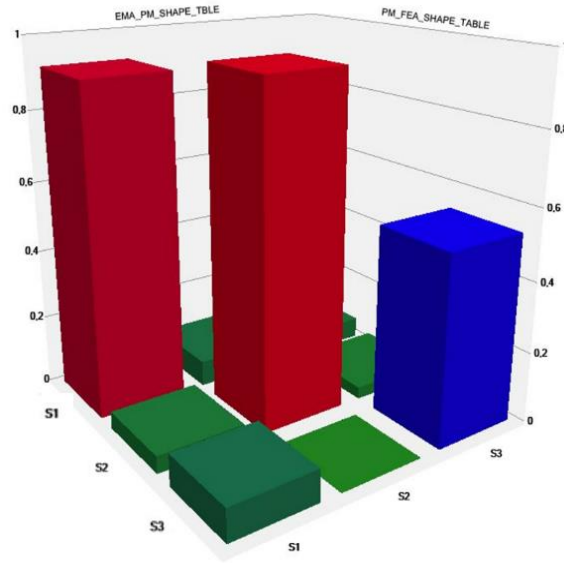


Şekil 4.17. 0,178mm MGM grafiksel gösterimi

				Shape 1	Shape 2	Shape 3	
	Label	PM_EMA_SHP_TABLE		Global-Poly	Global-Poly	Global-Poly	
		Frequency(or Time)		49,9	123	236	
	PM_FEA_SHAPE_TABLE		Damping	0,934	1,21	1,67	
			Damping (%)	1,87	0,983	0,709	
Shape 1		49	0	0	0,921	0,096	0,074
Shape 2		121	0	0	0,0687	0,919	0,0478
Shape 3		243	0	0	0,108	0,00432	0,648

Şekil 4.18. 0,178mm MGM tablosal gösterimi

Şekil 4.18’de 0,178mm katman kalınlığına sahip plakanın deneysel modal analizi ile modal analiz simülasyonu karşılaştırılmıştır. Sol tarafta gösterilen ilk üç frekans değerleri simülasyon sonuçlarına, sağ tarafta gösterilen değerler ise deneysel modal analize aittir. 1.doğal frekans arasındaki fark yaklaşık %2, 2.doğal frekans noktasında %1, 3.doğal frekans bölgesinde ise fark %3 kadardır. Şekil 4.17’da MGM sonuçları görselleştirilmiş ve sırasıyla %92,1, % 91,9, %64,8 olarak belirlenmiştir.

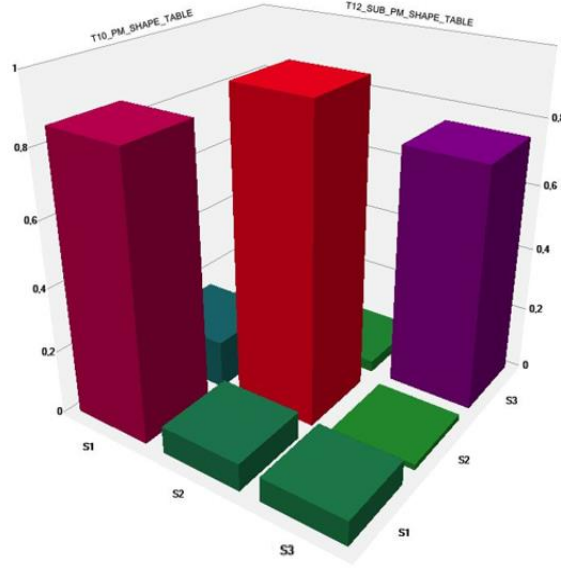


Şekil 4.19. 0,254mm MGM grafiksel gösterimi

				Shape 1	Shape 2	Shape 3	
	Label	EMA_PM_SHAPE_TBLE		Global-Poly	Global-Poly	Global-Poly	
	PM_FEA_SHAPE_TABLE	Frequency(or Time)		48,6	121	235	
		Damping		0,94	1,4	1,49	
			Damping (%)	1,93	1,15	0,635	
Shape 1		47,8	0	0	0,918	0,0737	0,0599
Shape 2		118	0	0	0,0496	0,944	0,0339
Shape 3		237	0	0	0,0914	0,00065	0,533

