TERMOPLASTİK MALZEMENİN TİTREŞİM KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ezgi UZATICI SAĞLAM

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMOPLASTİK MALZEMENİN TİTREŞİM KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ezgi UZATICI SAĞLAM
0009-0003-7980-4090

Prof.Dr.Hande GÜLER ÖZGÜL
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

Termoplastik Malzemenin Titreşim Karakteristiklerinin İncelenmesi

Ezgi UZATICI SAĞLAM

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr.Hande GÜLER ÖZGÜL

Bu araştırma, otomotiv endüstrisinde aydınlatma sistemlerinin performansını artırmak amacıyla, farklı cam fiber oranlarına sahip PBT malzemelerin mekanik ve dinamik özellikleri dinamik bakımdan incelemektedir. Deneysel kısımda, PBT malzemeleri farklı cam fiber oranlarında hazırlanarak çekme testlerine tabi tutulmuş, elastik modül, yoğunluk ve mukavemet gibi temel malzeme özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında modal analizler gerçekleştirilmesi için malzeme modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Deneysel modal analiz ile teorik sonuçlar arasındaki yüksek uyum, modelleme sürecinin doğruluğunu teyit etmekte ve bu metodolojinin, otomotiv aydınlatma sistemleri tasarımında güvenle kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. PBT GF50 malzemesinin ışık titremesi problemini çözme potansiyeli incelenmiştir. Bu materyalin mekanik dayanımı, ışık kaynağının titreşim frekanslarını daha yüksek değerlere taşıyarak ışık titremesi etkilerini azaltmaktadır. Bu bulgu, özellikle ışık titremesi sorununu gidermek için yapısal takviyeler veya malzeme değişiklikleri gibi stratejilerin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.Sonuçlar, PBT malzemelerin otomotiv aydınlatma sistemlerindeki uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir. Bu da gelecekteki araştırmalara ve geliştirmelere zemin hazırlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Termoplastik, cam elyaf, modal test,sonlu elemanlar
2015, ix + 86 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF VIBRATION CHARACTERISTICS OF THERMOPLASTIC MATERIAL

Ezgi UZATICI SAĞLAM

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

Supervisor: Prof. Dr. Hande GULER ÖZGÜL

In This study; dynamically investigates the mechanical and dynamic properties of Polybutylene Terephthalate (PBT) materials with different glass fiber ratios, aiming to enhance the performance of lighting systems in the automotive industry. In the experimental part, PBT materials were prepared with different glass fiber ratios and subjected to tensile tests to determine basic material properties such as elastic modulus, density, and strength. These obtained data were used to create material models for performing modal analyses in a computer environment using the finite element method. The high agreement between the experimental modal analysis and theoretical results confirms the accuracy of the modeling process and reveals that this methodology can be confidently used in the design of automotive lighting systems. The study also investigated the potential of PBT GF50 material to solve the light flicker problem. The mechanical strength of this material reduces the effects of light flicker by shifting the vibration frequencies of the light source to higher values. This finding plays a critical role, especially in evaluating strategies such as structural reinforcements or material changes to address the light flicker issue. The results indicate that PBT materials are suitable for applications in automotive lighting systems. This paves the way for future research and development.

Key words: Thermoplastic, glass fiber, modal test, finite element analysis
2025, ix + 86 pages.

TEŞEKKÜR

Çalışmamı gerçekleştiriken bana teknik desteklerini sunan Prof.Dr.Hande GÜLER ÖZGÜLE'e, Yüksek lisans sürecimde desteklerini esirgemeyen Marelli Mako ailesine teşekkürlerimi sunarum.

Yöneticim Emre ÖZTÜRK'e, testlerin gerçekleştirilmesi konusunda ve teknik destek açısından desteklerini esirgemeyen Barış EDİZ'e ve Ar-ge EEV departmanına teşekkürlerimi sunarım.

Ezgi UZATICI SAĞLAM
07/05/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER 3
2.1. Polimer 5
2.1.1. Polimer Tanımı 5
2.1.2. Basamaklı(Kondenzasyon) Polimerizasyon 8
2.1.3. Katılma (Zincir) Polimerleşme 8
2.2. Polimerlerin Özellikleri 9
2.3. Polimerlerin Sınıflandırılması 11
2.4. Dinamik Analiz 12
2.5. Mekanik Titreşim 13
2.6. Titreşim Türleri 14
2.6.1. Sönümsüz Serbest Titreşim 15
2.6.2. Sönümlü Serbest Titreşim Hareketi 16
2.7. Deneysel Modal Analiz 18
2.8. Modal Test Yöntemleri ve Ekipmanları 21
2.8.1. Darbe Çekiç Test Yöntemi 21
2.8.2. Darbe Çekiç Uç Seçimi 24
2.8.3. Modal Sarsıcı Test Yöntemi 26
2.8.4. İvmeölçerler 27
2.8.5. Veri Toplama Sistemleri 28
2.9. Hızlı Fourier Dönüşümleri (FFT) 29
2.10. Modal Test Uygulama Çeşitleri 31
2.10.1. Tek Referanslı Gezdirilen Darbe Çekiç Testi 31
2.10.2. Tek Referanslı Gezdirilen İvme Ölçer Testi 32
2.10.3. Tek Referanslı Sarsıcı Testi 33
2.10.4. Çok Referanslı Modal Testler 34
2.11. Deneysel Modal Analiz Parametreleri 35
2.11.1. Frekans Cevap Fonksiyonu (FRF) 35
2.11.2. Tutarlılık 37
2.11.3. Modal Doğrulama (Modal Güvence Kriteri, MGM/MAC) 38
3. MATERYAL VE YÖNTEM 40
3.1. Darbe Çekiç 40
3.2. İvmeölçerler 41
3.3. Paket Programlar 41
3.4. Veri Toplama Sistemi 42
3.5. Test Edilen Malzemeler 43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 46

4.1. Test Numunelerinde Deneysel Çalışmalar 46
4.2. Test Numunelerinin Deneysel Modal Analizi 51
4.1.1. PBT numune Plakaları 51
4.1.2. PBT Plaka Üzerinde Darbe Çekiç Test Metodu 53
4.1.3. PBT Plaka Deneysel Modal Analiz Gösterimleri 56
4.3. Bilgisayar ortamında Modal Analiz Sonuçları 60
4.4. MEScope® Yazılımı Kullanılarak MGM Matrisinin Hesaplanması 65
4.5. Işık Titreşimi Problemi ve Çözümü 70
5. SONUÇ 82
KAYNAKLAR 83
ÖZGEÇMİŞ 86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
f	Doğal Frekans
ω_n	Sönümsüz Doğal Frekans
k	Yay Kat Sayısı
ζ	Sönüm Oranı
m	Cismimn Kütlesi
mm	Milimetre
H(ω)	Transfer Fonksiyonu
X(ω)	Tepki Fonsiyonunun Fourier Dönüşümü
F(ω)	Tepki Fonksiyonunun Fourier Dönüşümü
gr	Gram

Kısaltmalar	**Açıklama**
PBT	Polibütilen tereftalat
GF	Cam Fiber
PA	Polyamid
PMMA	Polimetil Metakrilat
PLA	Polilaktik Asit
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiran
PET-G	Polietilen Terefitalat Glikol
MGM/MAC	Modal Güvence Kriteri
FRF/FTF	Frekans Tepki Fonksiyonları
FCF	Frekans
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümleri
DFT	Ayrık Zamanlı Dönüşüm
DOF	Serbestlik Derecesi
UV	Ultraviole
Hz	Hertz

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Polimer zinciri (Kablo Yapıları, n.d.)	5
Şekil 2.2.	Şekillerine bağlı gruplandırılmış polimer zincirleri (Kalkan, 2022)	6
Şekil 2.3.	Basamaklı ve katılma polimerizasyonunun rastgele bir zamandaki molekül büyüklüğünün karşılaştırılması (Kalkan, 2022)	8
Şekil 2.4.	Sıcaklığa bağlı olarak polimerlerin yapılarındaki değişimler (Terzioğlu, 2021)	9
Şekil 2.5.	Polimerlerin sınıflandırılması (Terzioğlu, 2021)	11
Şekil 2.6.	Polimerlerin sınıflandırılması (Kalkan, 2022)	12
Şekil 2.7.	Titreşim sistemi (Maia & Montalvao e Silva, 1998)	14
Şekil 2.8.	Sönümsüz serbest titreşim (Maia & Montalvao e Silva, 1998)	15
Şekil 2.9.	Sönümlü serbest titreşim sistemi (Maia & Montalvao e Silva, 1998)	17
Şekil 2.10.	Sönümlü titreşim modeli (Thomson, 1993)	17
Şekil 2.11.	Deneysel modal analiz sistemi (Şekerci, 2013)	20
Şekil 2.12.	Fourier dönüşümü (Şekerci, 2013)	20
Şekil 2.13.	Darbe testi (Schwarz & Richardson, 1999)	22
Şekil 2.14.	Darbe çekiç	24
Şekil 2.15.	Darbe çekicinde kullanılan uçlar (Darbe Çekici Uçları, n.d.)	25
Şekil 2.16.	Modal sarsıcı (Modal Test Ve Modal Analiz, n.d.)	26
Şekil 2.17.	İvme ölçer bağlama şekilleri (Türker, 2005)	28
Şekil 2.18.	İvme ölçer yerleştirme şekilleri (Türker, 2005)	28
Şekil 2.19.	Fourier dönüşümü	29
Şekil 2.20.	Tek referanslı gezdirilen çekiç testi (Modal Test İpuçları: Darbe Çekici Gezdirme ve İvmeölçer Gezdirme, n.d.)	32
Şekil 2.21.	Tek referanslı gezdirilen ivmeölçer testi (Modal Test İpuçları: Darbe Çekici Gezdirme ve İvmeölçer Gezdirme, n.d.)	33
Şekil 2.22.	Modal sarsıcı test sistemi(Çal, 2024)	34
Şekil 2.23.	Çok referanslı modal sarsıcı testi (Modal Test Ve Modal Analiz, n.d.)	35
Şekil 2.24.	Frekans cevap fonksiyonu	36
Şekil 2.25.	Frekans cevap fonksiyonu	37
Şekil 2.26.	MAC matrisi	38
Şekil 3.1.	Darbe çekici	40
Şekil 3.2.	DYTRAN ınstruments ivmeölçer modeli	41
Şekil 3.3.	ANSYS WB® R23.2 arayüzü	42
Şekil 3.4	MEScope® arayüzü	42
Şekil 3.5.	NI USB-4431 veri toplama sistemi	43
Şekil 3.6.	Granül PBT malzemesi (*Otomobil Üreticileri ve Tedarikçileri İçin Değiştirilmiş Pbt Mühendislik Plastik Pbt Gf30 Plastik Hammadde*, n.d.)	45
Şekil 4.1.	ISO 527-4 çekme testi numunesi boyutları	47
Şekil 4.2.	Çekme testi numuneleri	47
Şekil 4.3.	Çekme testi	48

Şekil 4.4. Cam fiber oranına göre PBT malzemesinin gerilim gerinim diyagramı 48
Şekil 4.5. Test plakaları 49
Şekil 4.6. Dört test plakası için kullanılan sonlu elemanlar modeli 50
Şekil 4.7. Test plakaları ağırlıkları 50
Şekil 4.8. PBT plaka geometrisi 52
Şekil 4.9. Deneysel modal test için işaretlendirilmiş test plakaları 52
Şekil 4.10. Test plakaları düzenekleri 53
Şekil 4.11. 24 noktalı PBT GF10 FRF sonuçları 54
Şekil 4.12. 24 noktalı PBT GF20 FRF sonuçları 54
Şekil 4.13. 24 noktalı PBT GF30 FRF sonuçları 55
Şekil 4.14. 24 noktalı PBT GF50 FRF sonuçları 55
Şekil 4.15. PBT GF10 deneysel modal test ilk 4 mod sonuçları 57
Şekil 4.16. PBT GF20 deneysel modal test ilk 4 mod sonuçları 58
Şekil 4.17. PBT GF30 deneysel modal test ilk 4 mod sonuçları 59
Şekil 4.18. PBT GF50 deneysel modal test ilk 4 mod sonuçları 60
Şekil 4.19. PBT GF10 bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 mod sonuçları 61
Şekil 4.20. PBT GF20 bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 mod sonuçları 62
Şekil 4.21. PBT GF30 bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 mod sonuçları 63
Şekil 4.22. PBT GF50 bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 mod sonuçları 64
Şekil 4.23. PBT GF10 plakası MGM matrisi ve MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu) 66
Şekil 4.24. PBT GF20 plakası MGM matrisi ve MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu) 66
Şekil 4.25. PBT GF30 plakası MGM matrisi ve MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu) 67
Şekil 4.26. PBT GF50 plakası MGM matrisi ve MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu) 67
Şekil 4.27. Işık titremesinin ön aydınlatma grubunda gösterilmesi 71
Şekil 4.28. Cut off line çizgisinin yol üzerinde gösterilmesi 72
Şekil 4.29. Işık titremesi çalışması yapılan ön aydınlatma grubu 73
Şekil 4.30. Modal analiz sonucu ışık titreşiminin inceleneceği bölge 73
Şekil 4.31. Ön aydınlatma grubunun 1.mod şekli ve frekans bilgisi 73
Şekil 4.32. Ön aydınlatma grubunun 2.mod şekli ve frekans bilgisi 74
Şekil 4.33. Ön aydınlatma grubunun 3.mod şekli ve frekans bilgisi 74
Şekil 4.34. Ön aydınlatma grubunun 4.mod şekli ve frekans bilgisi 75
Şekil 4.35. Yapısal iyileştirme yardımı ile ışık titreşiminin önüne geçilmesi 76
Şekil 4.36. Işık kaynağı dışındaki parçalarda iyileştirme yapılması 77
Şekil 4.37. Işık titremesini azaltmak için konulan yay 77
Şekil 4.38. Holding frame 1.modal analiz 1.mod şekli 78
Şekil 4.39. Ön aydınlatma grubunun 1.mod şekli ve frekans bilgisi 79
Şekil 4.40. Ön aydınlatma grubunun 2.mod şekli ve frekans bilgisi 80
Şekil 4.41. Ön aydınlatma grubunun 3.mod şekli ve frekans bilgisi 80
Şekil 4.42. Ön aydınlatma grubunun 4.mod şekli ve frekans bilgisi 81

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	NI USB-4431 veri toplama sistemi genel özellikleri	43
Çizelge 4.1.	PBT malzeme özellikleri	49
Çizelge 4.2.	PBT Test plakaları ağırlık bilgisi	51
Çizelge 4.3.	PBT GF10 plaka analiz sonuçları	56
Çizelge 4.4.	PBT GF20 plaka deneysel modal analiz sonuçları	57
Çizelge 4.5.	PBT GF30 plaka deneysel modal analiz sonuçları	58
Çizelge 4.6.	PBT GF50 plaka deneysel modal analiz sonuçları	59
Çizelge 4.7.	PBT GF10 plaka bilgisayar destekli modal analiz sonuçları	61
Çizelge 4.8.	PBT GF20 plaka bilgisayar destekli modal analiz sonuçları	62
Çizelge 4.9.	PBT GF30 plaka bilgisayar destekli modal analiz sonuçları	63
Çizelge 4.10.	PBT GF50 plaka bilgisayar destekli modal analiz sonuçları	64
Çizelge 4.11.	PBT GF10 plaka bilgisayar destekli modal analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması	68
Çizelge 4.12.	PBT GF20 plaka bilgisayar destekli modal analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması	68
Çizelge 4.13.	PBT GF30 plaka bilgisayar destekli modal analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması	69
Çizelge 4.14.	PBT GF50 plaka bilgisayar destekli modal analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması	70
Çizelge 4.15.	İlk 4 mod frekans bilgisi	75
Çizelge 4.16.	PBT mekanik malzeme özellikleri	79
Çizelge 4.17.	İlk 4 mod frekans bilgisi	81

1. GİRİŞ

Günümüz koşullarında gelişen ve gelişme ivmeside hızla devam eden bir rekabet söz konusudur. Bunun sonucu olarakta farklı malzemeler denenmekte ve kullanılmaktadır.Bu denemeler yapılırken kullanım alanına bağlı olarak karşılaması beklenilen özellikler mevcuttur. Otomotiv, savunma ve beyaz eşya vb. sanayi sektörlerinde de bu rekabetçi yaklaşım devam etmektedir. Bu pazarın devamlılığını sürekli halde tutmak için, yeni gelişmiş yada gelişmekte olan teknolojileri yakından takip etmek ve uygulanabilirliğini arttırmak ile mümkündür. Yenilikçi yaklaşımlarda malzeme de önemli bir rol almaktadır. Sektöre bazı değişken olmakla birlikte kompozit malzemlerin kullanımıda gün ve gün artmaktadır. Kompozit malzemelerin aşağıda da belirtiği avantajları ile birlikte kullanılırlığı daha çok olmuştur.

Bu avantajlar;

- Yorulma dirençleri alüminyum ve çelikle kıyaslanında daha yüksek çıkması.
- Kompozit malzemelerin sertlik/özgül ağırlık oranları incelendiğinde alüminyum ve çeliğe göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir.
- Çelik ve alüminyum malzemelerde korozyon direncini arttırmak için yüzey üzerine kaplama yapmak gerekebiliyor fakat; kompozit malzemelerin yüzeyleri genel olarak plastik yapıda olduğu için buna ihtiyaç duyulmamaktadır.(Erdoğan, 2016)

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak aydınlatma sektöründe de çok farklı far tasarımları istenmeye başlanmıştır. Bir far tasarlanırken hem estetik gereklilikler hemde yapısal gereklilikler sağlanmalıdır. Ayrıca gelişmeler ve beklentilerle birlikte farlara yeni ünitelerde eklenmeye başlanmıştır. Gün ve gün eklenen bu yenilikler hem mühendislerin daha yüksek titreşim seviyelerinde çalışmasını hemde kullanılan yeni malzemelerin bu titreşim şartlarında dayanıklılığının araştırılması gerekliliğini ortaya çıkartır.Kullanılmaya başlanan her malzeme beraberinde getirdiği soru işaretleri ile daha önce yapılan çalışmaların tekrarlanması yada yeni çalışmaların yapılmasını gerektirir.

Aydınlatma ürünlerinde titreşim ve yapının titreşim altında gösterdiği davranış oldukça önemlidir.Tasarım süreçlerinde ve üretimde hem deneysel hemde bilgisayar destekli mühendislik önem kazanmaktadır.

İncelenen tezler ve makaleler neticesinde birçok alanda oluşan yeni istemleri karşılamak için ihtiyaç duyulan yöntemleri ve doğrulanma şekilleri hakkında fikir vermiştir.Bu çalışma konuları kendi çalışmamıza ışık tutmuştur.

Çalışma konumuza geçmeden önce genel bir giriş yapmak gerekirse; mühendislikte yapılan yeni tasarımlar, kullanılması plananlanan yeni malzemeler ve tasarımın sağlaması gereken yapısal ve dinamik gereklilikler oluşturulan yeni tasarımlarım hem dinamik vede statik yükler altında dayanımını inceleme gerekliliği getirmiştir.Özellikle otomotiv aydınlatma sektöründe tasarımların belirli dinamik yükler altında dayanımının incelenmesi gerekmektedir. Tasarımlarda belirli dinamik etkiler altında davranışlarının incelenebilmesi için titreşim karakteristiklerini bilmem gerekir. Bahsi geçen titreşim karakteristikleri ise doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı şeklinde sıralanabilir. Bu karakteristikleri bilmek hem hangi malzemenin hangi tasarımda kullanılcağı hakkında bize fikir verebilir hemde etki eden dinamik yükler altında dayanıp dayanmayacağı hakkında fikir yürütmemizi sağlayabilir.

Bu çalışmada ise başka sektörlerde de kullanılan farklı cam fiber oranına sahip termoplastiklerin titreşim karateristiklerinin belirlenmesi, modal parametrelerinin incelenmesi ve bilgisayar destekli mühendislik ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bilgisayar destekli mühendislik çalışmaları ANSYS WB® programında gerçekleştirilmiştir. Deneysel modal testlerde ise etki kuvvetini oluşturmak için çekiç sonrasında oluşan titreşim değerlerinin ölçümü içinde modal ivmeölçerler kullanılmıştır. Elde edilen sinyaller NI USB-4431 veri toplama programında kullanılarak FRF çıktıları incelenmiş. Bu çıktılarla birlikte doğal frekans ve akabinde sönüm oranları belirlenerek kullanılan plakaların mod şekilleri eğri uydurma yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu şekilde termoplastik malzeme içerisindeki katkı oranına bağlı olarak elde edilen dinamik karakteristikler ve malzemenin dayanımı birbiriyle karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER

Çalışmamız için gerekli olan deneysel modal analiz çalışmaları düşünüldüğünde geçmiş çalışmalarda incelendiğinde birçok çalışma mevcuttur. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte tabiki deneysel modal analiz çalışmaları da bu gelişimden etkilenmiştir. Deneysel modal analiz yardımı ile test plakası için yapının titreşimi, sönüm oranı, dinamik karakteristikleri gibi özellikleri incelenmiştir. İncelenen plakalar içerisinden yapısal alanda ve kullanılcak alana göre malzeme seçimi konusunda fikir verilmesi amaçlı yorum yapılcak veriler elde edilmiştir.Sektörlerin farklılık göstermesi ile birlikte teknolojide gelişimler değişmiştir ve bu değişimlerden etkilenen alanlar gelişmiştir. Örneğin;

Roucoules vd. (2012) yaptıkları çalışmada, ön aydınlatma içerisinde yer alan modülün lens braketini %30 fiber katkılı olarak üreterek deneysel modal analiz ve bilgisayar destekli sonlu elemanlar yöntemiyle analiz ederek sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Buna ek olarak elde ettiği sonuçları akış analizi yaparak fiber oryantasyonlarının young modülüne etkisini göstermiştir.

Yılmaz ve Uysal (2021), Trapez sacların titreşim davranışlarını sonlu elemanlar ve deneysel modal analiz ile incelemişler. Farklı trapez sac geometrileri için sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirmişler ve sonlu elemanlar analizlerini doğrulamak adına deneysel modal analizler gerçekleştirmişlerdir.

Liese vd. (Liese et al., 2003), değişen ve yeni eklenen beklentilerle birlikte aydınlatma grubunda seçilmesi gereken malzemelerin sahip olması gereken özellikler üzerine bir çalışma yapmıştır.

Ediz vd. (2022), Ön aydınlatma grubu üzerinde rezonans frekanslarının ışık kaynağı üzerinde olup olmadığı incelenmiştir. Hem aracı kullanan hemde karşıdan gelen sürücü için rahatsız edici olan bu durumun ölçülerek tayin edilmesi önemlidir. Çalışmada ışık titreşiminin hassas ve verimli bir ölçümü incelenmiştir.

Pirvu vd. (2014), iki farklı polimer karışımın (PBT + 10% aramid lif ve PA + 10% aramid lif) çekme özellikleri çekme testi yapılarak birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Stork vd. (2001), arazi araçlarında kullanılan egzoz sistemlerinde üç farklı sınır koşulu altında modal testleri yapılmıştır. Bunlar; serbest-serbest,iki elastomerik eleman kullanılarak desteklenmiş ve araca montajlanmış şeklinde sıralanan üç farklı şekilde uygulanmıştır. Serbest-serbest mod parametreleri sonlu eleman sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İkinci test; sert ve ağır bir çerçeveye sabitlendiği durumda gerçekleştirilmiştir. Çerçevenin rijitliği deneysel olarak doğrulanmıştır. Araç üzerindeki test, egzoz yapısının motor manifolduna ve iki elastomerik montaja sabitlendiği gerçekçi sınır koşulları ile yapılmıştır. İki montaj ve araç üzerindeki testler, son derece karmaşık mod şekilleri ile sonuçlanmaktadır. Deneysel modal analiz sonuçlarından elde edilen sonuçlar ve sonlu elemanlar modellerinden elde edilen sonuçlar ile doğrulama sağlanmıştır.

Schwarz ve Richardson (1999), deneysel modal analiz süresince kullanılan ekipmanların ve parametrelerin belirlenmesine (doğal frekans, titreşim, sönüm oranı, mod şekilleri) kadar gerçekleşen bütün aşamaları özetleyen bir çalışma sunmuşlardır.

Ay vd. (Ay et al., 2019; Erdemir & Ozkan, 2019), makalesinde otomotivde arka aydınlatmada kullanılan lenslerin sonlu elemanlar yardımıyla modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda doğal frekanslar ile mod şekilleri incelenmiştir. Çalışmanın paralelinde PMMA malzemesinden yapılan lensin darbe çekici ve ivme ölçer kullanılarak modal testi gerçekleştirilmiştir. Hem sonlu elemanlar yardımıyla yapılan modal analiz hemde modal test sonuçları karşılaştırılmıştır ve hata oranlarına ulaşılmıştır.

Erdemir ve Özkan (2019), makalesinde kullanım yerine bağlı olarak değişicek şekilde vidalama ve kimyasal yapıştırıcı kullanılarak parçaları birbiri ile birleştirmek yerine esneyerek kilitlenen bağlantıların kullanılması da görülmektedir. Bu çalışmada esneyerek kilitlenen bağlantı elemanlarında Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Bütadien Stiren

(ABS) ve Polietilen Terefitalat Glikol Kopolimer (PET-G) malzemleri kullanılarak modal analizleri gerçekleştirildi ve akabinde harmonik cevap analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

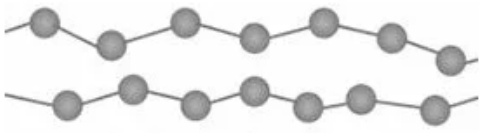
Ay (Ay, 2019; Şahin, 2009) farklı geometrik şekillere sahip PMMA malzemeden yapılmış arka aydınlatmada kullanılan lenslerin modal testi ve sonlu elemanlar yardımıyla modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde doğal frekans,sönüm oranı ve mod şekilleri elde edilmiştir. Test ve bilgisayar ortamında elde edilen sonuçlar birbiri ile kaşrılaştırılmış ve Modal Güvence Matrisleri (MGM) bulunmuştur.

2.1. Polimer

Bu bölümde tezin konusu gereği polimerin ne demek olduğu,sınıflandırılması, polimerlerin elde edilişi ve kullanım alanlarından bahsedilecektir.

2.1.1. Polimer Tanımı

Polimeri açıklamak için kelime anlamından yardım alınarak bir açıklama yapılabilir. ‘’Polimer’’ kelimesinin kökenine baktığımızda Yunancadan geldiğini görmekteyiz. ‘’polus’’ çok anlamına gelir, ‘’meros’’ kelimesi ise parça anlamına gelmektedir. Kelimenin Yunanca anlamıyla da bakıldığında polimerler, birden fazla aynı yada farklı küçük moleküllerin yani monomerlerin kimyasal bağlar ile az yada çok düzenli bir şekilde oluşturmuş oldukları uzun zincirli, moleküllerdir. Polimerler doğal yada sentetik olabilirler (Altındal, 2009).

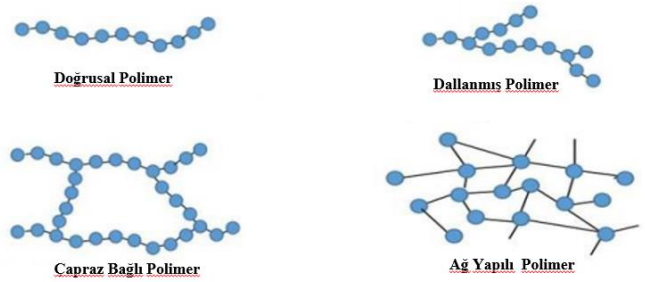


Şekil 2.1. Polimer zinciri (Kablo Yapıları, n.d.)

Monomerler birbirleriyle kimyasal bağlar ile bağlanması durumu aynı zamanda zincire de benztilmektedir. Bu yüzden polimer zinciri olarakta anılmaktadır. Şekil 2.1'de örnek bir polimer zinciri gösterilmiştir. Bu polimer zincirini oluşturan temel atom dizilimi mevcuttur.Buna ana zincir adı verilmektedir. Bazı atomlar ise bu ana zincire bağlanıp yan grup şeklinde adlandırılan yapıyı oluşturur. Polimerlerin bir sürü çeşidi mevcuttur,işte bu çeşitleri yan grup olarak adlandırılan zincire bağlanan atom gruplara göre belirlenir. Diğer bir değişle yan gruba bağlanan atomlar polimerlerin tanımları ve sahip oldukları özellikler değişkenlik göstermektedir (Terzioğlu, 2021).

Polimerleri atomların bağlanma durumlarına göre gruplandırma yoluna gider isek;

- Doğrusal polimer
- Dallanmış polimer
- Çapraz bağlı polimer
- Ağ yapılı polimer



Şekil 2.2. Şekillerine bağlı gruplandırılmış polimer zincirleri (Kalkan, 2022)

Doğrusal polimer Şekil 2.2'deki gibidir. Zincir yapısından da anlaşıldığı üzere herhangi bir yan grup olmadan van der waals ve hidrojen bağları yardımı ile diz bir zincir oluşturucak şekilde bağlanması ile oluşan polimerlerdir. Bağ yapılarından da anlaşılabilceği üzere kovalent bağ olmadığı için uygun çözücülerle çözünebilir ve bu şekilde yeniden şekillendirilebilirler. Kristallenmeleri oldukça kolaydır. En yaygın şekilde kullanılan doğrusal polimerlere örnek vermek gerekirse; polietilen, poli(vinil klorür),polistiren,poli(metil metakrilat),naylon ve florokarbonlardır. Dallanmış zincirler Şekil 2.2'deki gibidir. Dallanmış zincir olarak adlandıralabilmesi için ana polimer

zincirinde en az bir tane yan grup olması gerekmektedir. Ana zincir ile yan grup birbirlerine kovalent bağlar ile bağlanmıştır. Dallanmış zincir polimerlerde kendi içerisinde kısa veya uzun olacak şekilde sınıflandıralabilir. Özellikler bakımından bakıldığında doğrusal polimerlerin özelliklerini göstermektedirler.Fakat; doğrusal polimerlere kıyasla çok daha kolay çözünürler.

Çağraz bağlı polimerler Şekil 2.2'deki gibidir. Polimer bağlarının çapraz olacak şekilde diğer ana zincire bağlanması ile oluşan polimerlere çaprak bağlı polimerler adı verilir. Oluşan bağların çeşidi kovalent bağdır. Doğrusal polimerler ile kıyaslandığında çapraz bağlı polimerler çözünemezler. Oluşturdukları çapraz bağlardan dolayı polimer zincirleri hareket edemezler ve bunun doğurduğu bir sonuç olarak eritilip tekrar şekillendirme özellikleri söz konusu değildir (Kalkan, 2022).

Polimerizasyon sürecini; başlama çoğalma ve sonlanma olacak şekilde sıralayabiliriz.Bunlardan kısaca bahsetmek gerekir ise;

- Başlama: Başlatıcı yardımıyla monomerlerin kimyasal özelliklerini değiştirip diğer atomlarla birlikte bağ kurmaya başlar ve bu şekilde monomerler polimerlere dönüşmeye başlayabilir.
- Çoğalma: Polimerleşme aşamasına uygun monomerlerin diğer monomerler ile birlikte bağ kuracak şekilde iki yada ikiden fazla monomer bileşmek suretiyle polimer zinciri yapısını oluşturur.
- Sonlanma: Zincirde mevcut olan aktif iki ayrı ucun pasif duruma gelmesiyle birlikte yapı kararlı duruma geçer ve ardından polimerleşme süreci bitmiş olur (Terzioğlu, 2021).

Birbirinden farklı kimyasal reaksiyonların kullanılması ile farklı çeşitlerde polimerler elde edilmektedir. Polimerleşme süreci kondendasyon (basamaklı) ve katılma(zincir) olacak şekilde iki ayrı grupta incelenebilir (Kalkan, 2022).

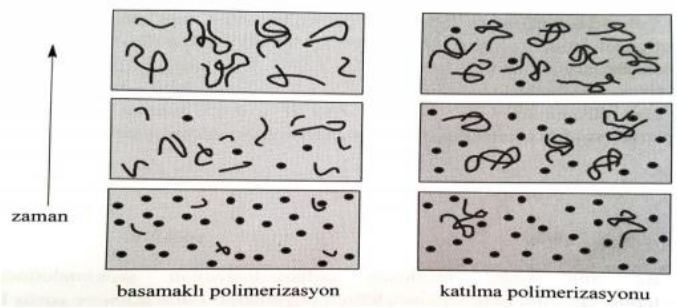
2.1.2. Basamaklı(Kondenzasyon) Polimerizasyon

Bu polimerizasyon yöntemi laboratuarlarda uygunlanabilirlik açısından en uygun yöntemdir. Bundan dolayı endüstride en çok basamaklı polimerizasyon yöntemi kullanılır.

Basamaklı polimerleşme tepkimelerinde işlem fonksiyonel gruplar arasında aşama aşama gerçekleşmeye başlar. Öncelikle bir monomer diğer monomer ile tepkimeye girerek dimer oluşturur. Dimer ise diğer bir monomer ile birleşerek trimer ile birleşerek tetramere döünüşür. Tekramer oluşumu için her seferinde bir dimerin bir monomer ile birleşmesine gerek yoktur. Kendisi gibi bir dimer ile birleşerekte tepkimeye girip zinciri büyütmeye devam edebilir.Bu şekilde mol kütlesi aşamalı bir şekilde artar ve bu uzun bir zaman içerisinde gerçekleşir (Altındal, 2009).

2.1.3. Katılma (Zincir) Polimerleşme

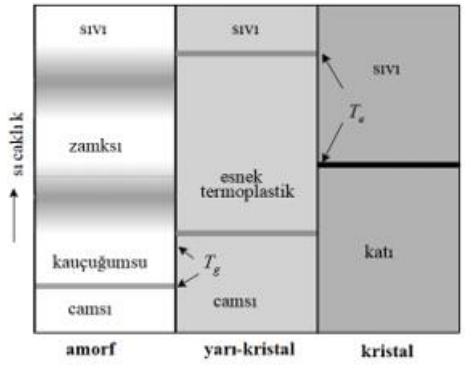
Bu polimerleşme türünde polimerleşme monomerlerin direk birbirlerine bağlanarak makro molekülü oluşturmaya başlarlar. Polimerizasyon işlemi başlatıcı yardımı ile active edilmektedir. Bundan sonra monomerler diğer monomerlere direk bir şekilde katılmaya başlar. Bu işlem hızlı gerçekleşir. Hızlı gerçekleşmesinden dolayı yüksek mol kütleli polimerlerin yanında tepkimeye girmemiş Şekil 2.3'deki gibi monomerler bulunmaktadır (Altındal, 2009).



Şekil 2.3. Basamaklı ve katılma polimerizasyonunun rastgele bir zamandaki molekül büyüklüğünün karşılaştırılması (Kalkan, 2022)

2.2. Polimerlerin Özellikleri

Polimerler diğer malzemeler ile kıyaslandığında oldukça geniş özelliklere sahiptirler. Polimerler zamksı, kauçuksu, sıvı, esnek termoplastik ve sert durumlarda bulunabilirler. Bu özellikler ısıya bağlı olarak değişme eğiliminde olan bu yapı polimerlerin Şekil 2.4'teki sırasıyla amorf, yarı kristal yada kristal durumda olmasına bağlı olarak değişkenlik gösterir (Kalkan, 2022).



Şekil 2.4. Sıcaklığa bağlı olarak polimerlerin yapılarındaki değişimler (Terzioğlu, 2021)

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi camsı geçiş sıcaklığı olarak bilinen T_g sıcaklığı öncesinde gösterdiği özellik katı ve gevrektir. Ardından sıcaklığın artımıyla birlikte malzeme yumuşamaya başlar ve kademeli bir şekilde erime gerçekleşene kadar bu devam eder.Şekil 2.4'te görüldüğü gibi erime sıcaklığı olan T_e sıcaklığına geldiğinde hızlı bir şekilde katı halden sıvı hale geçiş görülür. Bununla beraber özgül hacminde de farklılık oluşur. Amorf ve kristal yapılar karşılaştırıldığında bu şekilde bir fark söz konusudur.

Yarı kristal yapılı polşmerlerin gösterdiği özellikler ise hem amorf hem de kristal yapının sahip olduğu özellikleri gösterirler. Yarı kristaller amorf yapılarıdaki gibi T_g sıcaklığına kadar camsı yapıda bulunur, T_g sıcaklığının üzerinde ise esnek bir termoplastik özelliklerini göstermeye başlarlar. T_e sıcaklığından sonra ise sıvı hale geçiş yapmış olur (Terzioğlu, 2021).

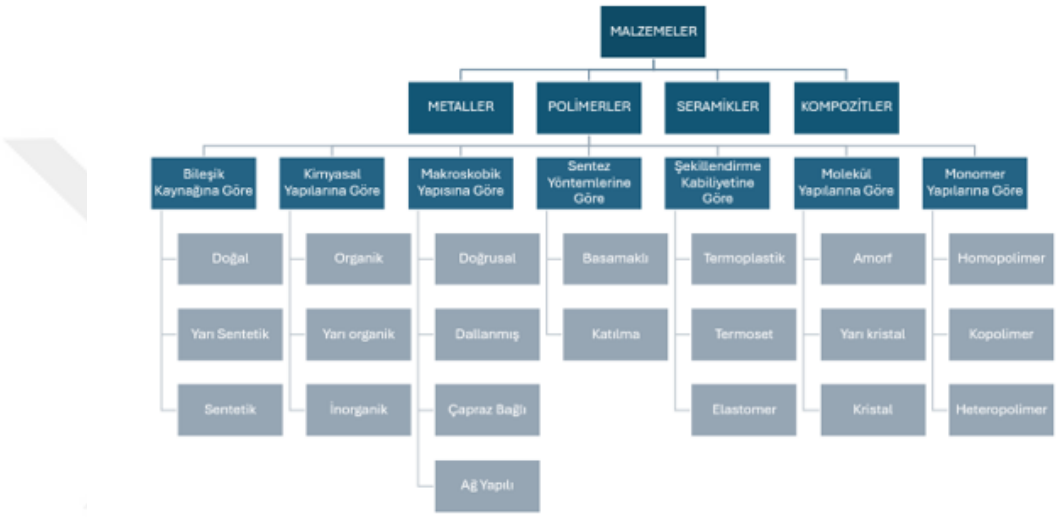
Polimerler metaller ile kıyaslandığında mekanik özellikleri ve bunun yanında ısıl dayanımları oldukça düşük olduğundan dolayı metallerin etkilenmeyeceği düşük sıcaklıklarda polimerlerin özellikleri tamamen bozulma gözlenebilir. Malzemelerin mekanik özellikleri, iç yapılarındaki değişikliklere bağlı olarak sıcaklıkla değişir. Bu değişimler, molekül ağırlığı, kristalleşme, çapraz bağlanma ve zincir sertliği gibi faktörlerden etkilenir.

Polimer yapısında bulunan kovalent bağlar son yörüngede bulunan elektronların hareketini kısıtlar bu yüzdendir ki elektrik ve ısı iletimi polimerlerde mümkün değildir. Kovalent bağın sebep olduğu bir diğer özellik ise kimyasal dirençleri çok yüksektir, aside ve korozyona dayanıklıdırlar. Korozyon için konuşur isek bazı polimerlerde beyazlaşma ile kendini gösteren korozyon bulunur fakat;metaller gibi ilerle hızı yüksek değildir (Terzioğlu, 2021).

Polimer malzemeler üretimde hammadde olarak sıkça kullanılır. Bunun nedenleri incelendiğinde en önemli neden maliyeti, hammaddeye ulaşım kolaylığı ve polimerin sahip olduğu özelliklerin kullanılacak alanda ihtiyaç duyulmasıdır. Bu tezde otomiv sektöründe kullanımı incelenmiştir. Otomotiv sektöründe kullanımının yaygınlığına bakıldığında oldukça yüksektir. Polimerlerin otomotiv sektöründe rağbet görmesinin sebeplerine bakıldığında artan maliyetleri polimerlerin maliyet düşüklüğü ile dengelemek, karmaşık tasarımları polimer ile üretiminin kolaylığı ve metaller ile kıyaslandğında ağırlıklarının daha düşük olmasıdır. Otomotiv sektöründe karşılaşılan karbon emisyonlarını düşürmek gelecek nesiller için oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle ağırlık olarak daha düşük ağırlıklı malzemeler kullanarak bir aracın ağırlığını azalma konuları artık önemli bir noktaya gelmiştir (Uzatici Sağlam et al., 2023).

2.3. Polimerlerin Sınıflandırılması

Geniş özelliklere sahip olan polimerleri sınıflandırma aşmasına geldiğimizde çok farklı gruplar oluşturarak sınıflandırma mevcuttur. Fakat; genel bir sınıflandırmaya bakıldığında Şekil 2.5'teki sınıflandırma kullanılabilir.

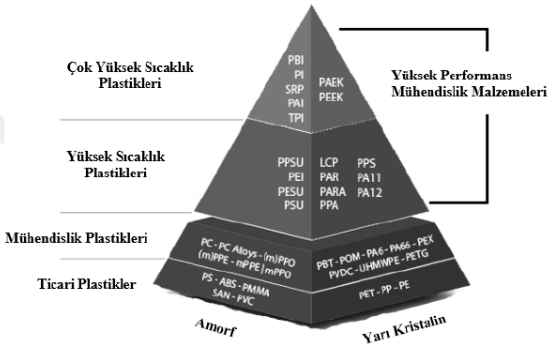


Şekil 2.5. Polimerlerin sınıflandırılması (Terzioğlu, 2021)

Şekil 2.5'ten de anlaşılcağı üzere polimerlerin birçok alt kolu mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılanlarından biri termoplastiklerdir. Termoplastiklerin kullanım alanlarının geniş olmasını sağlayan birçok özelliği mevcuttur.

Termoplastikler, çapraz bağ bulundurmayan polimerlerdendir. Basınç ve ısı ile birlikte yumuşama eğiliminde olurlar ve kolaylıkla yeniden şekillendirebilirler. Isıtıldıkları zaman özellikle T_g sıcaklığı üzerinde diğer sıvılar gibi bulundukları kalıbın şekilini almaları kolaydır. Fakat bu şekilde üretim prosesine uygun olması için bulunduğu kabın şekilini alması yeterli olmaz, sonrasında yani soğuduğunda almış olduğu şekili koruması gerekir. Bu bakımdan bakıldığında termoplasik polimerler buna uygundur. Termoplastik malzemeler yeniden şekillendirmeye uygundurlar fakat; bunun süreklilik durumu yoktur. Yeniden şekillendirme için eritilme işlemi birkaç kez tekrarlanması durumunda polimer

zincirlerinin kırılması söz konusu olabilir. Bu problemden dolayı geri dönüşüm konusunda bir takım sınırlamaları mevcuttur (Terzioğlu, 2021).



Şekil 2.6. Polimerlerin sınıflandırılması (Kalkan, 2022)

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi termoplastik malzemelerden örnekler verilmiştir. Termoplasitkler sağlamlık, kolay şekil alabilme ve geri dönüşüm avantajlarındna dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Kısaca örnek vermek gerekirse; çocuk oyuncakları, ambalajlar ve ev eşyalarında kullanımı yaygındır.

2.4. Dinamik Analiz

Bir sistem üzerinde birden ya da büyüklüğü zamana bağlı bir şekilde etkiyorsa bu tür sisteme dinamik bir system denilebilir. Dinamik bir yükleme durumunda sistemde kütle ve ivmenin etkisi oluşmaya başlar. Dinamik sistemlerin analizinde varolan dinamik denge ve zamana bağlı deformasyon durumu ihmal edilmemelidir. Bu şekilde yapılan analize dinamik analiz denir.

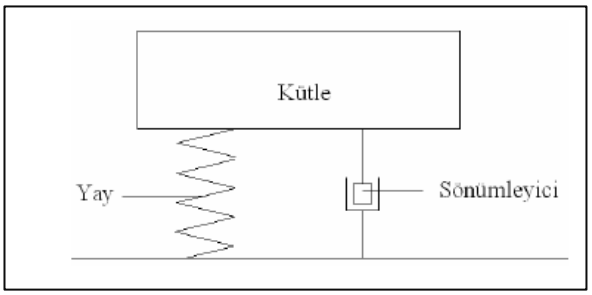
Sistemlerin hepsi incelendiğinde aslında hepsi birer dinamik sistemdir. Çünkü sistemin statik kabulünü gerektiren şartlar her zaman sağlanmayabilir(yükün oldukça yavaş hareket etmesi,yükün kademe kademe uygulanması). Fakat; statik analiz bir yaklaşımdır ve yapılan yaklaşım ışığında kullanılabilir bilgiler vermektedir.