Şekil 4.20. 0,254mm MGM tablosal gösterimi

Şekil 4.20’de 0,254mm katman kalınlığına sahip plakanın deneysel modal analizi ile modal analiz simülasyonu karşılaştırılmıştır. Sol tarafta gösterilen ilk üç frekans değerleri simülasyon sonuçlarına, sağ tarafta gösterilen değerler ise deneysel modal analize aittir. 1. ve 2. doğal frekanslar arasındaki fark yaklaşık olarak %2 kadardır, 3.doğal frekans bölgesinde en az fark yakalanmıştır ve 2Hz’dir. Şekil 4.19’de MGM görselleştirilmiştir ve en iyi mod şekli uyumu 2.modda %94,4 civarında, en düşük uyum ise %53,3 olarak 3.modda yakalanmıştır.

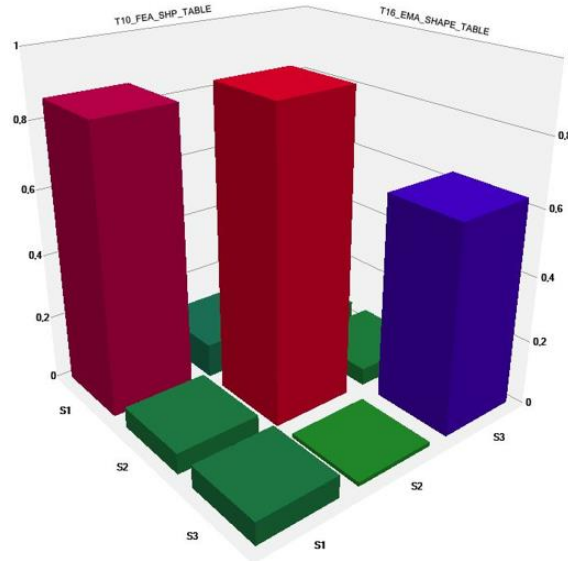


Şekil 4.21. 0,127mm ile 0,178mm MGM grafiksel gösterimi

				Shape 1	Shape 2	Shape 3	
	Label	T10_PM_SHAPE_TABLE		Global-Poly	Global-Poly	Global-Poly	
	T12_SUB_PM_SHAPE_TABLE	Frequency(or Time)		47,8	117	233	
		Damping		0,384	1,23	1,72	
		Damping (%)		0,804	1,04	0,737	
Shape 1	Global-Poly	49,9	0,934	1,87	0,856	0,15	0,0629
Shape 2	Global-Poly	123	1,21	0,983	0,085	0,947	0,0355
Shape 4	Global-Poly	236	1,67	0,709	0,0768	0,0182	0,749

Şekil 4.22. 0,127mm ile 0,178mm MGM tablosal gösterimi

Şekil 4.22’de 0,127mm ve 0,178mm katman kalınlıklarına ait deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sol tarafta 0,178mm sağ tarafta ise 0,127mm gösterilmektedir. 0,178mm ye ait doğal frekans noktalarının 0,127mm katman kalınlığına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.21’de MGM gösterilmiştir ve en yüksek benzerlik 2.mod şeklinde %94,7 olarak hesaplanmıştır.