Dinamik yükleme sonucu oluşan titreşimler mevcuttur ve bu titreşimler sakıncalı bir durum oluşturabilir. Genel olarak bakıldığında sistem üzerinde mühendisliğin inceleme alanı olan yorulma, dinamik gerilme, aşınma,çatlakların oluşması, titreşim altındaki parçalar arasındaki boşlukların artması, dönen parçalarda dengesizlikler, yataklarda bozulma, boşa harcanan enerji gibi sorunlar ortaya çıkartmakla birlikte rahatsızlık düzeyinde oluşan ses ve gürültü de oluşmaktadır.

Sistemin doğal frekansı ve verilen uyarıya verdiği cevap günümüz şartlarında sahip olduğumuz teknoloji ve teorik hesaplamalar ışığında mutlaka önceden analiz edilmeli ve çıktılar bilinmelidir. Doğal frekansların önceden bilinmesi önemlidir. Eğer yapı doğal frekansı ile aynı frekansta bir uyarıya maruz kalıyorsa rezans durumu meydana gelebilir. Bu sistem üzerinde büyük genlikler oluşturur bunun sonucu olarak büyük gerilme ve gürültü ortaya çıkar. Doğal frekansın önceden bilinmesi ile yapı üzerinde tasarım değişiklikleri yapılarak doğal frekansı değiştirilebilir (Şekerci, 2013).

2.5. Mekanik Titreşim

Titreşim dinamiğinin bir alt koludur ve tekrarlanan hareketler ile ilgilenir. Sistemler veya parçalar ani veya zamanla değişen yükler altında çalışabilir. Katı bir yapı elastik bir şekilde deforme edilip ardından serbest bırakıldığında denge konumuna gelene kadar salınır. Denge konumu etrafında salınımlar yapan cismin bu hareketi titreşim olarak adlandırılır. Dinamik yükler, mekanik sistemlerde tehlikeli salınımlara, gürültüye, yorulmaya, aşınmaya ve performans kaybına neden olur. Bu yüzden sistemin cevabı kontrol edilmelidir. Birim zamanda oluşan salınım sayısına frekans denir. Denge konumundan bir miktar yapmış olduğu yer değiştirmede genliktir. Gerçek hayat şartlarında bu salınım hareketi sönümden dolayı sonsuza kadar devam etmez.Sistem üzerinde bir titreşimin oluşabilmesi için sistem üzerinde bir atalet ve bir yay elemanı olması gereklidir (Baldan, 2018). Bahsedilen basit titreşim modeli Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Titreşim sistemi (Maia & Montalvao e Silva, 1998)

Şekil 2.7'de görülen titreşim modelinde potansiyel enerji kinetik enerjiye, kinetik enerji de potansiyel enerjiye dönüşür. Bu sebeple titreşim yapan sistemlerde muhakkak potansiyel enerji ve kinetik enerji depolayan sistemlerin bulunması gerekmektedir. Yay veya elastik elemanlar potansiyel enerjiyi, kütle veya atalet elemanları da kinetik enerjiyi depolayan elemanlardır. Yay veya elastik elemanlar potansiyel enerjiyi depolar ardından bu enerjiyi kütle veya atalet elemanına kinetik enerji şeklinde geri verir (Üniversitesi et al., n.d.).

Titreşim hareketi periyodik ve random (gelişigüzel) titreşim hareketi olarak iki sınıfa ayrılabilir. Periyodik titreşim hareketi, belirli bir sürede aynen yada kısmen tekrar etme özelliği bulunan harekettir. Random titreşim hareketinde ise, zaman içerisinde tekrarlanabilme özelliği bulunmamaktadır (Fu & He, 2001).

Titreşim hareketinin gerçekleşmiş olduğu eksen sayısı, serbestlik derecesi olarak tanımlanır. Pratikte, bir titreşim hareketi birçok farklı doğrultuda veya eksende ortaya çıkabilir. Bu nedenle, titreşim hareketi üç adet doğrusal eksende (x, y ve z) ve üç adet açısal doğrultuda (rx, ry ve rz) ölçülmektedir (*ISO 2631-1,* n.d.).

2.6. Titreşim Türleri

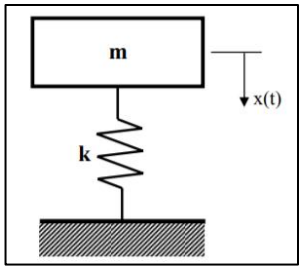
Titreşim alt başlıklarda incelenmek istendiğinde şu şekilde incelenebilir; serbest, zorlamalı ve sönümlü titreşim. Serbest titreşim düşünüldüğünde şayet halihazırda bulunan bir sistem mevcut ilk şartlarından dolayı titreşmekte ise bu serbest titreşim olarak

adlandıralabilir. Bu titreşim türüne örnek vermek gerekirse en çok verilen örneklerden biri; salıncak üzerinde bulunan bir kişiyi arkasından ittirmek ve ardından serbest bırakmak bu titreşim türüne bir örnek olarak verilebilir. Bir diğer örnek ise; akort çatalına dokunmak ve hemen ardından bu çatalı salınmaya bırakmakta örnek verilebilir. Diğer bir titreşim türüne geçtiğimizde ise; mevcut bir sisteme zaman ile beraber değişen bir girdi uygularsak bunun karşılında zorlamalı titreşim elde ederiz. Etkilere örnek vermek gerekir ise; ivme, yük, yer değiştirme ya da hız örnek verilebilir. Örnek verilen bu etkiler periyodik, harmonik, ya da harmonik olmayan etkilerdir. Gerçek hayatla bağdaştırmak için makinenin kullanım altındayken sallanması, bozuk bir yolun sebep olduğu titreşimler örnek verilebilir. Sönümlü titreşime geçmek gerekirse; sistemin mevcut enerjisinin sürtünme ve benzeri dirençler ile birlikte aşamalı bir şekilde dağıltılmasıdır (Maia & Montalvao e Silva, 1998; Yılmaz & Uysal, 2021).

2.6.1. Sönümsüz Serbest Titreşim

Sönümsüz serbest titreşim hareketi gerçek hayatta bakıldığında olma ihtimali düşük bir hareket şeklidir. Gerçekte bulunan sistemlerin çoğunda sönümleme elemanı olmasa dahi az da olsa sönümleme etkisine sahiptirler (Ucun, 2004).

Herhangi bir sistem başlangış anından itibaren herhangi bir kuvvet olmadan salınım yapıyorsa bu tarz sistemler serbest sönümsüz titreşim olarak adlandırılır. Kütle-yay sisteminde, eğer kütle hareket boyunca enerji dağılımına sebep oluyorsa hareketin genliği zaman ile sabit kalır (Maia & Montalvao e Silva, 1998; Şahin, 2009).



Şekil 2.8. Sönümsüz serbest titreşim (Maia & Montalvao e Silva, 1998)

Şekil 2.8'de görülen içsel kuvvetlerin etkisi ile titreşim sistemi ω_n doğal frekansında salınım hareketine başlar. Açısal doğal frekans yay katsayısına ve cismin kütlesine bağlı olarak (2.1) gibi hesaplanabilir (Maia & Montalvao e Silva, 1998):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.1}$$

Burada;

ω_n: Sönümsüz açısal doğal frekans (rad/s),

k: Yay sertliği veya yay katsayısı (N/m),

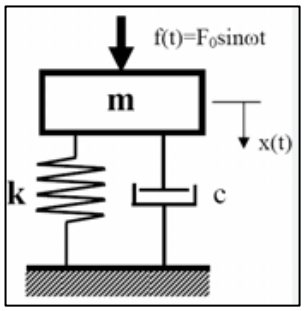
m: Cismin kütlesidir.

Şekil 2.8'de gösterilen sistemin deferansiyel denklemini yazmak gerekir ise denklem (2.2) gibi yazılabilir :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + kx(t) = 0 \tag{2.2}$$

2.6.2. Sönümlü Serbest Titreşim Hareketi

Eğer bir sistemin serbest titreşim genliği zaman içerisinde azalıyorsa bu tarz sistemler sönümlü sistemler olarak isimlendirilir. Gerçek hayatta üzerinde titreşim oluşan bütün sistemlerde titreşime yol açan etki kalktıtan sonra titreşimlerin yavaş yavaş zayıflayıp ardından tamamiyle yok olma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun gözlemlenme nedeni ise tireşim sistemlerinde varolan sönümleyici elemanların zaman içerisinde enerjiyi absorbe etmesi olarak gösterilir. Çok çeşitli olan ve sönüm adı verilen bu etkilerin ortak özelliği sistemin hızına karşı koyan ve sönüm kuvveti adı verilen kuvvetlerin doğmasına yol açmalarıdır (Maia & Montalvao e Silva, 1998; Şahin, 2009).

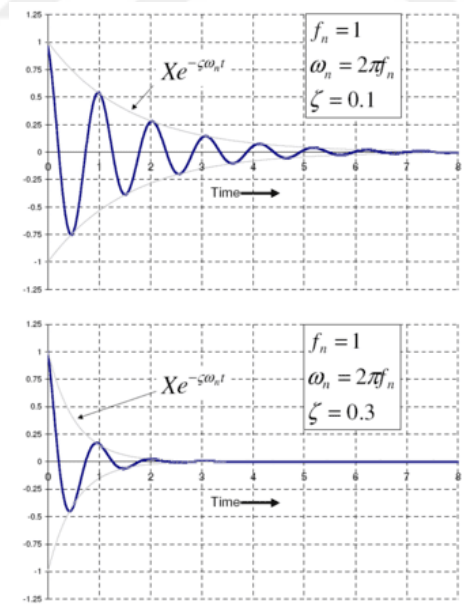


Şekil 2.9. Sönümlü serbest titreşim sistemi (Maia & Montalvao e Silva, 1998)

Şekil 2.9'da gösterilmiş olan sistemin sönümlü titreşim denklemini yazmak gerekir ise denklem (2.3)'te incelenebilir;

$$\ddot{x} + 2D\omega_d\dot{x} + \omega_n^2 x \tag{2.3}$$

2.3'teki denklemde bulunan D sönüm sayısıdır.



.

Şekil 2.10. Sönümlü titreşim modeli (Thomson, 1993)

Şekil 2.10'de örnek titreşim modeli görülmektedir.

2.7. Deneysel Modal Analiz

Gerçek hayatta birçok sistem titreşime maruz kalmakta veya titreşim altında çalışmaktadır. Bu nedenlerden ötürü titreşimin sistem üzerinde yarattığı etki nedeniyle sistem üzerindeki etkisinin araştırılması önemli bir hal almıştır. Yapıların bu davranışları deneysel modal analiz altında incelenir. Deneysel modal analizde sistemlerin dinamik özelliklerini doğal frekansları,mod şekilleri ve sönüm özellikleri hakkında bilgiler elde ederiz. Deneysel modal analizde yapı üzerine bir tahrik uygulanır ve sistem üzerindeki ivme ölçerlerden veriler toplanır. Sistemin dinamik özellikleri bu fonksiyonların analizi ile belirlenmektedir (Baldan, 2018; Pala, 2020).

Deneysel modal analiz sonucu bulunan doğal frekans, sistemin katılığına ve mevcut kütlesine bağlı olarak değişen karakteristik bir özelliktir. Yapıların varolan serbestlik dereceleri kadar doğal frekansları mevcuttur. Gerçek hayat söz konusu olduğunda sistemlerin sonsuz derece serbestlik dereceleri olduğundan sonsuz adet doğal frekansları mevcuttur. Sistem üzerine bu doğal frekans değerinde birisi ile uyarılması sonucu sistem rezonansa girer. Rezonans durumunda oluşan genlikler maksimum durumdadır ve bu durum tehlike arzedebilir. Tehlikelerden bahsetmek gerekirse bunlar sistem üzerinde yorulma, aşınma veya bağlantılar arasında boşluklar oluşmasına neden olabilir. Belirtilen bu tehlikeler mekanik tehlikelerdir ayrıca ses ve gürültü oluşumuda sağlık açısından problem oluşturabilir. Özellikle bunun fabrikalar içerinde yüksek seviyelerde uzun süre olması durumunda iş sağlığı ve güvenliği açısından da önem arz eder. Belirtilen bu sonuçlardan dolayı rezonansın ortaya çıkmaması için daha tasarım aşamasında çalışmaların yapılması gerekmektedir (Pala, 2020).

Mod şekli, sistemin sahip olduğu doğal frekansların herhangi birisi ile uyarıldığında gerçekleştirmesi beklenen karakteristik bir özelliktir. Ayrıca mod şekli bir sistemin serbest haldeyken gerçekleştireceği doğal dinamik özelliğidir. Diğer bir ismi de öz vektördür.

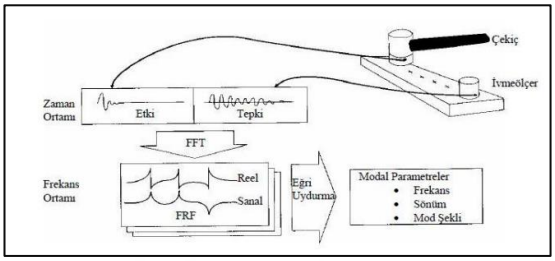
Sönüm, tüm titreşim sistemlerinde varolan bir özelliktir. Enerji dağılması varolduğunda sönümlemeden de bahsedilebilir. Sönüm, titreşim esnasındaki hareketin genliklerini zaman içerisinde azaltıp varolan enerjiyi sistemden uzaklaştırma eğilimindedir.

Modal test, ölçülebilen bir tahrik ile sistem uyarıldıktan sonra sistem üzerinden ölçüm alınarak yapılan bir işlemdir. Verilen tahrik tekil yada çoğul olabilmektedir. Aynı şekilde sistem üzerinden ölçülen cevapta tekil yada çoklu olabilmektedir.

Deneysel modal analizin doğruluğu iki farklı şeye bağlıdır. Bunlar; doğrusallık ve zamanda değişmezliktir. Modal analizin temelini doğrusallık oluşturmaktadır ve farklı modların üst üste bindirilerek mevcut sistemin davranışının tanımlanması sağlanır. Deneysel modal analiz için yapılan ölçümler bir zaman içerisinde yapıldığı için mevcut ölçümlerin bir bütünlük sağlayabilmesi mühimdir. Bu da zamanda değişmezlik olduğu sürece mevcuttur. Bundan dolayı deneysel modal analiz en azından belirli bir zaman içerisinde değişmez kabul edilir. Bu durumlar deneysel modal analiz yapılmadan önce gözden geçirilmelidir. Temel bir kabul olarak zamanda değişmezliği alır isek mevcur iki durum arasındaki farklılar izlenerek sistem veya yapı üzerinde değişim bir hasardan kaynaklı ise bunun yeri ve tespiti hakkında fikir yürütülebilir (Doç & Dal, 2019).

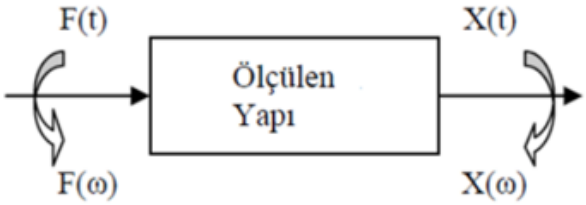
Modal analiz tekniğinde en baştan sistemi tanımladığı kabul edilen bir fonksiyon vardır. Bu sebeple deneysel olarak elde edilmiş olan verileri, tanımlanan fonksiyona en iyi uyduran değişkenlerin kestirilmesi amacıyla eğri oturtma yöntemleri kullanılarak sistem değişkenleri tanımlanır. Bu amaçla çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Başarılı bir deneysel modal analiz gerçekleştirebilmek için yapı dinamiğinin temelini anlamak gerekmektedir. Özellikle frekans tepki fonksiyonları (FRF/FTF) ve modal parametrelerin arasındaki ilişki çok önemlidir (Ewins, 2000). Frekans tepki fonksiyonu alınan yanıtın girdiye oranı olarak adlandırılır. FRF fonksiyonunun kutupları sistemin doğal frekanslarını vermektedir. Yine aynı şekilde kutup noktalarından modal sönüm oranları elde edilmektedir. Yapı üzerinden yeteri kadar FRF elde edilmesiyle ise mod şekilleri elde edilebilir. Anlaşılacağı üzere yapıya bilinen bir kuvvet verilmeli ve yapının bu kuvvete tepkisi ölçülmelidir. Bu işlemde yapıya verilen kuvvet için çekiç veya sarsıcı,

yapının tepkisini ölçmek için ise ivmeölçer kullanılır. Yapıdaki sinyalizasyon adımları değerlendirmek için yapıya bağlantılı olacak şekilde veri toplama analizörleri kullanılır (Fu & He, 2001).



Şekil 2.11. Deneysel modal analiz sistemi (Şekerci, 2013)

Şekil 2.11'de de görüleceği gibi yapıya uygulanan kuvvet çekiç olarak yer almaktadır. Çekicin ucunda mevcut olan kuvvet ölçer uç ile yapıya uygulanan etki zaman ortamında ölçülür. Uygulanmakta kuvvet ile beraber yapı titreşime maruz kalır ve etkiye gösterilmiş olan tepki yapı üzerinden cevap okumak için yapıya bağlanmış olan ivmeölçer ile beraber zaman ortamında ölçülür. Bu yapılan işlemi basit olarak değerlendirmek gerekir ise temel olarak Şekil 2.11' de gösterilen sistem kullanılabilir. Kuvvetin çeşitleri, ivmeölçerin çeşitleri veya uygulanma biçimi değişmiş olsa bile deneysel modal analiz sistem prensibi benzer şekilde çalışmaktadır. Uygulanan zaman ortamındaki ölçümler Fourier dönüşümü (FFT – Hızlı Fourier Dönüşümleri) yardımı ile etki ve tepki fonksiyonlarınının frekans ortamına dönüştürülmesini sağlamaktadır (Schwarz & Richardson, 1999). Şekil 2.12'de Fourier döünüşümünün mantığının daha kolay anlaşılması için şekil ile ifadesini görebilirsiniz.



Şekil 2.12. Fourier dönüşümü (Şekerci, 2013)

Frekans Cevap Fonksiyonu, fourier dönüşümleri yapılmış tepki fonksiyonunun etki fonksiyonuna bölünmesiyle elde edilmektedir. Şekil 2.12'de giriş ve çıkışın bağlantısı kabaca gösterilmiştir. Denklem (2.4)'den transfer fonksiyonunun tepki fonksiyonu ve etki fonksiyonu arasındaki bağıntı incelenebilir.

$$H(w) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \tag{2.4}$$

Bununla birlikte yapıda meydana gelen doğal frekanslar, sönüm oranları frekans cevap fonksiyonlarıyla belirlenebilir (Maia & Montalvao e Silva, 1998).

2.8. Modal Test Yöntemleri ve Ekipmanları

Bu başlık altında deneysel modal test esnasında hesaplamalara yardımcı ekipmanlardan ve ekipmanların kullanımı hakkında bilgi verilmektedir. Deneysel modal test yapılırken iki ayrı yöntemle gerçekleştirilir. Bunlar darbe çekiç test yöntemi ve modal sarsıcı test yöntemidir. En çok tercih edilen yöntem ise darbe çekiç yöntemidir.

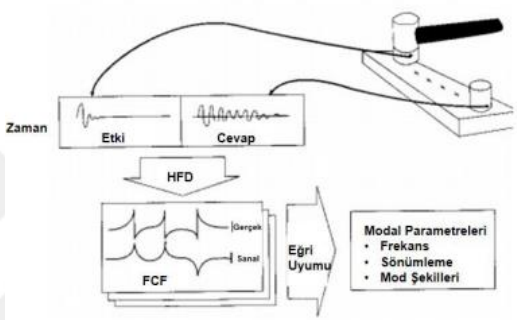
2.8.1. Darbe Çekiç Test Yöntemi

Darbe çekiç modal testinin kullanımı 1970'lere dayanır. Darbe çekiç testi ölçümleri gerçekleştirilirken FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) ve FCF (Frekans Cevap Fonksiyonu) hesaplamaları ile geliştirilmiştir. Günümüze bakıldığında da bu yöntem hala popülerliğini korur. Bunun nedenine bakıldığında uygulanış bakımından kolaylık, hızlı sonuca ulaşma ve tabiki maliyetinin de düşük olması etkendir (Yıldız, 2021).

Darbe çekiç testini gerçekleştirmek için gerekli olan ekipmanlar aşağıda sıralanmıştır;

- Parçayı yada yapıyı tahrik edicek kuvveti ölçebilmek için darbe çekicinin ucunda bir yük hücresi bulunmalı.

- Her seferinde sabit bir noktada ve yönde ivme ölçer ile yapının üzerine uygulanan tahriğe verdiği tepki ölçülmeli.
- FCF(Frekans Cevap Fonksiyonu)'lerin hesaplanabilmesi için 2 yada 4 kanallı FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) ölçer gereksinimi mevcuttur.
- Testin akabinde modal parametrelerin ve tahrik sonucu olaşan mod şekilerininin görünümünü göstermek için modal yazılımlara gereksinim mevcuttur (Yumurtaci, 2023).



Şekil 2.13. Darbe testi (Schwarz & Richardson, 1999)

Şekil 2.13'dan anlaşıldığı gibi darbe çekiç testini gerçekleştirilirken bir giriş ve çıkış noktaları arasında FRF hesaplanır. Bu işlemi yaparken gerekli olan ekipmanları açıklamak gerekirse; giriş kuvvetinin ölçümünü gerçekleştimek için darbe çekicinin ucunda yük hücresinin bulunması gerekir. Uygulanan kuvvetin tepkisini ölçmek içinde ivme ölçerler gereklidir.

Bu sırada elde edilen FCF (Frekans cevap Fonksiyonu) hesaplanabilmesi için FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) analizörü gereklidir. En son aşamaya geldiğimizde de elde ettiğimiz sonuçları görüntüleyebilmek için modal yazılımlara ihitiyacımız vardır. Bu modal yazılımlarda modal parametreler ve mod şekilleri incelenebilir (Yumurtaci, 2023).

Darbe çekiç testini yaparken iki farklı şekilde uygulanışı mevcuttur. Bunlardan biri çekiç gezdirme diğeri ise ivme ölçesi gezdirmedir. Çekiç gezdirme yönteminde ivme ölçerin yeri sabittir test esnasında darbe çekiç gezdirilirip belirli noktalarda tepki oluşturur. İvme

ölçer gezdirme şekinde uygulanışında da çekiç darbesi her seferinde aynı noktadan oluşturulur. Fakat; ivme ölçer parça üzerinde belirli noktalardan cevap alıcak şekilde gezdirilir. Bu iki yöntem karşılaştırıldığında bu ikisinden en çok kullanılanı darbe çekiç gezdirme yöntemidir. Darbe çekici gezdirmenin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralandırabiliriz;

- İvme ölçeri gezdirme yöntemini seçtiğimizde ivme ölçerin konumu her değiştirilmek istendiğinde parça üzerinden sökülüp istenilen yere tekrar takmak gerekir. Takma işlemi esnasında bir yapıştırıcı sürülmesi gerekir. Bunu her seferinde söküp sonrasında takmak için yapıştırıcıyı tekrar sürmek işlem uygulanabilirliği açısından kolay olmayabilir. Ayrıca üst üste yapıştırıcı sürmek ivme ölçerde bir katman oluşturabilir ve bununda belirli aralıklarla silinmesi gerekmektedir.
- İvme ölçerin süreli sökülüp çıkartılması ölçüm yapılan yapı üzerinde kütle dağılımını değiştirebilir (Çal, 2024).

Darbe çekiç testi yöntemi ile çok çeşitli yapılara ve makinelere test yapılması mümkündür. Testi yapılacak parçaya göre çeşitli boyutlarda çekiç uçları mevcuttur.

Darbe testi belirtildiği gibi kullanım açısından hızlı ve kullanışlı olsada her konuda olduğu gibi bu işlemide yaparken dikkat edilmesi gereken beli başlı noktaları mevcuttur. Bunları sırlamak gerekirse;

- Ön tetikleme gecikmesi
- Üstsel pencereleme ve kuvvet
- Kabuletme/ reddetme

Bu tarz etkiler sinyali kötüleştirebilir. Bunları önlemek için birden fazla vuruşun ortlamasını almak, düzgün olmayan vuruşları dikkate almamak ve gürültülü vuruşları azalatma olabilir (Schwarz & Richardson, 1999).

2.8.2. Darbe Çekiç Uç Seçimi

Modal testte tabi tutulcak parçaların veya yapıların titreştirilmesinde darbe çekiç test yöntemi yapıların titreştirilmesinde oldukça kolay bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapıların FCF'lerinin hassas olarak elde edilmesi için yapıların düzgün ve doğru bir şekilde tahrik edilmesi gerekir (Ay, 2019). FCF doğru bir şekilde elde edilmesini etkileyen noktaların başında tahrik şekli ve tahrik noktalarının seçimidir. Darbe çekiç test yönetemini uygulama yöntemi olarak seçer isek bunun ilk ve en büyük avantajı uygulanma kolaydır ancak birkaç noktaya dikkat etmekte fayda vardır. Yöntemin ismininden de anlaşıldığı gibi uygulamada kullanılan cihaz çekiçtir (Türker, 2005).

Darbe çekici sarsıcı ile kıyaslandğında oldukça hızlı, taşınması kolay, basit ve fiyat bazında ucuz bir yöntemdir. Farklı seviyelerde titreşim alanları aktive etmek için farklı darbe çekiç uç seçimi bunu mümkün kılmaktadır.



Şekil 2.14. Darbe çekiç

Şekil 2.14'te gösterilen örnek darbe çekici gibi bir çekiç ile beraber yapıya bir etki uygulanır ve bunun büyüklüğü, çekicin kütlesi ile birlikte çekicin parçaya veye yapıya vurulmuş olduğu andaki hızı ile birlikte değişim eğilimi gösterir. Bu iki değişken göz önünde bulundurulduğunda çekiç vuruş hızı kullanıcıya bağlı bir değişkendir bunu kullanıcı kendi değiştirebilir. Fakat; istenilen düzeyde bir kuvvet oluşturmak için en kabul edilebilir yöntem uç başlığının kütlesinin ve sertliğinin değiştirilmesi olarak düşünülebilir (Türker, 2005). Yapılan açıklamalar neticesinde uç seçiminin önemi daha fazla ön plana çıkmaktadır. FCF (Frekans Cevap Fonksiyonu)'lerin doğru bir şekilde

elde edilmesinde uç seçimi oldukça önemlidir. Sert ve yumuşak uçlar değerlendirildiğinde sert bir uç seçimi yaptığımızda daha geniş frekans aralığını taramamıza yardımcı olur. Bununla birlikte eğer daha yumuşak bir uç seçersek daha düşük frekans aralıklarını tahrik etmiş oluruz. Bunun avantajı ise parçaya çok daha iyi bir şekilde enerji aktarımı yapmış oluruz. İlk etapta sert uç seçimi daha avantajlı gibi gözükür ancak; bunun dezavantajı vuruş esnasında aynı anda yapıya vuruş gerçekleştirebilir ve bu da istenmeyen bir durumdur. Çift vuruş dezanvantajı yumuşak uçlarda daha düşüktür. Özetle incelenicek tahrik frekansı aralığına bakılarak uç sertliği seçilebilir. Özetlemek gerekirse;

- Çekiç ucu sertliği: Darbe çekicinde kullanılan ucun sertliğini arttırarak parça ile birlikte temas içerisinde bulunduğu sürenin azalmasına katkı sağlar.
- Çekiç ucu kütlesi: Darbe çekicinde kullanılan ucun kütlesinin azaltılmasını sağlayarak darbe çekicinin yapı ile arasındaki temas süresinin azaltılmasına katkı sağlar.Bununla birlikte darbe çekici parçaya vurduktan sonra azalan temas süresi ile birlikte aksi yönde bir hareketin daha kolay bir şekilde oluşmasına imkan sağlar (*Modal Test İpuçları: Darbe Çekici Gezdirme ve İvmeölçer Gezdirme*, n.d.).

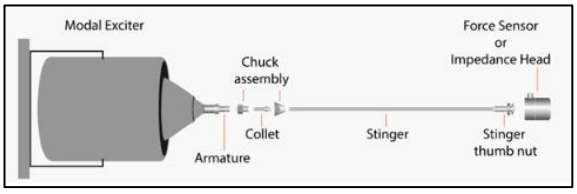


Şekil 2.15. Darbe çekicinde kullanılan uçlar (Darbe Çekici Uçları, n.d.)

Şekil 2.15'te uçların çeşitleri hakkında bilgi verme amaçlı görülen resim incelenebilir.

2.8.3. Modal Sarsıcı Test Yöntemi

Modal test esnasında tahrik uygulayıcı olarak modal sarsıcıların kullanıldığı test yöntemidir. Modal sarsıcılar kullanılarak yapıların veya parçaların titreşim davranışları incelenmektedir. Test numunesine bağlanmaması özellikleri arasındadır. Oldukça geniş bir frekans tarama aralığına sahiptirler (İbram, 2022). Darbe çekiç test yöntemi ile kıyaslandığında modal sarsıcılar daha geniş bir frekans aralığında ve oldukça farklı sinyal tipleri ile uyarma yeteneğine sahiptirler. Bunun sonucu olarakta farklı yapı veya parçalarda çalışma imkanı sunarlar. Bir diğer avantajı ise darbe çekicinde kuvvetin doğrultusu kullanıcı kaynaklı olduğu için ayarlanması güç olabilir. Fakat; modal sarsıcılarda böyle bir sorun yoktur. İlgili parçaya yada yapıya direk bağlandıkları için kullanıcı kaynaklı sıkıntıları ortadan kaldırmaktadır. Sadece ilgili yapı yada parçaya direk bağlandığı için kendi kütlesinden dolayı ölçümde hata olma sıkıntısı mevcuttur. Bu sıkıntıyı önlemek için Şekil 2.16‘da da görebileceğiniz gibi stringer olarak adlandırılan ince ve kısa bir çubuk kullanılır. Bu çubuk modal sarsıcının kendi kütlesi kaynaklı ölçümde oluşabilecek hataları engeller. Ayrıca stringer çubuğu modal sarsıcıyı bulunduğu konumdan hareket ettirmeden istenilen mesafeye uygun bir şekilde ayarlanabilmektedir. Bu açıdan bakıldığında da kullanıcıya kurulum kolaylığı sağlamaktadır.Darbe çekiç test yönteminde genellikle istenilen cevap sinyalini oluşturabilmek için yeterli olan enerjiyi beklenilen frekans aralığında sağlaması güçtür. Modal sarsıcı test yöntemine bakıldığında böyle bir problem olmaması bu yönetimin kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Çal, 2024; Yıldız, 2021).



Şekil 2.16. Modal sarsıcı (Modal Test Ve Modal Analiz, n.d.)

Şekil 2.16’da örnek bir sarsıcı resmini görülmektedir.

2.8.4. İvmeölçerler

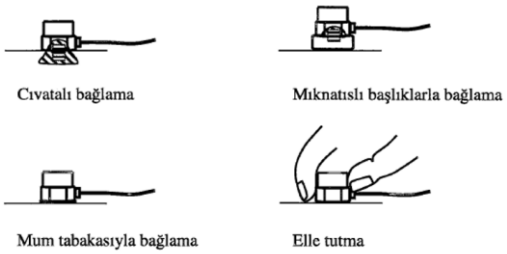
Deneysel modal analiz yapılması gereken durumlarda kullanılması gerekli olan araçların başında ivme ölçerler gelmektedir.İvme ölçerlerin kesinlikle kullanılması gerektiği gibi deneysel modal analiz sonucu elde edilen FCF (Frekans Cevap Fonksiyonu)'lerin oluşturulması için gerekli olan oluşan ivmeleri ölçmede kullanılmaktadır (Türker, 2005).

İvmeölçerler deneysel modal analizde sonuçların doğruluğu açısıdından önem arz etmektedir. Buna paralel olarak sonuçların doğruluğu açısından ivmeölçerlerin seçimide önem arz etmektedir. Dikkat edilcek konuların başında ölçüm frekansının içerisinde kullanılması planlanan ivmeölçerin doğal frekansı bulunmamalıdır. Bu tahmin edileceği gibi sonuçların doğruluğunu etkileyecektir. İvmeölçerler incelendiğinde çoğunun hassasiyeti birbirinden farklıdır. Yapılacak teste bağlı olarak kullanılabilir ivmeölçer çeşidinin farklı olma ihtimali söz konusudur.Buna dikkat edilerek ivmeölçer seçilmelidir. İvmeölçer seçilirken düşük frekansta olan yapı yada parçalarda yüksek hassasiyetli, yüksek frekansta olan yapı yada parçalar için düşük hassasiyetli ivmeölçerler seçilebilir. Yüksek hassasiyetli ivmeölçerlerin kullanılması avantajlı görülebilir. Fakat; yüksek hassasiyetli ivmeölçerlerin kütlesinin yüksek olacağı ve test edilen yapı yada parçanın boyutlarının küçük olması durumunda bunun bir problem olabilceği göz önünde bulundurulmalıdır.

İvmeölçerlerin seçimi gibi bağlanması da önemlidir. İvmeölçerlerin yapıya birden fazla sekilde bağlanma şekli vardır. Bağlama türlerinin bazılarını aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

- Ara eleman kullanarak bağlama(Örn: civata)
- Mıknatıslı başlıklar kullanarak bağlama
- İnce bir mum tabakası kullanarak bağlama
- Elle ölçülecek sisteme tutmak

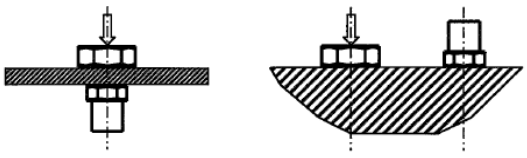
Yukarıda maddeler ile belirtilen bağlama şekillerine ait resimleri Şekil 2.17'de bulabilirsiniz (Türker, 2005).



Şekil 2.17. İvme ölçer bağlama şekilleri (Türker, 2005)

İvmeölçerler ile alakalı bir diğer önemli noktadan bahsetmek gerekirse buda nereye bağlanması gerektiğidir. Deneysel modal test aşamasında test öncesi yada test esnasında bunu da göz önünde bulundurmak gerekir. Bunun neden önemli olduğunu kısaca anlatmak gerekirse şu şekilde bahsedebiliriz. İlgili yapı ya da parça üzerine bağlanan ivmeölçer test numunesinin üzerinde oluşacak bir yada birden daha fazla moda ilişkin değerlerin elde edilmesi mümkün olamayacağından ivmeölçerlerin yerleri değiştirilmelidir. Öncesinde bu konu hakkında bir tahmin var ise bu düşünülerek ivmeölçerin yer seçimi yapılmalıdır.

İvmeölçerlerin konulacağı yer tahmini konusunda test öncesi bilgisayar destekli modal analizden yardım alınabilir. Aşağıdaki Şekil 2.18'da ivme ölçerlerin yerleştirmesi konusunda fikir edinebilecek resimler mevcuttur.

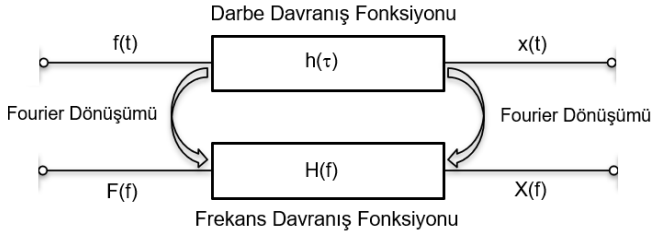


Şekil 2.18. İvme ölçer yerleştirme şekilleri (Türker, 2005)

2.8.5. Veri Toplama Sistemleri

Deneysel modal analizin amaçlarına baktığımızda en temek amacı ilgili parçaya yada yapıya uygulanan etkiye karşılık oluşturulan tepki ile arasındaki ilişkiyi kurmaktır.

Deneysel modal analiz sürecinde kuvvet uyarısı ve ivmeölçerden sonra en önemli nokta veri toplama sistemleridir. Veri toplama sistemlerinin görevi uygulanan kuvvet ile ivmeölçer arasında oluşan cevap arasında bir köprü görevi oluşturur. İlgili yapı yada parçanın verdiği cevap sonucunda elde edilen veriler ile test parçasının dinamik karakteristikleri belirlenir. Dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için elde edilen sinyaller veri toplama sistemlerine aktarılır ve ardından bu sinyaller işlenir. Belirtilen işlemlerden dolayı deneysel modal analiz sürecinde veri toplama sistemleri kuvvet uyarıcı ve ivmeölçerlerden sonra en önemli sistemlerden biridir (Türker, 2005; *Veri Toplama Sistemleri*, n.d.). İlgili test numunesinin uygulanan tahriğe verdiği cevabı doğru bir şekilde işleyebilmeye yardım etmektedir. Sinyaller bilgiyasar ortamına aktarılırken zaman uzay alanında aktarılmaktadır. Fakat; kullanım kolaylığı açısından bu sinyalleri frekans alanına aktarmak sonrasındaki işlemler için oldukça kolaylık sağlamaktadır. Frekans uzay alanına geçmek için kullanılan dönüşüm Fourier Dönüşümleridir (Güvenç, 2021).



Şekil 2.19. Fourier dönüşümü

Şekil 2.19'da frekans uzayında çalışmak için gerekli olan fourier dönüşümünün şematik değişim mantığı mevcuttur.

2.9. Hızlı Fourier Dönüşümleri (FFT)

Jean-Baptiste Joseph Fourier isimli Fransız bir matematikçi tarafından geliştirilmiştir. FFT dönüşümleri, çok farklı alanlarda sinyal analizini gerçekleştirmek için en çok kullanılan tekniklerdendir. Fourier dönüşümleri birçok fonksiyonun sinüs ve kosinüs

fonksiyonları cinsinden yazılabildiğini, integral kulllanımı yardımıyla sinüs ve kosinüs dalgalarının genliğinin bulunabilceğini ifade eder. Böylece FFT, sinyalleri bizi zaman alanından çalışmaktan kurtarıp frekans alanında çalışabilcek seviyeye getirir (Şahin, 2009).

Frekans alanında çalışma ile zaman alanında çalışma birbiri ile avantajları bakımından karşılaştırıldığında, frekans alanında çalışmak çok daha avantajlıdır. Çünkü frekans alanında çalışmada sinyal özellikleri bağımsız frekans bileşenleri ile birlikte tanımlanır. Zaman alanında ise bütün özelliklerin içerisinde bulunduğu tek bir dalga formu mevcuttur.

Fourier dönüşümlerinin günümüzde en çok Ayrık Zamanlı Dönüşümü (DFT) ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) şeklinde kullanımdadır. DFT içerisindeki fonksiyonlar sinyal işleme, sistemlerin tasarımı ve analizi, korelasyon analizi, doğrusal filtreleme ve spektrum analizi gibi birçok uygulamada kullanılabilmektedir. DFT istenilen bir zaman aralığında gerçekleştirilebilir. Hesapları yapmak için yapılması zorunda olunan işlem sayısı ise örnek sayılarına bağlı olarak artış göstermektedir. Örnek sayılarındaki artış ulaşılması istenen sonucuda geciktirir (Şahin, 2009). Anlaşılabildiği üzere bu da istenmeyen bir durumdur. Bu tarz zaman kayıplarını azaltmak için Cooley ve Tukey 1965 yılında bazı çalışmalar yapmıştır ve bunun sonucu olarak Hızlı Fourier Dönüşümleri(FFT) olarak bilinen algoritmaları geliştirmişlerdir (Cooley & Tukey, 1964).

FFT algoritmalarının amacı DFT matrislerini seyrek hale getirerek daha çabuk bir şekilde hedefe ulaşmaktır. FFT algoritmalarının günümüzdeki kullanım alanları ses mühendisliği, titreşim analizi ve görüntü işleme alanlarıdır. İşlem sayısını azaltırken temel fonsiyonun peryodik ve simetri olması özelliklerini kullanır. Amaç ise bu özellikleri de kullanarak zaman alanındaki fonksiyonu frekans alanına daha kısa zamanda dönüştürmektir (Güvenç, 2021).

Bahsi geçen konuların pratikte kullanım şekli; sensörlerden zaman alanında veriler elde edilir ve bu veriler FFT analizinde kullanılır. Günümüzde gelen veriler bir bilgisayar ortamında ve bu dönüşüm için hazırlanan programlarda sayısallaştırılır (Fu & He, 2001).

2.10. Modal Test Uygulama Çeşitleri

Deneysel modal analiz için gerekli olan ekipmanların tamamlanması ve tanıtılması sonrası modal test uygulama çeşitlerinden az da olsa bahsetmek çalışmanın geri kalanını anlayamaya yardımcı olucaktır. Modal test uygulama biçimlerine geçmeden önce ekipmanların anlamı ve önemi vurgulanmıştır. Deneysel modal analiz için hem uygulamam hem parça yapısı hemde işlemin yapıldığı koşullar düşünüldüğünde birdan fazla uygulama çeşidi mevcuttur (*Modal Test Ve Modal Analiz*, n.d.).
Tahrik uygulayıcı olarak darbe çekiç kullanılıyorsa aşağıdaki gibi iki çeşit uygulama biçimi mevcuttur;

- Tek referanslı gezdirilen çekiç testi
- Çok referanslı gezdirilen çekiç testi

Tahtik uygulayıcı olarak sarsıcı kullanılıyorsa aşağıdaki gibi iki çeşit uygulama biçimi mevcuttur;

- Tek referanslı sarsıcı testi
- Çok referanslı sarsıcı testi

2.10.1. Tek Referanslı Gezdirilen Darbe Çekiç Testi

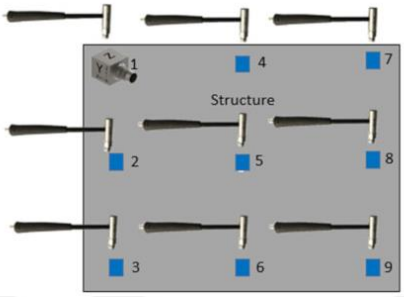
Temel prensibinden bahsetmek gerekirse; öncelikli amacımız yapının dinamik özelliklerini belirlemek. Bu testte darbe çekici ilgili parça yada yapı üzerinde gezdirilerek tek bir DOF (Serbestlik derecesi) yanıtı alınır. Tek DOF'un anlamı da parça üzerinde tek bir ivme ölçer kullanırak test numunesi üzerinden veri toplanır.

Uygulama aşamalarından bahsedersek yukarıdaki açıklamadan da anlaşılacağı gibi test numunesi üzerine tek noktaya ivmeölçer bağlanır. Önceden belirlenen noktalar üzerinde darbe çekici yalnızca bir yönde uygulanır ve bu şekilde test numunesi tahrik edilir. Bu işlem önceden belirlenen her bir nokta için ayrı ayrı uygulanır.

Avantajlarını sıralamak gerekirse;

- Az ekipman gerektirdiği için maliyeti düşüktür.
- Testin uygulanması hızlıdır. Çünkü yer yönde uygulama zorunluluğu bulunmamaktadır.

Testin gerçekleştirilmesinden sonra elde edilen veriler işlenerek test numunesinin titreşim modları ve doğal frekanslarına ulaşabiliriz. Kullanım alanı oldukça geniştir (*Modal Test Ve Modal Analiz*, n.d.).



Şekil 2.20. Tek referanslı gezdirilen çekiç testi (Modal Test İpuçları: Darbe Çekici Gezdirme ve İvmeölçer Gezdirme, n.d.)

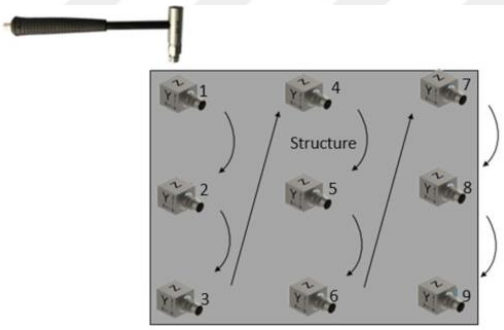
Şekil 2.20'den de anlaşıldığı gibi test numunesi üzerinde 9 nokta belirlenmiştir. Bunlardan bir numaralı noktaya ivmeölçer yerleştirilmiştir. Testin devamında darbe çekici 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı noktaları ayrı ayrı tahrik etmiştir ve tahrik sonrası cevaplar toplanıp test numunesinin dinamik karakteristiği elde edilmiştir.

2.10.2. Tek Referanslı Gezdirilen İvme Ölçer Testi

Bu test uygulama çeşidinde de temel amacımız yapının dinamik karakteristikleri hakkında bilgi edinmektir. Tek referanslı gezdirilen darbe çekiç testinden farklı olarak, isminden de anlaşılabilceği gibi bu sefer ilgili yapı yada parça üzerinde daha önce belirlenen noktalar üzerinde ivme ölçer gezdirilir. Darbe çekici ile her seferinde aynı nokta üzerinden tahrik uygulanır fakat, ivmeölçer ile her seferinde önceden belirlenmiş

farklı noktalar üzerinden test numunesi cevabı toplanır. Kısaca anlatmak gerekirse ivmeölçer hareket ettirildiğinde, yapının verdiği tepki her seferinde veri toplama sisteminde toplanır. İvme ölçerin kullanımı sadece tek yöndedir. İvmeölçerin bu şekilde kullanılması bize testin yapılma hızında avantaj sağlayacaktır. Yani hızlı bir test uygulama metodudur.