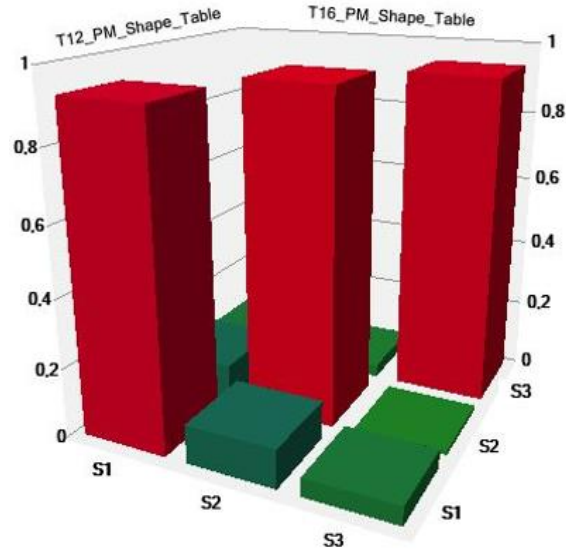


Şekil 4.23. 0,127mm ile 0,254mm MGM grafiksel gösterimi

				Shape 1	Shape 2	Shape 3	
	Label	T10_FEA_SHP_TABLE			Global-Poly	Global-Poly	Global-Poly
		Frequency(or Time)			47,8	117	233
	T16_EMA_SHAPE_TABLE		Damping	0,384	1,23	1,72	
			Damping (%)	0,804	1,04	0,737	
Shape 1	Global-Poly	48,6	0,94	1,93	0,863	0,106	0,0543
Shape 2	Global-Poly	121	1,4	1,15	0,0639	0,923	0,053
Shape 3	Global-Poly	235	1,49	0,635	0,0689	0,0128	0,632

Şekil 4.24. 0,127mm ile 0,254mm MGM tablosal gösterimi

Şekil 4.24'de 0,127mm ve 0,254mm katman kalınlıklarına ait deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sol tarafta 0,254mm sağ tarafta ise 0,127mm gösterilmektedir. 0,254mm ye ait doğal frekans noktalarının 0,127mm katman kalınlığına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.23'de MGM gösterilmiştir ve en yüksek benzerlik 2.mod şeklinde %92,3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.25. 0,178mm ile 0,254mm MGM grafiksel gösterimi

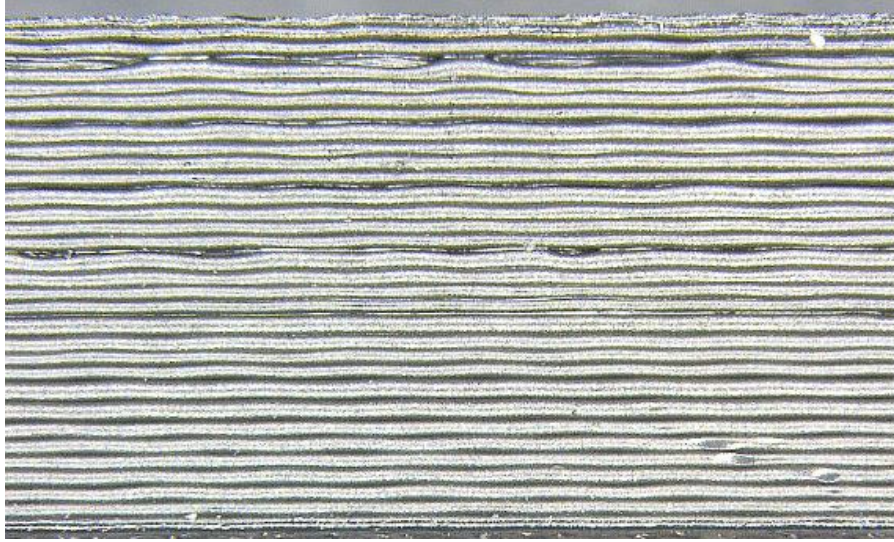
					Shape 1	Shape 2	Shape 4
	Label	T12_PM_Shape_Table			Global-Poly	Global-Poly	Global-Poly
		Frequency(or Time)			49,9	123	236
	T16_PM_Shape_Table		Damping		0,934	1,21	1,67
			Damping (%)		1,87	0,984	0,708
Shape 1	Global-Poly	48,6	0,94	1,93	0,926	0,111	0,0585
Shape 2	Global-Poly	121	1,4	1,15	0,112	0,945	0,0367
Shape 3	Global-Poly	235	1,49	0,633	0,0541	0,0128	0,938