Toplanan veriler ışığında yapının dinamik karakteristikleri hakkında bilgi elde ederiz. Test numunesinin titreşim modları, doğal frekansları ve sönüm oranı hakkında bilgi sahibi oluruz (*Modal Test Ve Modal Analiz*, n.d.).



Şekil 2.21. Tek referanslı gezdirilen ivmeölçer testi (Modal Test İpuçları: Darbe Çekici Gezdirme ve İvmeölçer Gezdirme, n.d.)

Şekil 2.21'den de anlaşıldığı gibi test numunesi üzerinde 9 nokta belirlenmiştir. Bunlardan bir numaralı noktaya darbe çekici ile tahrik uygulanmaktadır. Testin devamında ivme ölçer 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı noktalardan ayrı ayrı bağlanmıştır ve her seferinde 1 numaralı noktadan tahrik edilmiştir ve tahrik sonrası cevaplar 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı noktalardan ayrı ayrı toplanmıştır.

2.10.3. Tek Referanslı Sarsıcı Testi

İlgili yapı yada parçanın dinamik karakteristiklerini öğrenmek için test numunesine tahrik sarsıcı ile uygulandığı testlerdir. Yapının tepkisini ölçmek için sarsıcı belirli eksende hareket ettirilir ve uygulanan bu tahrik ile birlikte yapı üzerinde oluşan cevap toplanır.

Yapı üzerinde oluşan toplanmış cevaplar ile yapının dinemik karakteristikleri hakkında bilgi edinilmiş olur (*Modal Test Ve Modal Analiz*, n.d.).



Şekil 2.22. Modal sarsıcı test sistemi(Çal, 2024)

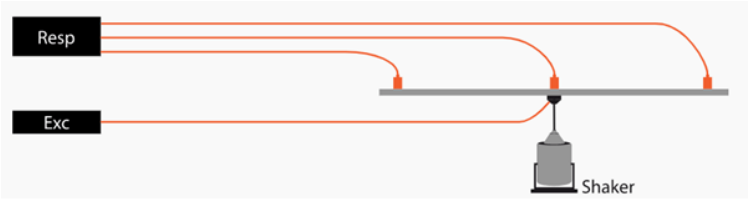
Şekil 2.22'de modal sarsıcı kullanılan bir deneysel modal analiz test düzeneği gösterilmiştir.

2.10.4. Çok Referanslı Modal Testler

Birden fazla DOF kullanılması gereken yapılarda bu test çeşidi uygulanır. Temel amaç yine bir önceki test çeşitlerindeki gibi test numunesinin dinamik karakteristiklerinin elde edilmesidir. Belirtilen bu amacı gerçekleştirmek için birden fazla noktadan ölçüm alınması gerekir. Diğer test çeşitleri ile karşılaştırıldığında basitçe anlatımından da anlaşabileceği gibi karmaşık bir yöntemdir. Testin hazırlanış sürecide diğer testlere kıyasla daha fazla zaman alır. Maliyet açısından bakıldığında da daha fazla ekipman gerekirtiği için daha pahalı bir test yöntemidir (*Modal Test Ve Modal Analiz*, n.d.). Bu negatif özelliklerinin yanında günümüzde aktif olarak kullanılmaktadır. Kullanılma nedenlerine bakmak gerekirse;

- Tek referanslı test yöntemleri ile kıyaslandığından daha fazla data sağlar.
- Birden fazla ölçüm noktası kullanımı kaynaklı hata oranı daha azdır.

- Test numesi karmaşık bir yapıya sahip ise daha düzgün sonuçlar elde edilir. Mod şekillerinin doğruluğu daha yüksektir.



Şekil 2.23. Çok referanslı modal sarsıcı testi (Modal Test Ve Modal Analiz, n.d.)

Şekil 2.23'te çok referanslı modal sarsıcı kullanılan bir deneysel modal analiz test düzeneği mevcuttur.

2.11. Deneysel Modal Analiz Parametreleri

Deneysel modal analiz sonucunda elde ettiğimiz sonuçların incelenmesi aşamasında öncesinde anlamının ve karşılığının bilinmesi gereken önemli parametre ve kavramlar bulunmaktadır. Yalnızca modal test ekipmanları hakkında bilgi sahibi olmayıp grafik ve sinyal okuma; yorumlama ve inceleme konusunda da bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Bu konularda bilgi sahibi olunması oldukça önemlilik arz etmektedir. Daha önceki başlıklarda anlatılan Fourier dönüşümlerinin frekans cevap fonksiyonu ile arasındaki bağlantısının kavranması ve sonrasında frekans cevap fonsiyonundan hangi verilerin elde edileceğini bilmek mühim seviyededir. Bundan dolayı bu başlıkları açıklama gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Sonrasında ise testin tutarlılığı ve test sonrasında yapılması gerekenler ile alakalı başlıklara değinilcektir.

2.11.1. Frekans Cevap Fonksiyonu (FRF)

Frekans cevap fonksiyonu, uygulanmakta olan kuvvet ve sistem üzerinden ölçülen tepki arasındaki transfer fonksiyonu arasındaki oran şeklinde hesaplanarak elde edilmektedir.



Şekil 2.24. Frekans cevap fonksiyonu

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \tag{2.5}$$

H(ω) : transfer fonksiyonu, X(ω) : kuvvet, F(ω) : tepki

Şekil 2.24'te transfer fonksiyonu; kuvvet ve tepki arasındaki bağıntının şematik olarak gösterimi mevcuttur. Denklem (2.5)'te ise matematiksel ifadesi mevcuttur.

Frekans cevap fonsiyonu, isminden de anlaşıldığı üzere frekans uzayında olan ölçüm fonksiyonudur. Deneysel modal analizlerin çıktısı olarak elde edilen ilk sonuç, DOF'lar ve geometri ile ilişkili cevap fonksiyonlarıdır. Frekans cevap fonksiyonunu tam olarak açıklamak gerekirse; tepki hareketi sonucunda olan çıkışlar ile etki hareketi olan girdiler arasında oluşan ilişkilerdir. Cevap fonksiyonları çok çeşitli olabilir. Örnek vermek gerekirse bunlar; yer değiştirme, hız ve ivme olabilir, verilen örnek içerisinde günümüzde en çok kullanılan ivmedir. FFT sinyalleri sonucu zaman uzayındaki sinyal frekans uzayına aktarılıp her bir FFT sinyal bileşeni için FRF oluşturulur. Frekans cevap fonksiyonları bize sistemin rezonans frekansı, sönüm oranı ve mod şekillerinin elde edilmesi için bilgiler verir (Maia & Montalvao e Silva, 1998).

Rezonans değeri ile alakalı bilgi edinmek için FRF incelenir. FRF'te oluşan zirve değerlerlerinde sistemin doğal frekansını belirtir. Rezonansa da sistem bu frekans aralığında girer.

Sönümleme ile alakalı bilgi ise şu şekilde elde edilir; sönümleme peak noktası genişliği ile ilişkilidir. Yani grafikte peak oluşan yerler ne kadar geniş ise sönümleme de ona paralel olarak o kadar yüksektir (Fu & He, 2001).

Mod şekilleri, sistem için ortak bulunan bir frekans oluşturan çoklu FRF fazları ve genlikleri yardımıyla mod şekilleri belirlenir.

FRF cevabı değişmez, değişmesi için parça üzerinde bir hasar oluşması lazım ancak bu durumda titreşim karakteristiği değişebilir .



Şekil 2.25. Frekans cevap fonksiyonu

Şekil 2.25‘te de bir FRF grafiği örneği gösterilmektedir. Grafikteki tepe noktalar rezonans frekansını göstermektedir. Tam tersi olan çukur noktalar ise anti-rezonans frekanslarını göstermektedir.

2.11.2. Tutarlılık

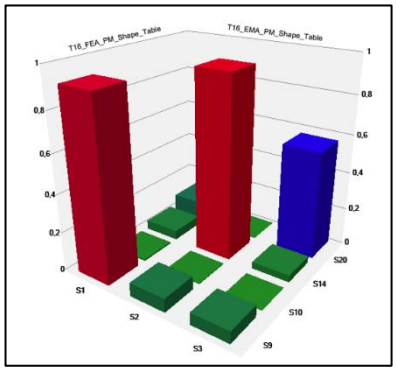
Tutarlılığı açıklamak gerekirse; bir çıktı sinyalinin bir girdi sinyaline ne kadar iyi bağlı olduğunu gösteren bir ölçüttür. FRF’in kalitesini ve güvenirliğinini belirten bir ölçüttür. Bu değerlendirme 0 ile 1 değişmekte olan bir değerdir. 1 değerini açıklamak gerekirse FRF’in ölçümden ölçüme tutarlı olduğunu, diğer bir değişle tekrarlanabildiğini ifade eder. 0 değeri ise ölçümün tekrarlanamaz olduğunu ve bir hatanın olduğunu ifade etmektedir (Pala, 2020).

FRF ve tutarlılık grafikleri incelendiğinde, rezonans frekanslarında tutarlılık değeri 1’e yakın iken,anti-rezonans frekanslarında ise 0’a yakındır. Bu durum,rezonans noktalarında güçlü sinyallerin, anti-rezonans noktalarında ise zayıf sinyallerin olmasından kaynaklanır. Fakat; rezonans noktalarında tutarlılık değeri 0’a yakın olursa ölçümde bir sorun olduğu düşünülebilir. Sonuç olarak; deneysel modal testlerde tutarlılık değeri, FRF

verilerinin kalitesini ve ölçümün doğruluğunu değerlendiremede mühim bir rol oynar ve ölçüm hatalarının tespit edilmesine yardımcı olur (Ay, 2019; Şekerci, 2013).

2.11.3. Modal Doğrulama (Modal Güvence Kriteri, MGM/MAC)

Modal testten elde edilen sonuçları kullanmadan önce uygunluğunu yani güvenilir olup olmadığını kontrol etmek önemlidir. Mod şekillerinin uygunluğunu,doğruluğunu belirlemeye yarayan matris sistemi olarak MAC matrisi kullanılır. Yapılan açıklamalar ışığında akla gelen bir soru muhtemelen 'hangi verileri birbiri ile kıyaslacağız?' olacaktır. Testi yapan kişi bilgisayar destikli programlar yardımı ile test numunesinin CAD modeli yardımıyla modal analizini bilgisayar ortamında gerçekleştirir. Sonrasında ise test numunesinin deneysel modal analizi yapılır. Elde edilen sayısal analiz değerleri ile fiziksel analiz yoluyla elde edilen sonuçlar birbiri ile kıyaslanıp doğruluğu yüzdesel olacak şekilde belirtilen bir doğrulama sistemidir. MAC matrisinin odak noktası test ve analizden elde edilen frekanslar değildir. MAC matrisinin odak noktası mod şekillerinin birbirleri ile tutarlılığıdır. Şekil 2.26'dan örnek bir MAC matrisini incelyebilirsiniz.



Şekil 2.26. MAC matrisi

Modal test ve modal analizden elde ettiklerimizi MAC değeri cinsinden ifade etmekte son derece önemlidir. İlgili verileri MAC değeri cinsinden ifade etmek için aşağıdaki eşitliği kullanmamız uygun olacaktır.

$$MAC(\{\varphi_r\},\{\varphi_s\}) = \frac{[\{\varphi_r\}^{*t}\{\varphi_s\}]^2}{(\{\varphi_r\}^{*t}\{\varphi_s\})(\{\varphi_s\}^{*t}\{\varphi_s\})} \quad (2.6)$$

Elde edilen iki ayrı mod şeklini biri ile karşılaştırmak için denklem (2.6)' da verilen denklem kullanılarak MAC değeri hesaplanabilir. MAC değerinin 1'e yakın olması bulunan verilerin birbiri ile uyumunun yüksek olduğunu belirtir. Diğer bir değiş ile sonucun 1'e yakın olması sonuçların tutarlı olduğunu belirtir. Sonucun 0'a yakın olması sonuçlar arasında herhangi bir tutarlılığın bulunmadığını belirtir. Genele bakıldığında ise ilişkili iki mod mevcut ise MAC değeri 0,9'dan yüksek, birbiri ile ilişkisiz iki mod mevcut ise MAC değeri 0,05'ten küçüktür (Ay, 2019; Korkmaz, 2023). MAC değerinin tam istenildiği gibi olmadığı bir durum ile karşılaşıldığında model bir takım eksiklikler olabilceği düşünülebilir. Bu tarz bir durumla karşılaşıldığında aşağıda sıralanan konular tekrar gözden geçirilebilir:

- Test yapısındaki non-lineer durumlar
- Ölçüm verilerindeki gürültü
- Ölçüm verilerinin sonrasındaki yapılan analizlerdeki sorunlar (Türker, 2005)

Buraya kadar olan kısımda deneysel modal test ve modal analiz sonuçlarından elde edilenler üzerinden MAC değerinin elde edilmesi üzerinde duruldu. Fakat, aşağıda belirtilen durumlar içerisinde de Modal Güvence Kriteri (MAC) analizi yapılabilir:

- Deneysel modal test ile diğer bir deneysel modal test sonucu arasında MAC analizi
- Modal analiz sonucu ile diğer bir modal analiz sonuçlarının MAC analizi (Korkmaz, 2023)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde gerçekleştirilmiş olunan testlerde kullanılan ekipmanlardan, bilgisayar destekli programlardan, kullanılmış olunan veri toplama sistemleri ve kullanılan test parçaları hakkında bilgiler verilmek istenmiştir.

3.1. Darbe Çekiç

Modal test esnasında test numunesinde tahrik oluşturmak amacı ile DJB® Instruments firmasının IH-01 kodlu darbe çekici kullanılmıştır. Şekil 3.1'de testlerde kullanılan darbe çekiç görüntüsü mevcuttur.



Şekil 3.1. Darbe çekici

Darbe çekicinin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Hasaasiyet : 25mV/N
- Ölçüm aralığı : 200N
- Çekic Ucu Çapı : 21mm
- Çekic Ucu Ağırlığı : 28gr
- Toplam Çekiç Ağırlığı : 110g
- Çıkış Bağlantısı : BNC
- Çekic Ucu Tipleri : Kauçuk, Naylon, Alüminyum, Çelik

3.2. İvmeölçerler

Deneysel modal test esnasında deney numuneleri üzerinde uygulanan tahriğe karşılık oluşan cevabı toplamak için ivme ölçerlerden yararlanılmıştır. Kullanılan ivme ölçer ise DYTRAN Instruments 3055D2 modeli kullanılmıştır. Şekil 3.2' te kullanılan ivmeölçer görüntüsü mevcuttur.

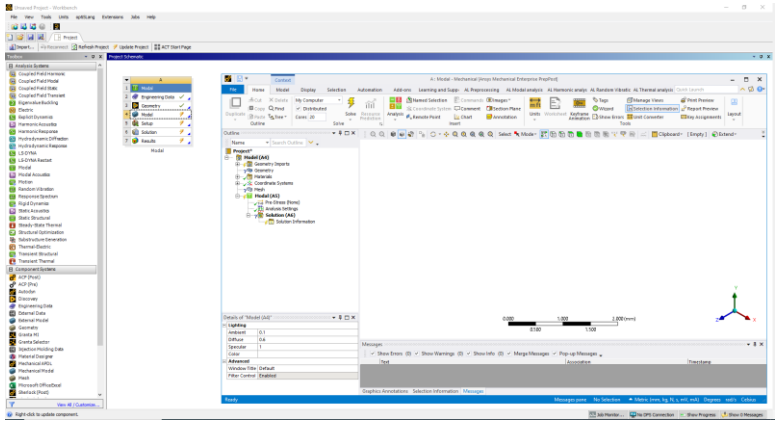


Şekil 3.2. DYTRAN ınstruments ivmeölçer modeli

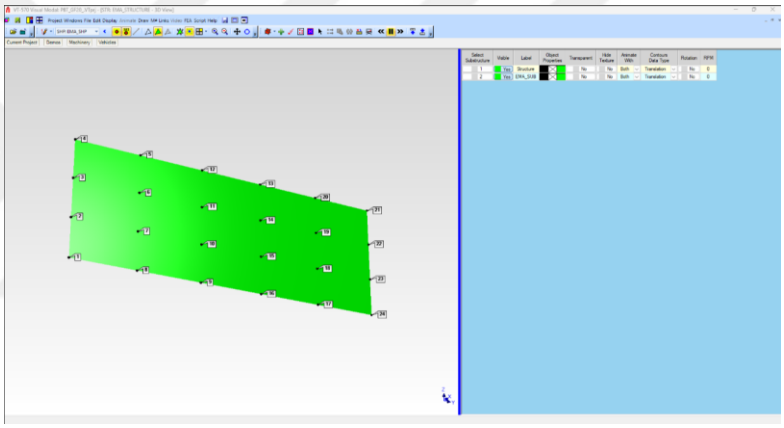
- Hassasiyet : 100 mV/g
- Ölçüm Aralığı : 50 g pk
- Geniş Band Çözünürlüğü : 0.004 g rms (0.03 m/s^2 rms)
- Ağırlık : 0.35 oz (10 g)
- Frekans Aralığı : 54 – 10000 Hz

3.3. Paket Programlar

İki farklı aşamada paket program kullanılmıştır. Bunlardan biri bilgisayar ortamında modal analiz esnasında kullanılmıştır. Modal analizi yaparken kullanılan paket program ANSYS WB® R23.2'dır. Şekil 3.3'te ANSYS WB® R23.2 arayüz resmi mevcuttur. Bir diğeri ise; deneysel modal test esnasında test numunesi üzerinden FRF/FFT grafiklerini elde etmeye yarayan paket programdır. Modal test esnasında kullandığımız paket program ise; MEScope® programıdır. Şekil 3.4'te MEScope® paket programı arayüzü mevcuttur.



Şekil 3.3. ANSYS WB® R23.2 arayüzü



Şekil 3.4. MEScope® arayüzü

3.4. Veri Toplama Sistemi

Test numunesine darbe çekiç ile tahrik uygulanmasının ardından test numunesi üzerinde oluşan cevap veri toplama sistemleri tarafından toplanır. İvmeölçerler yardımıyla alınan ivme sinyallerinin senkronize bir şekilde ölçülmesinde ve elde edilen verilerin toplanmasında NI USB-4431 veri toplama sistemi kullanıldı. Şekil 3.5'te kullanılan veri toplama cihazı görüntüsü mevcuttur ve Çizelge 3.1'de kullanılan veri toplama cihazının özellikleri incelenebilir.



Şekil 3.5. NI USB-4431 veri toplama sistemi

Çizelge 3.1. NI USB-4431 veri toplama sistemi genel özellikleri

Analog Kanallar	5 kanallı; 4 Kanallı Giriş kanalı mevcuttur. 1 Kanal güç kaynağına çıkışlıdır.
ADC Tipi	Anti-alliasing filtreli 24 bit delta-sigma
Örnekleme Hızı	Eşzamanlı 102.4kS/s
Aralıklar	±10V,±1V,±100mV,±10mV
10Vexc'te Br aralıkları	1000mV/V,100mV/V,10mV/V,1mV/V
10kS'te Dinamik Aralıklar	100 dB
Çıkış Bağlantısı	DC
Çıkış Empedansı	50Ω

3.5. Test Edilen Malzemeler

Bu bölümünde testte kullanılan 4 farklı cam fiber oranına sahip PBT parçalarının otomotiv aydınlatmada kullanılması ile alakalı noktalara değinilmiştir.

Plastik olarak adlandırılan polibütilen tereftalat, polimerlerin polyester sınıflandırmasının içerisinde yer alan yarı kristal termoplastiktir. Genel özelliklerine baktığımızda oldukça iyi kimyasal, elektriksel ve fiziksel özelliklere sahip yarı kristal bir polimerdir. Erime noktası yüksek ve oldukça iyi kararlılığı mevcuttur. Termal özellikler açısından

baktığımızda ısıya, UV ışığına karşı dayanıklıdır. Genel olarak bakıldığında kimyasal olarak güçlüdür. Aşınmaya ve sürünmeye karşı oldukça dirençlidir. Bu özelliği ona dişlilerde,yataklarda ve burçlarda kullanım alanı açmaktadır.

PBT malzemenin özelliklerini genel olarak sıralamak gerekirse:

- Dayanım ve sertlikleri yüksektir.
- Darbe dayanımları iyidir.
- Termal genleşme katsayısı düşüktür.
- Nem emilimi açısından bakıldığında bu değeri düşüktür.
- Aşınma direnci iyidir.
- Sürünme eğilimi düşüktür.
- Elektiriksel özellikleri iyidir (*PBT*, n.d.; *PBT Plastik*, n.d.)

PBT malzemelerin otomotiv sektörü dışında kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

- Pompa muhafazalarında
- Konnektör şeritleri ve yalıtılmış muhafazalı elektronik ekipmanlar
- Otomotiv sektörü
- Gıda sektörü
- Sensörler
- Bobinler
- Ateşleme sisgtemi parçaları (*PBT*, n.d.)

Yukarıda da bahsedildiği gibi PBT malzemelerin oldukça geniş kullanım alanları mevcuttur. Tezin devamında otomotiv sektöründe kullanım konusu olduğundan ötürü dinamik davranışları incelenmiştir. Otomotiv sektöründeki gelişmeler ve müşteri isteklerine bağlı olarak mekanik ve ısıl özellikleri yüksek malzeme seçimi gereklilikleri ortaya çıkmaktadır. Değişen isteklerle beraber malzeme istekleri de değişmektedir. PBT malzemeler uzun yıllar boyunca çok hızlı tüketilen malzeme olmamışlardır. Fakat; isteklerde oluşan değişiklerle birlikte PBT malzeme çok hızlı tüketilen malzeme haline

gelmiştir. Kullanma ivmesindeki artma nedeni olarak oldukça iyi ve kapsamlı özelliklere sahip olması ve kalıplanma özelliklerinin oldukça iyi olması gösterilebilir (*Otomobil Üreticileri ve Tedarikçileri İçin Değiştirilmiş Pbt Mühendislik Plastik Pbt Gf30 Plastik Hammadde*, n.d.).



Şekil 3.6. Granül PBT malzemesi (*Otomobil Üreticileri ve Tedarikçileri İçin Değiştirilmiş Pbt Mühendislik Plastik Pbt Gf30 Plastik Hammadde*, n.d.)

Şekil 3.6'da granül halinde bulunan PBT malzemesine ait resmi görülmetedir. Malzeme tedarikçileri resimde görüldüğü gibi granül halinde malzemeyi gönderir.