Şekil 4.26. 0,178mm ile 0,254mm MGM tablosal gösterimi

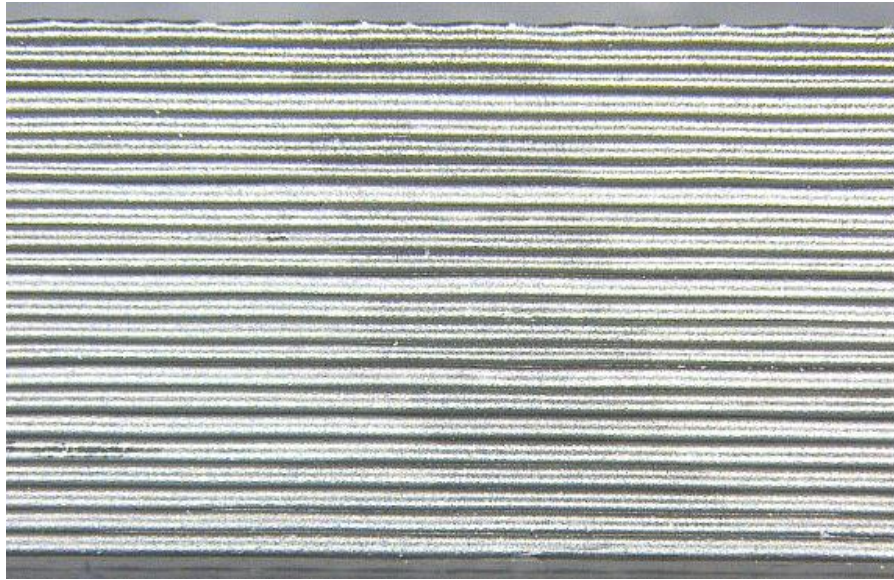
Şekil 4.26'de 0,178mm ve 0,254mm katman kalınlıklarına ait deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sol tarafta 0,254mm sağ tarafta ise 0,178mm gösterilmektedir. 0,178mm ye ait doğal frekans noktalarının 0,254mm katman kalınlığına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.25'de MGM gösterilmiştir ve en yüksek benzerlik 2.mod şeklinde %94,5 olarak hesaplanmıştır. Bu iki plaka arasında elde edilen mod şekli benzerliği tüm testlerde elde edilen en yüksek tutarlılığa sahiptir.

4.5 Test Numuneleri Mikroskop Görüntüleri

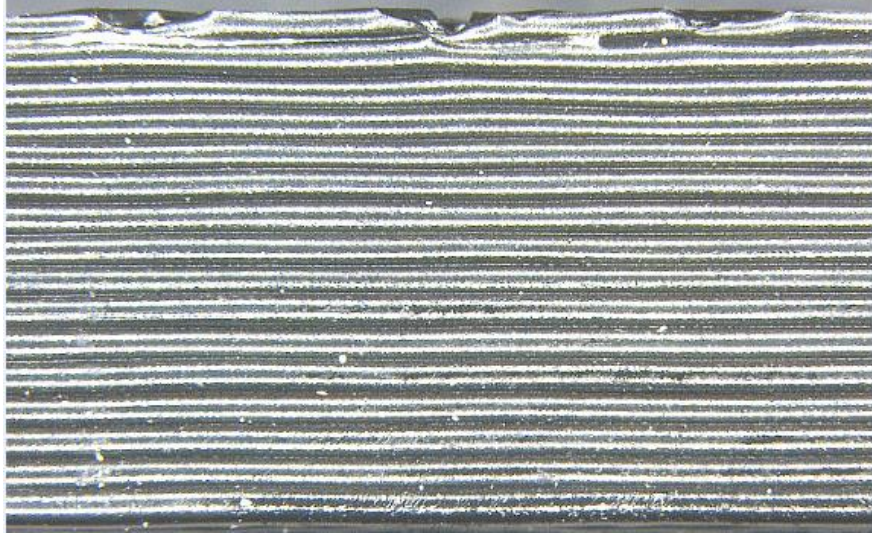
Çekme numunelerinin mikroskop görüntüleri Şekil 4.27'dan 4.29'e kadar gösterilmiştir. Numunelerin katman sayısının 0,127mm için 32 adet, 0,178mm için 23 adet, 0,254mm için 16 adet olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.27. 0,127mm çekme numunesi mikroskop görüntüsü 32 katman