Bu tezde dinamik özellikleri incelenmek üzere 4 adet farklı cam fiber oranına sahip PBT plakalar oluşturulmuştur ve bu test numuneleri üzerinden dinamik ve sonlu elemanlar modelinde kullanılmak üzere mekanik özellikler elde edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

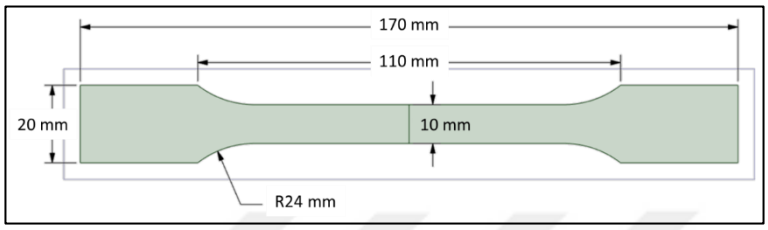
Öncelikle bu çalışmada 4 farklı oranda cam fiber oranına sahip PBT malzemesinin çekme testiyle birlikte sonlu elemanlar analizinde kullanılacak mekanik özellikleri çıkartılmıştır. Ardından tek referanslı gezdirilen çekiç testi metodu kullanılarak deneysel modal testler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar metodundan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaşma yapılırken elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri incelenmiş MGM matrisleri hesaplanmıştır. Cam fiber oranının değişimi ile modal parametrelerin değişim davranışı incelenmiştir. Deneysel modal analiz çalışmasını özetlemek gerekirse şu şekilde bir sıralama yapabiliriz;

1- Elemizde bulunan test numuleri boyutlarına bağlı kalınarak x, y ve z koordinatlarındaki boyutlarına tabii kalınarak Ansys 2023 R2 içerisinde Space Claim ara yüzünde tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan test numuneleri deneysel modal testte kullanılacak parçalardır.
2- Her bir plaka üzerinde ölçüm noktaları belirlenmiş ve belirlenen bu noktalar plalar üzerinde koordinatlara göre işaretlenmiştir.
3- Deneysel modal analiz serbest sınır koşulları altında yapılmıştır. Bu sınır koşullarını gerçekleştirebilmek için plakalar deneysel modal test için elastik iplerle asılmıştır ve ardından çekiç gezdirme testlerine tabi tutulmuştur. Ardından FRF verileri incelenmiştir.
4- Dört test numunesinin çekiç tesleri için MEScope® programı kullanılmıştır.
5- Deneysel ve sonlu elemanlar modal analiz sonuçları MEScope® programına aktarılıp ilk 4 mod için MAC matrisleri oluşturulmuştur. Oluşturulan MGM matrisleri ile test ve analiz sonuçlarının benzerliği incelenmiştir.

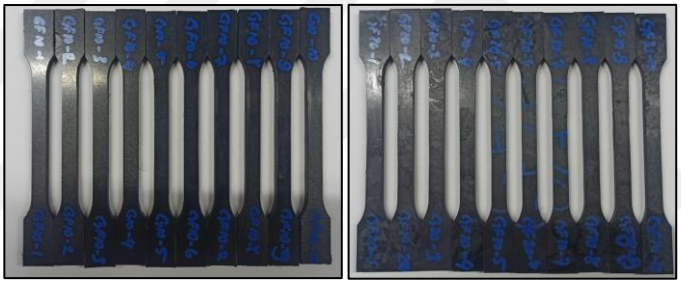
4.1. Test Numunelerinde Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada, dört farklı cam fiber oranına sahip PBT plaka kullanılmıştır. Numunelerin sayısal modal analizleri yapılmadan önce mekanik özelliklerini belirleyebilmek için ve

malzemelerin mekanik özellikleri ile alakalı bilgi edinmek için ISO 527-4 standartlarına uygun numuneler hazırlanmış ve çekme testi yardımıyla malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Şekil 4.1'de ISO 527-4 standardı numune ölçüleri verilmiştir. Çekme testi numuneleri Şekil 4.2'de her 4 numune içinde ayrı ayrı belirtilmiştir.



Şekil 4.1. ISO 527-4 çekme testi numunesi boyutları

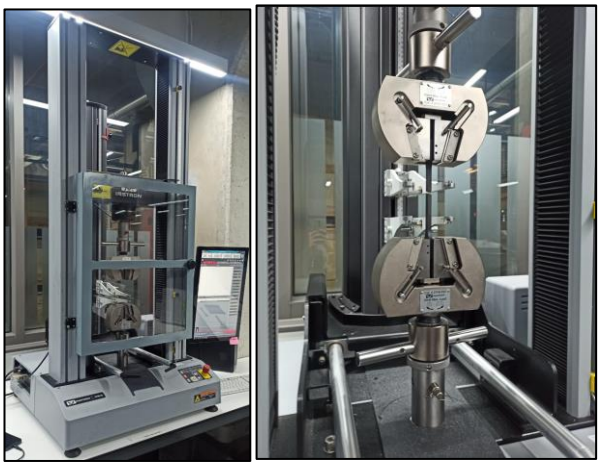


(a) PBT GF10 (b) PBT GF20



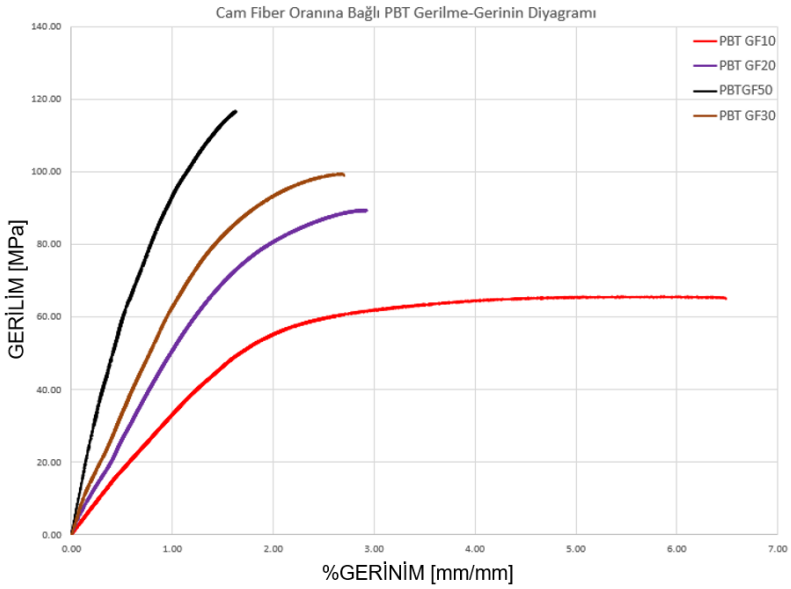
(c) PBT GF30 (d) PBT GF50

Şekil 4.2. Çekme testi numuneleri



Şekil 4.3. Çekme testi

Yukarıkadaki şekillerde belirtilen numunelerin çekme testleri Şekil 4.3'teki test cihazında çekme testleri yapılmıştır ve çekme hızı 2 mm/min 'dir. Çekme testi diyagramları ise aşağıda Şekil 4.4'te verilmiştir ve takviye oranı arttıkça dayanım artmıştır.



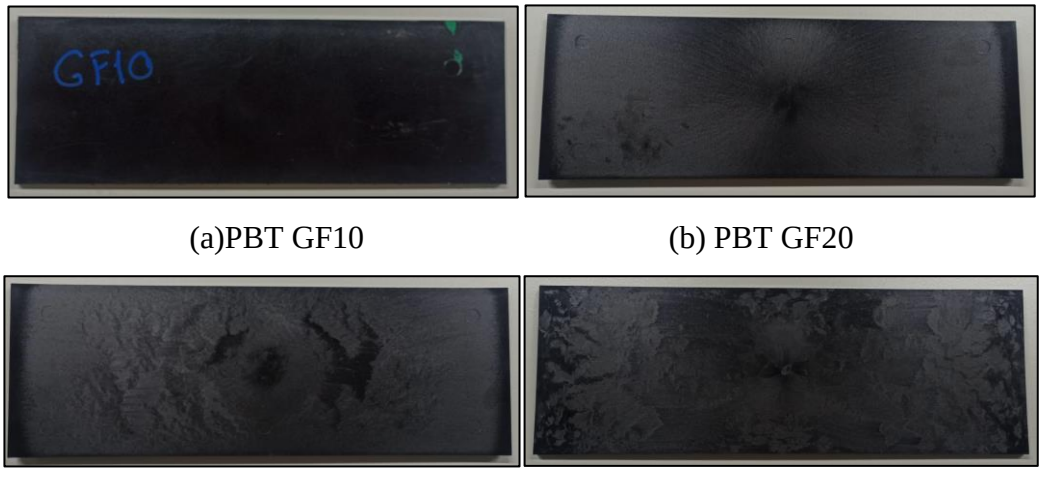
Şekil 4.4. Cam fiber oranına göre PBT malzemesinin gerilim gerinim diyagramı

Çekme testlerinden elde edilen çıktılar ışığında aşağıda Çizelge 4.1'de gösterilen malzeme özellikleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. PBT malzeme özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Elastik modülü GPa	Poisson Oranı
PBT GF10	1.37	3.6	0.4
PBT GF20	1.45	5	0.4
PBT GF30	1.53	6.3	0.4
PBT GF50	1.73	8.5	0.4

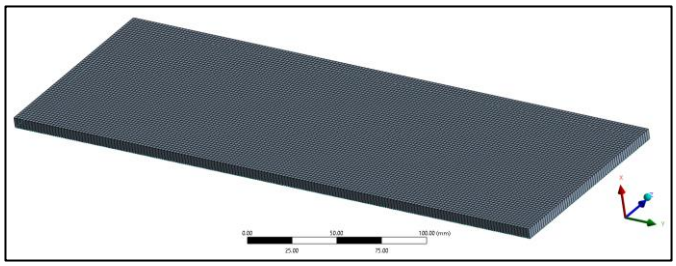
Malzeme özellikleri oluşturulduktan sonra CAD ortamında tasarlanan plakalar sonlu elemanlar ortamında modellenmiştir. Fiziksel test plakaları Şekil 4.5'deki gibi her dört plaka için ayrı ayrı gösterilmiştir.



(a)PBT GF10 (b) PBT GF20

(c) PBT GF30 (d) PBT GF50

Şekil 4.5. Test plakaları



Şekil 4.6. Dört test plakası için kullanılan sonlu elemanlar modeli

Deneysel modal analiz plakalarının mekanik özellikleri çekme testi ile belirlendikten sonra ANSYS ortamında sonlu elemanlar modeli Şekil 4.6'daki gibi oluşturuldu. Analiz çalışmalasında kullanılan modellerin ölçüleri PBT GF10, PBT GF20, PBT GF30, PBT GF50 için; 350x 120 mm'dir. Kalınlıkları ise PBT GF10 için 6,225 mm, PBT GF20 için 5.814 mm, PBT GF30 için 5,836 mm ve PBT GF50 için 5,808 mm'dir. Kalınlıklardaki farklılıklar üretim toleranslarından dolayı kaynaklanmıştır. Her bir plaka için ayrı ayrı çekme testinden elde edilen sonuçlarla malzeme modeli oluşturulup sonlu elemanlar modal analizleri gerçekleştirilmiştir.



(a) PBT GF10 (b) PBT GF20



(c) PBT GF30 (d) PBT GF50

Şekil 4.7. Test plakaları ağırlıkları

Her plakanın ağırlığı ayrı ayrı Şekil 4.7'deki gibi ölçülmüştür.

Çizelge 4.2. PBT Test plakaları ağırlık bilgisi

	Plaka ağırlıkları
PBT GF10 test plakası	358 gr
PBT GF20 test plakası	352 gr
PBT GF30 test plakası	374 gr
PBT GF50 test plakası	422 gr

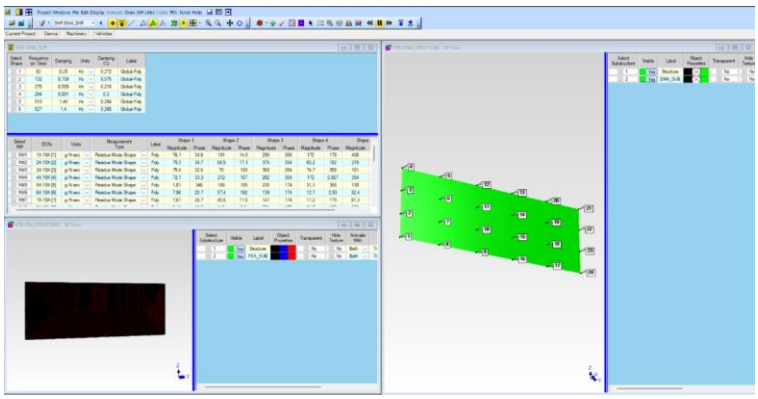
Çizelge 4.2'deki gibi değerler tablolaştırılmıştır.

4.2. Test Numunelerinin Deneysel Modal Analizi

Elde edilen sonlu elemanlar modal analiz sonuçları incelendiğinde parçanın davranışlarına göre x, y, ve z eksenlerine göre test numuneleri deneysel modal analiz için hazırlanmıştır. Ardından ölçüm noktaları belirlenmiştir.

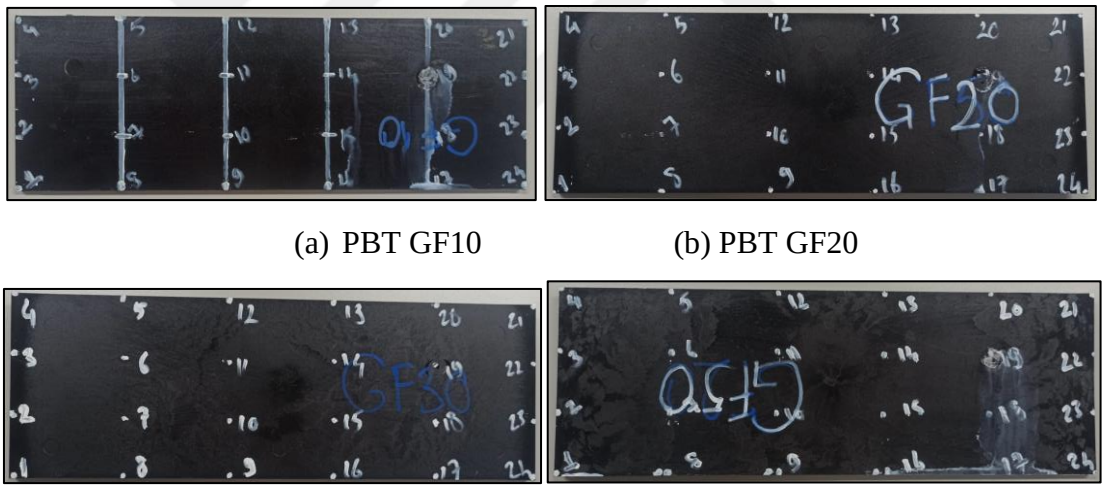
4.1.1. PBT numune Plakaları

Farklı yüzdelere sahip PBT plakaları için öncelikle MEScope® programında numune geometrileri ve koordinatları aşadaki Şekil 4.8'de olduğu gibi oluşturulmuştur. Her bir PBT plaka için ayrı ayrı bu işlem yapılıp plakaların üzerinde 24 ölçüm noktası belirlenip programa tanıtılmıştır.



Şekil 4.8. PBT plaka geometrisi

Şekil 4.9'da gösterildiği gibi 24 ölçüm noktası her bir test plakası üzerinde ayrı ayrı oluşturulmuştur.



(a) PBT GF10 (b) PBT GF20

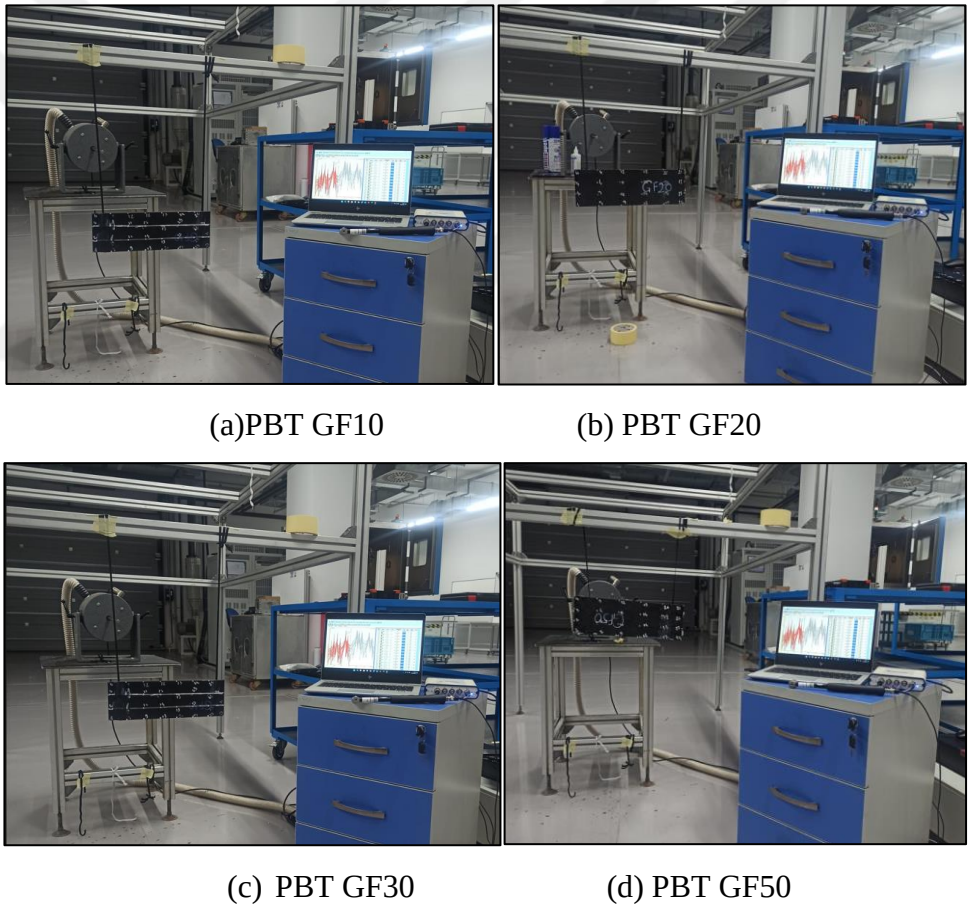
(b) PBT GF30 (d) PBT GF50

Şekil 4.9. Deneysel modal test için işaretlendirilmiş test plakaları

Plakalar üzerinde yapılan bu işlemlerle birlikte deneysel modal analizin yapılması için hazırlıklar tamamlanmıştır. Serbest sınır koşulları altında deneysel modal analizin yapılabilmesi için elastisite modulü oldukça düşük elastik ipler yardımıyla plakalar test sehpasına bağlanmıştır. Elastik ipler test plakalarına bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Böylece deneysel modal analizin yapılmasına hazır hale getirilmiştir. Yapılan bu işlemler ardından plaka testin başlatılması için hazır hale gelmiştir.

4.1.2. PBT Plaka Üzerinde Darbe Çekiç Test Metodu

FRF grafiğinde sonuçları daha temiz elde etmek için darbe çekiç testinde her bir noktaya vurulma sayısı oldukça önemlidir. Vurma sayısı arttıkça FRF grafiğinde daha temiz sonuçlar elde edilir. Literatür incelendiğinde bir nokta için altı kez vurulmasının uygun olduğu görülmüştür. Bu bilgiler ışığında ve yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde PBT plakalara her bir nokta için altı kez vurulması öngörülmüştür. Ardından FRF grafiği elde edilmiştir.



(a)PBT GF10 (b) PBT GF20

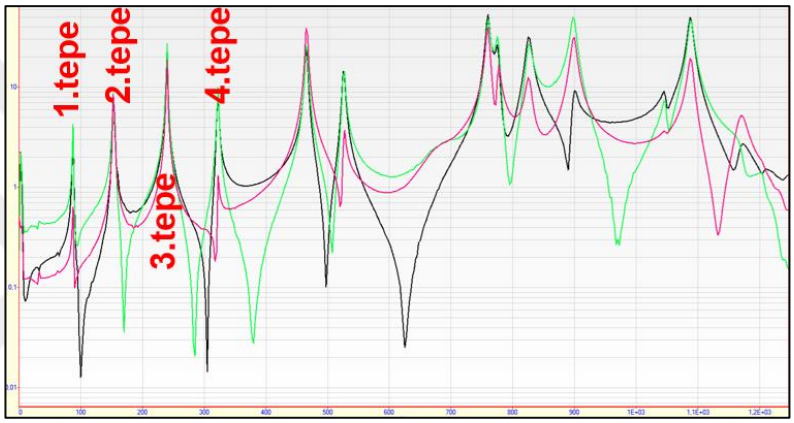
(c) PBT GF30 (d) PBT GF50

Şekil 4.10. Test plakaları düzenekleri

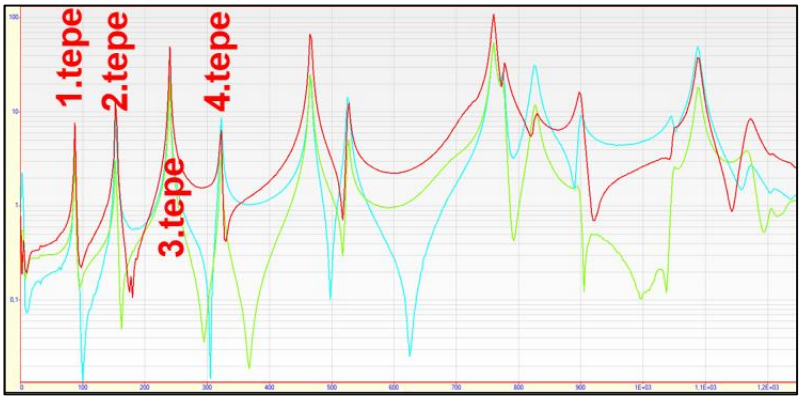
Şekil 4.10'daki düzenek PBT GF10, PBT GF20, PBT GF30 ve PBT GF50 için ayrı ayrı

oluşturulmuştur. Çekiç gezdirme yöntemiyle her bir test plakası için deneysel modal analiz yapılmıştır.

Şekil 4.11'de PBT GF10 fikstür plakasının FRF sonuçları mevcuttur. Şekil 4.11'de test sonrasında oluşan eğriler testi yapılan PBT GF10 plakasının mod şekillerinin en iyi gözlendiği noktalardır. Çalışma için gerekli olan ilk dört tepe noktada plaka üzerinde rezonans oluştuğu görülmektedir.