Şekil 4.28. 0,178mm çekme numunesi mikroskop görüntüsü 23 katman



Şekil 4.29. 0,254mm çekme numunesi mikroskop görüntüsü 16 katman

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Elastisite modülünü ve kopma mukavemetini belirlemek için yapılan çekme testlerinde en yüksek değerler 0,178mm olan katman kalınlığı ile elde edilmiştir. Bu durum katman kalınlığının artması veya azalmasının, malzemenin elastisite modülünü ve kopma mukavemetini arttırma veya azaltma yönünde doğrusallık göstermemekle birlikte, optimum katman kalınlığı belirlemenin mekanik özellikler için etkili olduğunu göstermektedir. Yapılan deneysel modal testler sonucunda, en yüksek doğal frekansa sahip yapı 0,178mm katman kalınlığı ile elde edilmiştir. Doğal frekans değerlendirmesi yapılırken ilk üç mod göz önünde bulundurulmuştur. 0,254mm katman kalınlığına sahip plakanın sönüm oranları diğer plakalara göre daha fazladır. Üretim zamanı ve maliyeti en fazla olan 0,127mm katman kalınlığı, en düşük mekanik ve dinamik özelliklere sahip olmuştur. Bu durum mekanik ve dinamik özelliklerin arandığı koşullarda, 0,127mm kalınlığının kullanılmasının uygun olmadığını göstermiştir. Deneysel modal analiz ile simülasyonların MGM'leri incelendiğinde, en iyi sonucun 0,127mm katman kalınlığında elde edildiği gözlemlenmiştir. En düşük MGM ise 0,254mm ile elde edilmiştir. Plakalar arasındaki MGM'ler kıyaslandığında ise en iyi benzerlik 0,178mm ile 0,254mm arasında elde edilmiştir. Bu karşılaştırmada ise en düşük benzerlik oranı 0,127mm ile 0,254mm arasında gözlemlenmiştir. MGM'ler genel olarak incelendiğinde en iyi benzerlik oranı 1.mod şeklinde en düşük benzerlik oranı ise 3.mod şeklinde elde edilmiştir. 3.doğal frekans noktasında plakanın sahip olduğu mod şekli diğer ilk 2 moda göre daha kompleks olduğundan dolayı benzerlik oranı azalmaktadır. Deneysel modal test sonuçlarının, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modal analiz simülasyonlarıyla karşılaştırılması sonucunda, elde edilen modal güvence matrislerinin yüksek olması, yapılan testin doğrulunu ve ayrıca üretilen plakaların izotropik davranışa yakın davranış sergilediklerini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Anonim, (2008). Fused Deposition Modelling (FDM). <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling> Erişim tarihi:05.04.2023
- Anonim, (2015a). Spec Sheet Fortus 400mc EN. <https://support.stratasys.com/en/Printers/FDM-Legacy/Fortus-360mc-400mc> Erişim tarihi:17.04.2023
- Anonim, (2015b). SIRIUS® HD (high density) STGS amplifier specifications. <https://dewesoft.com/products/sirius/tech-specs#hd-stgs> Erişim Tarihi:17.04.2023
- Anonim, (2017). Instrumented Impact Hammer IH-01- 200N Range. <https://www.djbinstruments.com/products/instrumentation/impact-hammers/view/ih-01> Erişim tarihi:17.04.2023
- Anonim, (2018). 3400 Series Universal Testing Systems for Tensile, Compression, and Flexure Testing. <https://www.instron.com/en/products/testing-systems/universal-testing-systems/low-force-universal-testing-systems/3400-series> Erişim tarihi:17.04.2023
- Anonim, (2019). 3055 Series General Purpose Accelerometer. <https://www.dytran.com/model-3055d1-general-purpose-accelerometer-p3230/> Erişim tarihi:17.04.2023
- Anonim, (2020a). What is a Frequency Response Function (FRF). <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-frequency-response-function-frf> Erişim tarihi:07.05.2023
- Anonim, (2020b). Introduction to ICP® Accelerometers. <https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-accelerometers> Erişim tarihi:01.05.2023
- Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P. K., (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), pp.248–257. doi:10.1108/13552540210441166
- Ay, E. (2019). Plastik Malzemedden Üretilmiş Otomotiv Aydınlatma Parçalarının Modal Analizi ve Sonlu Elemanlar Modelinin Güncellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa
- Bagsik, A., Schöppner, V., Klemp, E., (2010). FDM Part Quality Manufactured with Ultem 9085, *14th International Scientific Conference on Polymeric Materials*, Halle (Saale)
- Bıyıklıoğlu, M. (2019). Eriyik Yığıma Yöntemiyle Üretilen Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa
- Es Said, O.S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., (2000). Effect of Layer Orientation on Mechanical Propertiwes of Rapid Prottyped Samples, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 1, pp. 107-122
- Gawel, T. G. (2020). Review of Additive Manufacturing Methods. *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena*, 308
- Gjelstrup, S. L., (2021). What is Modal Analysis: The Ultimate Guide. <https://dewesoft.com/blog/what-is-modal-analysis> (Erişim tarihi:01.05.2023)