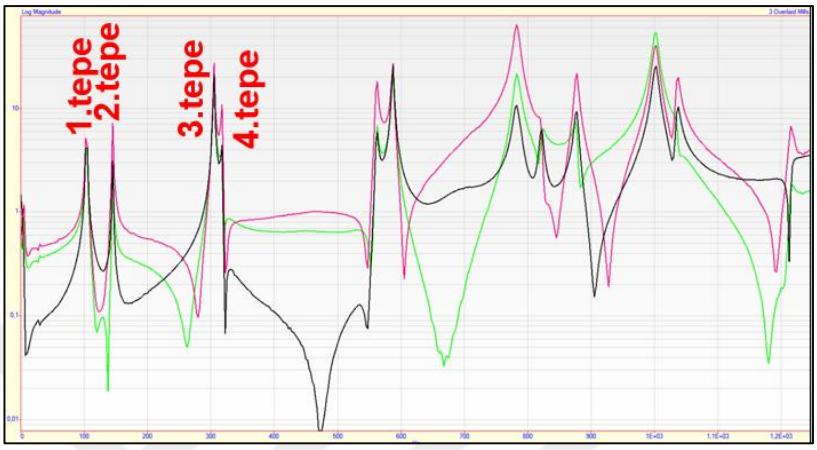
Şekil 4.11. 24 noktalı PBT GF10 FRF sonuçları



Şekil 4.12. 24 noktalı PBT GF20 FRF sonuçları

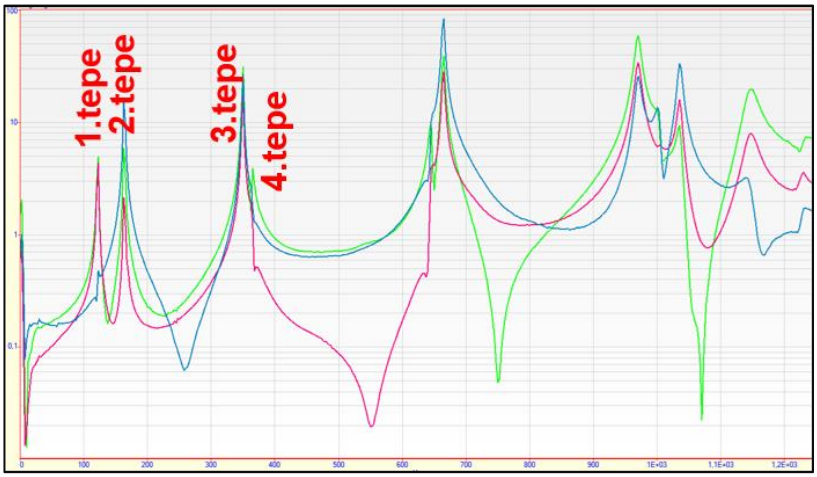
Çalışmanın devamında Şekil 4.12'de gösterilen PBT GF20 plakanın FRF sonuçları mevcuttur. Şekil 4.12'deki test sonrasında oluşan eğriler testi yapılan PBT GF20

plakasının mod şekillerinin en iyi gözlendiği noktalardır. Çalışma için gerekli olan ilk dört tepe noktada plaka üzerinde rezonans oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.13. 24 noktalı PBT GF30 FRF sonuçları

Bir sonraki plaka PBT GF30 malzemesindendir ve FRF sonuçları Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.13'teki test sonrasında oluşan eğriler testi yapılan PBT GF30 plakasının mod şekillerinin en iyi gözlendiği noktalardır. Çalışma için gerekli olan ilk dört tepe noktada plaka üzerinde rezonans oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.14. 24 noktalı PBT GF50 FRF sonuçları

Deneysel modal analiz sürecinde en son plaka PBT GF50 malzemesinden yapılmıştır ve FRF sonucu Şekil 4.14'teki gibidir. Şekil 4.29'daki test sonrasında oluşan eğriler testi yapılan PBT GF50 plakasının mod şekillerinin en iyi gözlendiği noktalardır. Çalışma için gerekli olan ilk dört tepe noktada plaka üzerinde rezonans oluştuğu görülmektedir.

4.1.3. PBT Plaka Deneysel Modal Analiz Gösterimleri

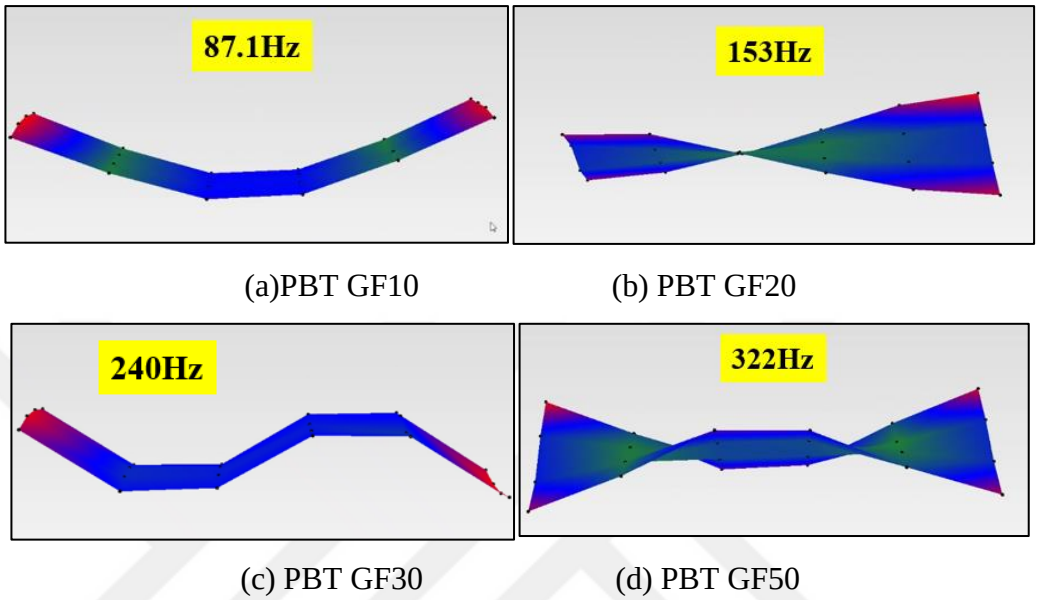
PBT GF10, PBT GF20, PBT GF30 ve PBTGF50 plakalar üzerinde deneysel modal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında her dört plaka için ilk dört mod şekli benzer oluşmuştur. Fakat; doğal frekanslar birbirinden farklıdır ve PBT plaka içerinde cam fiber oranı arttıkça doğal frekanslarda bir artma gözlemlenmiştir. Otomobil çalışma şartları göz önünde bulundurulduğunda maksimum 300 Hz yeterli olarak görülmektedir. Daha sonraki modların tahrik edilmesi çok düşük ihtimaldir.

Çizelge 4.3'te ilk dört mod için PBT GF10 plakasına ait deneysel modal test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.3. PBT GF10 plaka analiz sonuçları

	PBT GF10 Plaka Deneysel Modal Analiz Doğal Frekansı
1.Mod	87.1 Hz
2.Mod	153 Hz
3.Mod	240 Hz
4.Mod	322 Hz

Şekil 4.15‘te PBT GF10 plakasına ait deneysel modal test sonuçlarının ilk dört modunun mod şekilleri verilmiştir.



(a)PBT GF10 (b) PBT GF20

(c) PBT GF30 (d) PBT GF50

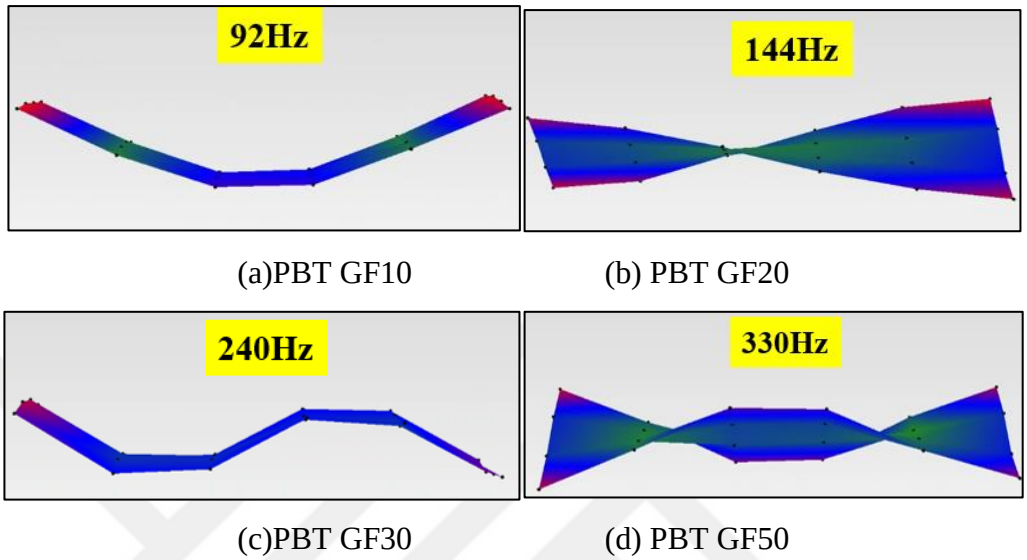
Şekil 4.15. PBT GF10 deneysel modal test ilk 4 mod sonuçları

Çizelge 4.4’te ilk dört mod için PBT GF20 plakasına ait deneysel modal test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.4. PBT GF20 plaka deneysel modal analiz sonuçları

	PBT GF20 Plaka Deneysel Modal Analiz Doğal Frekansı
1.Mod	92 Hz
2.Mod	144 Hz
3.Mod	240 Hz
4.Mod	330 Hz

Şekil 4.16 ‘da PBT GF20 plakasına ait deneysel modal test sonuçlarının ilk dört modunun mod şekilleri verilmiştir.



(a)PBT GF10 (b) PBT GF20

(c)PBT GF30 (d) PBT GF50

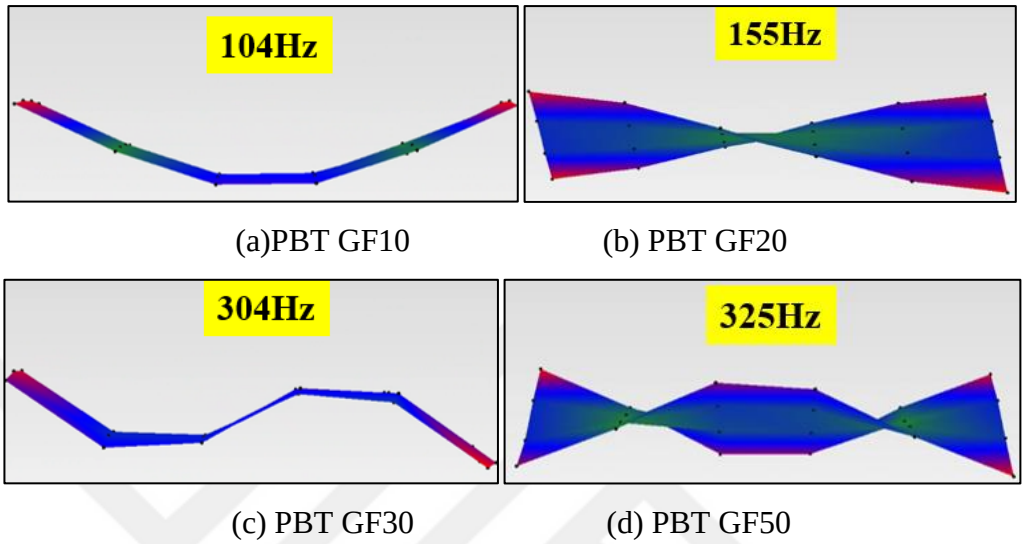
Şekil 4.16. PBT GF20 deneysel modal test ilk 4 mod sonuçları

Çizelge 4.5’te ilk dört mod için PBT GF30 plakasına ait deneysel modal test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.5. PBT GF30 plaka deneysel modal analiz sonuçları

	PBT GF30 Plaka Deneysel Modal Analiz Doğal Frekansı
1.Mod	104 Hz
2.Mod	155 Hz
3.Mod	304 Hz
4.Mod	325 Hz

Şekil 4.17‘de PBT GF30 plakasına ait deneysel modal test sonuçlarının ilk dört modunun mod şekilleri verilmiştir.



(a)PBT GF10 (b) PBT GF20

(c) PBT GF30 (d) PBT GF50

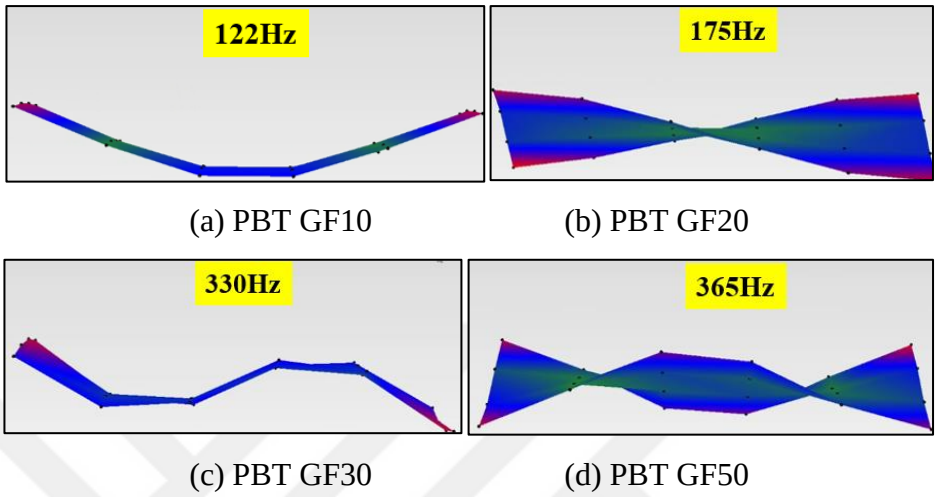
Şekil 4.17. PBT GF30 deneysel modal test ilk 4 mod sonuçları

Çizelge 4.6’da ilk dört mod için PBT GF50 plakasına ait deneysel modal test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.6. PBT GF50 plaka deneysel modal analiz sonuçları

	PBT GF50 Plaka Deneysel Modal Analiz Doğal Frekansı
1.Mod	122 Hz
2.Mod	175 Hz
3.Mod	330 Hz
4.Mod	365 Hz

Şekil 4.18'de PBT GF50 test plakasına ait deneysel modal test sonuçlarının ilk dört modunun mod şekilleri verilmiştir.



(a) PBT GF10 (b) PBT GF20

(c) PBT GF30 (d) PBT GF50

Şekil 4.18. PBT GF50 deneysel modal test ilk 4 mod sonuçları

4.3. Bilgisayar ortamında Modal Analiz Sonuçları

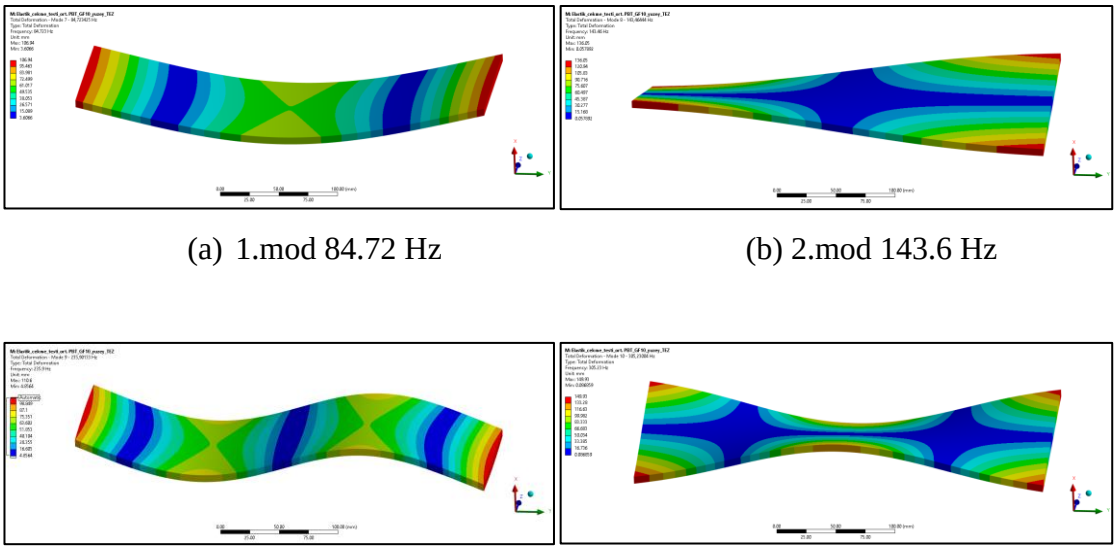
Deneysel modal analiz kullanılan PBT GF10, PBT GF20, PBT GF30 ve PBT GF50 malzemlerinden yapılan dikdörtgen şekilli test numuneleri gerçeğine uygun bir şekilde ölçülerle bilgisayar ortamında çizimleri yapılmıştır. Ardından çekme numunelerinden elde edilem mekanik özellikler yine ANSYS 2023 R2 paket programı içerisinde tanımlanarak malzeme modelleri oluşturulmuştur. Ardından her test numunesi için ayrı ayrı modal analiz gerçekleştirilmiştir.

PBT GF10 malzemeden üretilen test numunesinin bilgisayar ortamında modellenmesi ile birlikte modal analizi gerçekleştirilmiş ve ilk dört frekans Çizelge 4.7‘te belirtilmiştir.

Çizelge 4.7. PBT GF10 plaka bilgisayar destekli modal analiz sonuçları

	PBT GF10 Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Doğal Frekansı
1. Mod	84.72 Hz
2. Mod	143.6 Hz
3. Mod	235.9 Hz
4. Mod	305.23 Hz

PBT GF10 malzemeden yapılmış test numunesinin bilgisayar ortamındaki modal analiz sonucunun ilk 4 mod şekli Şekil 4.19’da belirtilmiştir.



(a) 1.mod 84.72 Hz (b) 2.mod 143.6 Hz

(c) 3.mod 235.9 Hz (d) 4.mod 305.23 Hz

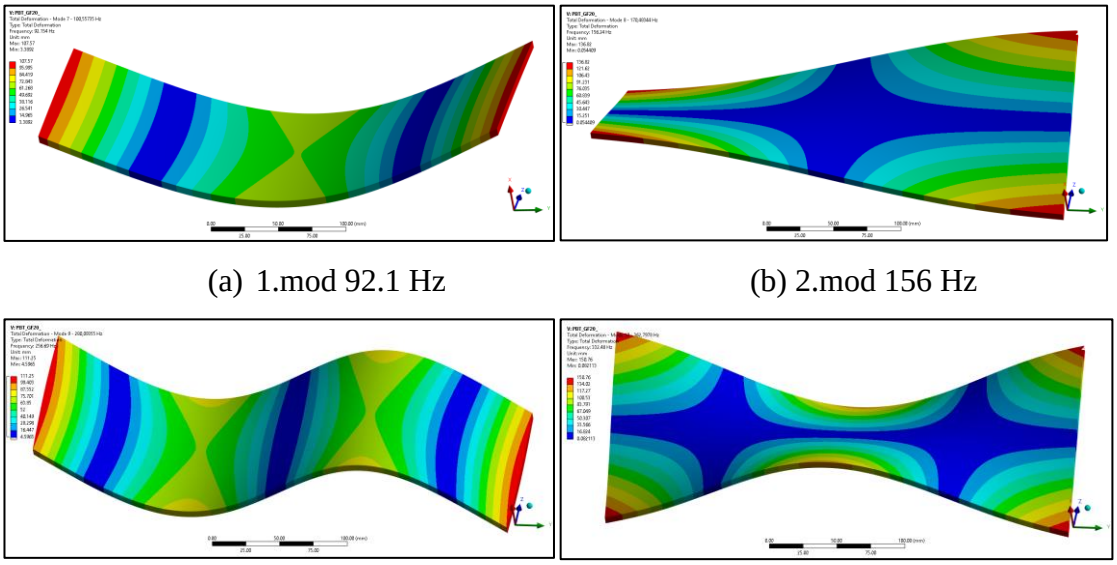
Şekil 4.19. PBT GF10 bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 mod sonuçları

PBT GF20 malzemeden üretilen test numunesinin bilgisayar ortamında modellenmesi ile birlikte modal analizi gerçekleştirilmiş ve ilk dört frekans Çizelge 4.8‘de belirtilmiştir.

Çizelge 4.8. PBT GF20 plaka bilgisayar destekli modal analiz sonuçları

	PBT GF20 Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Doğal Frekansı
1.Mod	92.1 Hz
2.Mod	156 Hz
3.Mod	256 Hz
4.Mod	332 Hz

PBT GF20 malzemeden yapılmış test numunesinin bilgisayar ortamındaki modal analiz sonucunun ilk mod şekli Şekil 4.20’de belirtilmiştir.



(a) 1.mod 92.1 Hz (b) 2.mod 156 Hz

(c) 3.mod 256 Hz (d) 4.mod 332 Hz

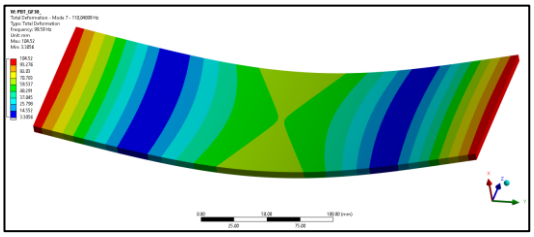
Şekil 4.20. PBT GF20 bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 mod sonuçları

PBT GF30 malzemeden üretilen test numunesinin bilgisayar ortamında modellenmesi ile birlikte modal analizi gerçekleştirilmiş ve ilk dört frekans Çizelge 4.9‘da belirtilmiştir.

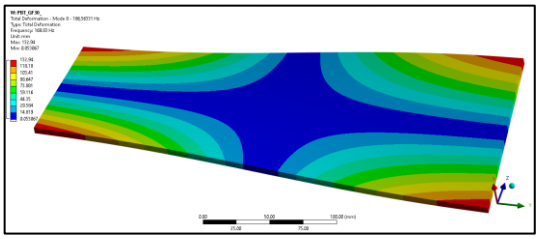
Çizelge 4.9. PBT GF30 plaka bilgisayar destekli modal analiz sonuçları

	PBT GF30 Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Doğal Frekansı
1.Mod	99.5 Hz
2.Mod	168 Hz
3.Mod	277 Hz
4.Mod	359 Hz

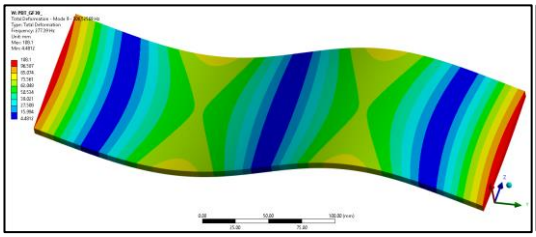
PBT GF30 malzemeden yapılmış test numunesinin bilgisayar ortamındaki modal analiz sonucunun ilk dört mod şekli Şekil 4.21’de belirtilmiştir.