- İyibilgin O, Dal H., Gepek E. (2019). Experimental Modal Analysis Of 3d Printed Beams, *4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry*,
- Kalhara, P.G., Jayasinghearachchi, V. D., Dias, A. H. A. T., Ratnayake, V. C., Jayawardena, C., Kuruwitaarachchi, N. (2017). TreeSpirit: Illegal Logging Detection and Alerting System using Audio Identification over an IoT Network, *Conference Paper*
DOI: 10.1109/SKIMA.2017.8294127
- Kannan S., Ramamoorthy, M., (2020). Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3D Printed ABS, PC and PCABS materials. School of Mechanical Engineering, VIT University, Vellore, 632014, Tamil Nadu, India
- Kıral, Z., (2017). MAK 4041 Mekanik Titreşimler. Dokuz Eylül Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
- Lee, B. H., Abdullah, J., Khan, Z., (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object, *Journal of Materials Processing Technology*, 169(1), pp.54–61, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259
- Nguyen, H., T., Crittenden, K., Weiss, L., Bardaweel, H., (2022). Experimental Modal Analysis and Characterization of Additively Manufactured Polymers,
- Ondra, V., (2013). Creation Of Modal Parameter Estimation Application For Experimental Modal Analysis, Master's Thesis, Brno University Of Technology,
- Özcanlı, Ö., (2017). Modal Analysis of 3D Printed Parts, Research Project, Coventry University, 2017
- Rao, S. S., (2004). Mechanical Vibration. fifth edition. University of Miami
- Sbriglia L.R., Baker A.M., Thompson J.M., Morgan R.V., Wachtor A.J., Bernardin J.D., (2016). Embedding Sensors in FDM Plastic Parts During Additive Manufacturing, *Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 10*, Pages 205-214.
- Smith, G.M., (2022). Data Acquisition (DAQ)- The Ultimate Guide. <https://dewesoft.com/daq/what-is-data-acquisition> Erişim tarihi 07.05.2023
- Sürmen, H.K., (2019) Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 24, Sayı 2, DOI: 10.17482/uumfd.519147
- Şekerci, H. U. (2013). Bir hava aracı komponentinin dinamik karakteristiklerinin teorik ve deneysel modal analiz metoduyla belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul
- Udroiu, R., ve Braga, I. C. (2017). Polyjet technology applications for rapid tooling, *MATEC Web of Conferences*, 112, 3011. Doi:10.1051/mateconf/201711203011
- Weber, M., (2017). Piezoelectric Principle, https://www.mmf.de/piezoelectric_principle.htm Erişim tarihi:04.05.2023
- Wong, K. V., Hernandez, A.(2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 1-10, 2012. doi: 10.5402/2012/208760

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Taha MEMUR
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa/Osmangazi 24.07.1994
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Şehit Öğretmen Kubilay Lisesi/2012
Lisans : Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği/2017
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : FKT Koltuk Sistemleri Dağıtım A.Ş (2017-2020)
Marelli MAKO A.Ş (2020-2023)

İletişim (e-posta) : tahamemur@gmail.com