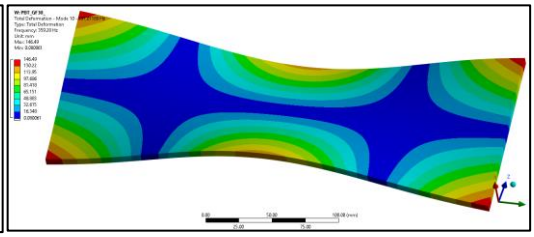
(a) 1.mod 99.5 Hz



(b) 2.mod 168 Hz



(c) 3.mod 277 Hz



(d) 4.mod 359 Hz

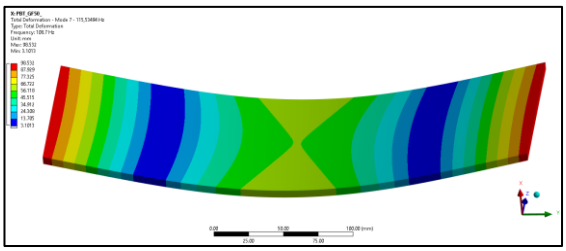
Şekil 4.21. PBT GF30 bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 mod sonuçları

PBT GF50 malzemeden üretilen test numunesinin bilgisayar ortamında modellenmesi ile birlikte modal analizi gerçekleştirilmiş ve ilk dört frekans Çizelge 4.10‘da belirtilmiştir.

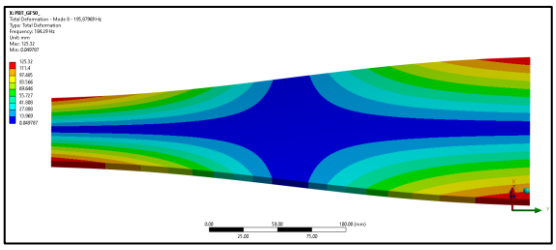
Çizelge 4.10. PBT GF50 plaka bilgisayar destekli modal analiz sonuçları

	PBT GF50 Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Doğal Frekansı
1.Mod	108.7 Hz
2.Mod	184 Hz
3.Mod	302 Hz
4.Mod	392 Hz

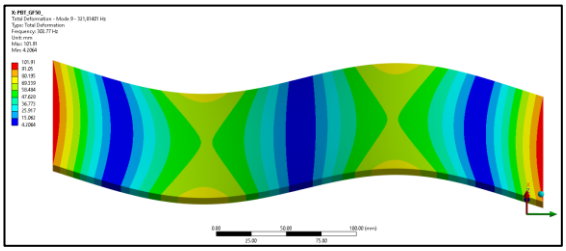
PBT GF50 malzemeden yapılmış test numunesinin bilgisayar ortamındaki modal analiz sonucunun ilk dört mod şekli Şekil 4.22’de belirtilmiştir.



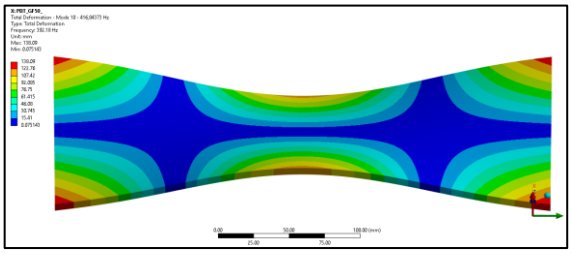
(a) 1.mod 108.7 Hz



(b) 2.mod 184 Hz



(c) 3.mod 302 Hz



(d) 4.mod 392 Hz

Şekil 4.22. PBT GF50 bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 mod sonuçları

4.4. MEScope® Yazılımı Kullanılarak MGM Matrisinin Hesaplanması

Yapılan deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarını elde ettikten sonra sonuçların tutarlılığını incelemek için MGM hesabı yapmamız gerekmektedir. MGM hesabı yapmak için MEScope® yazılımından yardım alınmıştır. PBT plakaları için oluşturulan MGM matris hesaplamalarında yapılan test plakasının noktalarının içerisinde bulunduğu ağ yağısı ve test sırasında toplanan FRF sonuçları kullanılmıştır. Ardından noktalar FRF grafikleri ile eşleştirilip eğriler oluşturulmuş ve mod şekilleri elde edilmiştir.

Deneysel modal analiz MEScope® yazılımına aktarılıp sonra sonlu elemanlar modelinde oluşturulan ağ yapısı ile mod şekilleri de bu yazılıma aktarılmıştır. Hemen akabinde mevcut mod şekilleri yazılımda bulunan sonlu elemanlar modelinde bulunan noktalarla eşleştirmesi yapılmıştır.

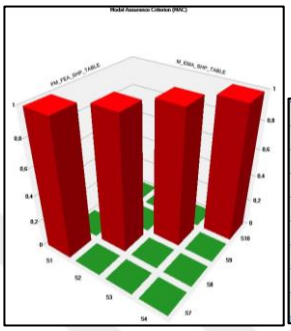
Her dört deney plakası içinde bu işlemer ayrı ayrı tekrarlanıp elde edilen mod şekilleri animasyon şekline getirilip incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

MGM matrisinin elde edilmesi için hem deneysel analiz hemde bilgisayar destekli modal analiz için oluşturular noktalar yazılım içerisinde mümkün olan en yakın noktalardan birbirleri ile eşleştirilmiştir.

Birbirine en yakın noktalar eşlendikten sonra mod şekilleri frekansalar ile birlikte karşılaştırılmış ve MGM hesaplanmıştır.

Karşılaştırma ile birlikte her dört test plakası için bu işlem yapılmıştır.Yapılan açıklamalar neticesinde PBT plakalar için çekiç gezdirme methodu ile yapılan modal analiz ve sonlu elemanlar analizi sonucunda ortaya çıkan veriler için ayrı ayrı hesaplanmış ve MGM matrisleri oluşturulmuştur.

Şekil 4.23'te PBT GF10 test plakasına ait MGM matrisi ve MGM tablosuna yer verilmiştir. MGM matrisi ve MGM tablosundan da anlaşılcağı üzere mod şekillerinin benzerlik oranı 1'e yakındır. Deneysel ve bilgisayar destekli modal analizde mod şekilleri birbirinin aynıdır denilcek kadar yakındır.

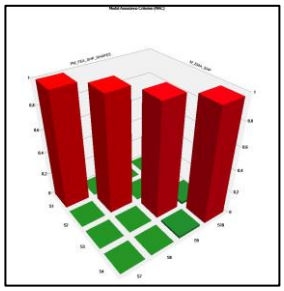


					Shape 7	Shape 8	Shape 9	Shape 10
	Label	PM_FEA_SHP_TABLE						
		Frequency(or Time)			83	141	231	299
	M_EMA_SHP_TABLE		Damping		0	0	0	0
				Damping (%)	0	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	87,1	0,283	0,325	0,993	0,000397	4,64E-05	0,000195
Shape 2	Global-Poly	153	0,617	0,404	0,000766	0,985	0,000205	0,00365
Shape 3	Global-Poly	240	0,673	0,281	0,00219	0,000156	0,992	6,88E-05
Shape 4	Global-Poly	322	1,14	0,353	0,00137	0,00082	5,46E-05	0,988

(a) MGM matrisi (b) MGM tablosu

Şekil 4.23. PBT GF10 plakası MGM matrisi ve MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu)

Şekil 4.24'te PBT GF20 test plakasına ait MGM matrisi ve MGM tablosuna ulaşabilirsiniz. MGM matrisi ve MGM tablosundan da anlaşılcağı üzere mod şekillerinin benzerlik oranı 1'e yakındır. Deneysel ve bilgisayar destekli modal analizde mod şekilleri birbirinin aynıdır denilcek kadar yakındır.

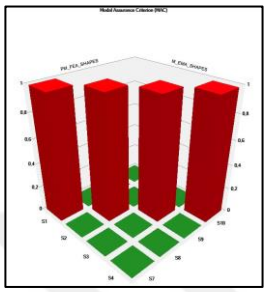


					Shape 7	Shape 8	Shape 9	Shape 10
	Label	PM_FEA_SHP						
		Frequency(or Time)			106	180	296	383
	M_EMA_SHP		Damping		0	0	0	0
				Damping (%)	0	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	92	0,251	0,273	0,991	0,000227	0,00112	6,58E-05
Shape 2	Global-Poly	144	0,759	0,576	0,000619	0,984	0,000245	0,000922
Shape 3	Global-Poly	240	0,589	0,218	0,00113	0,000135	0,986	2,14E-05
Shape 4	Global-Poly	330	0,894	0,305	8,23E-05	0,000169	0,000186	0,987

(a) MGM matrisi (b) MGM tablosu

Şekil 4.24. PBT GF20 plakası MGM matrisi ve MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu)

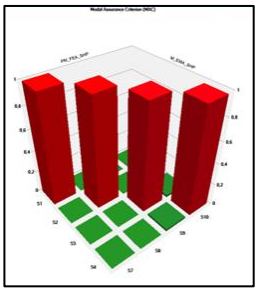
Şekil 4.25'te PBT GF30 test plakasına ait MGM matrisi ve MGM tablosuna ulaşabilirsiniz. MGM matrisi ve MGM tablosundan da anlaşılcağı üzere mod şekillerinin benzerlik oranı 1'e yakındır. Deneysel ve bilgisayar destekli modal analizde mod şekilleri birbirinin aynıdır denilcek kadar yakındır.



					Shape 7	Shape 8	Shape 9	Shape 10
	Label	PM_FEA_SHAPES						
		Frequency(or Time)			113	191	314	406
	M_EMA_SHAPES		Damping		0	0	0	0
				Damping (%)	0	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	104	0,249	0,24	0,99	0,000476	6,75E-05	0,000467
Shape 2	Global-Poly	145	0,538	0,372	0,000439	0,992	0,000658	0,000433
Shape 3	Global-Poly	304	0,655	0,215	0,00158	0,00074	0,983	0,00197
Shape 4	Global-Poly	317	0,97	0,306	0,00118	0,00167	0,000572	0,981

Şekil 4.25. PBT GF30 plakası MGM matrisi ve MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu)

Şekil 4.26'da PBT GF50 test plakasına ait MGM matrisi ve MGM tablosuna ulaşabilirsiniz. MGM matrisi ve MGM tablosundan da anlaşılcağı üzere mod şekillerinin benzerlik oranı 1'e yakındır. Deneysel ve bilgisayar destekli modal analizde mod şekilleri birbirinin aynıdır denilcek kadar yakındır.



					Shape 7	Shape 8	Shape 9	Shape 10
	Label	PM_FEA_SHP_SHAPES						
		Frequency(or Time)			106	180	296	383
	M_EMA_SHP		Damping		0	0	0	0
				Damping (%)	0	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	122	0,363	0,298	0,993	0,000111	0,000292	0,000205
Shape 2	Global-Poly	175	0,564	0,345	1,11E-05	0,994	0,000356	2,56E-05
Shape 3	Global-Poly	330	0,813	0,233	0,000274	0,000203	0,972	0,0204
Shape 4	Global-Poly	365	1,33	0,365	0,000107	0,000554	0,0179	0,972

Şekil 4.26. PBT GF50 plakası MGM matrisi ve MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu)

Şekilsel bakımda değerlendirme yapıldıktan sonra modların frekans bakımından değerlendirmesininde ayrıca yapılması gerekmektedir. Bunu yaparken herhangi bir program kullanmadan bir karşılaştırma yapıldı.

Çizelge 4.11'de görüldüğü gibi PBT GF10 plakasının deneysel modal analiz ve bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 rezonans frekansları bilgileri verilmiştir. Değerler birbirlerine yakındır. MGM matrislerinden şekilsel benzerlik değeri çok yüksek bulunmuştur.

Çalışmanın paralelinde frekans değerleri incelendiğinde onlarda birbirlerine yakındır. Deneysel ve bilgisayar ortamında yapılan modal analizler arasında yüzdesel fark %1.7 ile %4.79 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.11. PBT GF10 plaka bilgisayar destekli modal analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması

	PBT GF10 Plaka Deneysel Modal Analiz Doğal Frekansı	PBT GF10 Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Doğal Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	87.1 Hz	84.72 Hz	2.73
2. Mod	153 Hz	143.6 Hz	3.86
3. Mod	240 Hz	235.9 Hz	1.7
4. Mod	322 Hz	305.23 Hz	4.79

Çizelge 4.12'de görüldüğü gibi PBT GF20 plakasının deneysel modal analiz ve bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 rezonans frekansları bilgileri verilmiştir. Değerler birbirlerine yakındır. MGM matrislerinden şekilsel benzerlik değeri çok yüksek bulunmuştur. Çalışmanın paralelinde frekans değerleri incelendiğinde onlarda birbirlerine yakındır. Deneysel ve bilgisayar ortamında yapılan modal analizler arasında yüzdesel fark %0.11 ile %8.33 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.12. PBT GF20 plaka bilgisayar destekli modal analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması

	PBT GF20 Plaka Deneysel Modal Doğal Analiz Frekansı	PBT GF20 Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Doğal Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	92 Hz	92.1 Hz	0.11
2. Mod	144 Hz	156 Hz	8.33
3. Mod	240 Hz	256 Hz	6.66
4. Mod	330 Hz	332 Hz	0.61

Çizelge 4.13'de görüldüğü gibi PBT GF30 plakasının deneysel modal analiz ve bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 rezonans frekandsları bilgileri verilmiştir. Değerler birbirlerine yakındır. MGM matrislerinden şekilsel benzerlik değeri çok yüksek bulunmuştur. Çalışmanın paralelinde frekans değerleri incelendiğinde onlarda birbirlerine yakındır. Deneysel ve bilgisayar ortamında yapılan modal analizler arasında yüzdesel fark %4.33 ile %10.46 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.13. PBT GF30 plaka bilgisayar destekli modal analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması

	PBT GF30 Plaka Deneysel Modal Analiz Doğal Frekansı	PBT GF30 Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Doğal Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	104 Hz	99.5 Hz	4.33
2. Mod	155 Hz	168.8 Hz	8.9
3. Mod	304 Hz	277 Hz	8.88
4. Mod	325 Hz	359 Hz	10.46

Çizelge 4.14'de görüldüğü gibi PBT GF50 plakasının deneysel modal analiz ve bilgisayar destekli modal analiz ilk 4 rezonans frekansları bilgileri verilmiştir. Değerler birbirlerine yakındır. MGM matrislerinden şekilsel benzerlik değeri çok yüksek bulunmuştur. Çalışmanın paralelinde frekans değerleri incelendiğinde onlarda birbirlerine yakındır. Deneysel ve bilgisayar ortamında yapılan modal analizler arasında yüzdesel fark %5.14 ile %10.9 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.14. PBT GF50 plaka bilgisayar destekli modal analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması

	PBT GF50 Plaka Deneysel Modal Analiz Doğal Frekansı	PBT GF50 Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Doğal Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	122 Hz	108.7 Hz	10.9
2. Mod	175 Hz	184 Hz	5.14
3. Mod	330 Hz	302 Hz	8.48
4. Mod	365 Hz	392 Hz	7.4

Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 incelendiği zaman yapılan deneysel modal analizler ile bilgisayar destekli modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında aralarında çok fazla bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada modlar hem şekil olarak hemde frekans değerleri açısından farkların olmadığı eklenilen sonuçlara bakıldığında görülmektedir.

4.5. Işık Titreşimi Problemi ve Çözümü

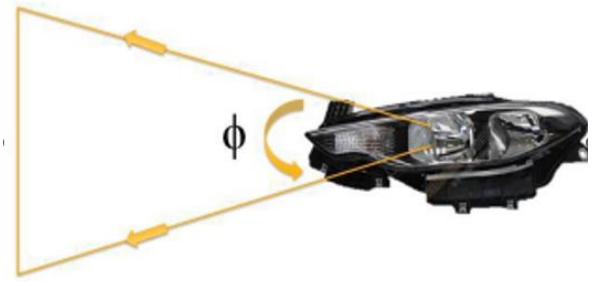
Teknolojide gerçekleşen gelişmelerle birlikte her konuda gelişmeler yaşanmıştır. Oluşan gelişmelerle birlikte teknolojinin her alanında istekler değişmiştir. Ön aydınlatma grubunda da hem estetik istemler hemde yapısal istemler birbirini etkileyecek şekilde artmıştır. Otomotiv aydınlatma sektöründe gelişmeyi tetikleyen etmenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Araçların aero-dinamik yapısı ihtiyacına karşılık verebilmek.
- Enjeksiyon ve kaplama teknolojilerindeki gelişimler.
- Güvenlik gereksinimleri.
- Parçalar tasarlanırken yasal gereklilikler.
- Ticari şirketlerin kendi standart şartnameleri
- Ekonomik gereklilikler

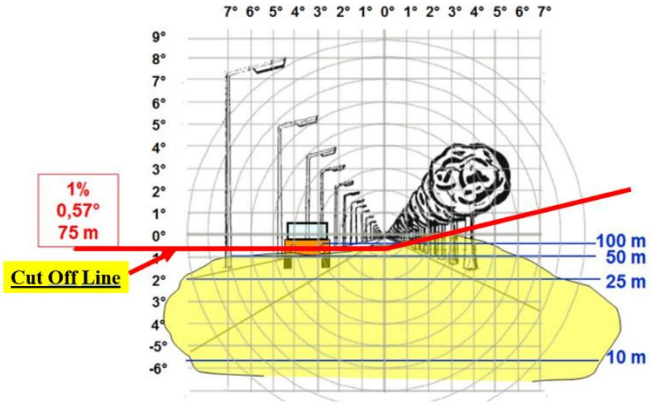
- Kullanılan parçalarda ömür konusunda yapılan çalışmalar (Elkhatib & Poorman, 2007)

Yukarıda belirtilen etmenler otomotiv aydınlatma sektöründe gelişmeleri tetiklemiştir. Bununla birlikte tasarım aşamasında daha fazla bilimsel çalışma yapılması gerekliliği doğurmuştur.

Ön aydınlatma grubunda istemlere ana çerçeveden bakıldığında kullanılan yapıların statik ve ömür açısından dayanımının sağlanıyor olması gereklidir. Bununla birlikte araç üzerine yoldan gelen ve aralığı genellikle 10 Hz ile 50 Hz arasında olan yüksek genliklerde titreşim mevcuttur. Ön aydınlatma grubunda üzerinde rezonansla beraber ışık kaynağı üzerinde bir ışık titremesi söz konusu olur. Işık titremesi özellikle karşıdaki sürücü için oldukça rahatsız edici bir durumdur. Sürüş konforunu ve güvenliğini tehdit eder. Bu ışık titremesinin kabul edilebilir bir genlik seviyesi mevcuttur (Ediz et al., 2022).



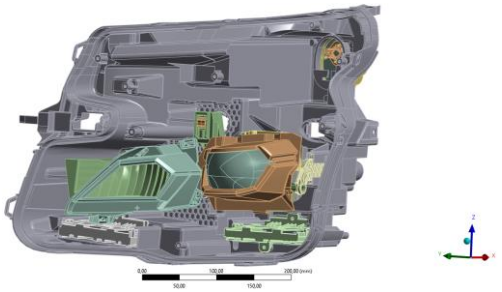
Şekil 4.27. Işık titremesinin ön aydınlatma grubunda gösterilmesi



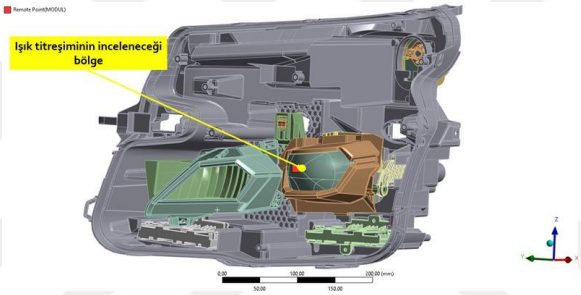
Şekil 4.28. Cut off line çizgisinin yol üzerinde gösterilmesi

Işık titremesi konusunun otomobil sürüşü esnasındaki sıkıntısını daha ayrıntılı anlatmak gerekir ise; Şekil 4.28'de belirtilen kırmızı çizgi 'cut off line' olarak adlandırılır. Cut off line altında kalan bölge aydınlık bölgedir ve rezonans esnasında ışık kaynağının hareketi ile birlikte belirli bir genlikte hareket eder. Örneğin; aşağı yukarı hareketi söz konusu olduğunda Şekil 4.27'de ışık kaynağı üzerinde oluşan bir titreşimle birlikte ışığın titreşim hareketine bağlı olarak yaptığı aşağı ve yukarı hareketin ne kadarlık bir alanı taradığını görmek mümkündür. Bu hareket karşı tarafta bir rahatsızlık oluşturur. Gerçek hayatta bu olay ışık titremesi testi ile tespit edilir. Tasarım aşamasında ise bilgisayar destekli analiz programları yardımıyla tasarım aşamasında fikir elde edilir. Çalışmanın devamında mekanik özellikleri elde edilen malzemelerden mekanik dayanımı ve titreşim özellikleri bakımından iyi sonuçlar elde ettiğimiz PBT GF50 malzemesinin ışık titreşimini iyileştirmesi açısından kullanılmasını inceleyeceğiz.

Işık titremesi konusu hakkında modal analiz ve harmonik analizden yardım alabiliriz. Modal analizle karar verebilceğiniz konular; ön aydınlatma grubunun rezonans bilgisi ve ilgili rezonans frekansında yapının hareketidir. Bu sonuçlar ışığında ön aydınlatma grubunda ışık kaynağının hangi frekansta titreşeceğini bulabiliriz. Eğer bu frekans değerinde ışık titremesinin genliğini bulmak istiyor ise bunun için harmonik analizden yardım almamız gerekmektedir. Şekil 4.29'da ilgili çalışmanın yapıldığı ön aydınlatma grubunun resmi gösterilmiştir.

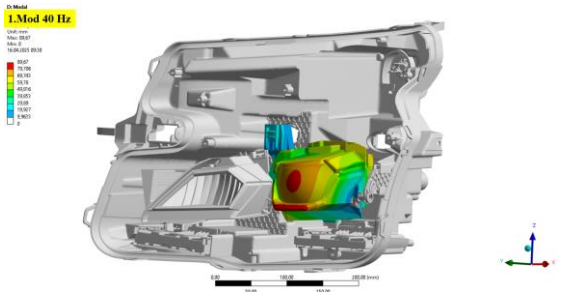


Şekil 4.29. Işık titremesi çalışması yapılan ön aydınlatma grubu



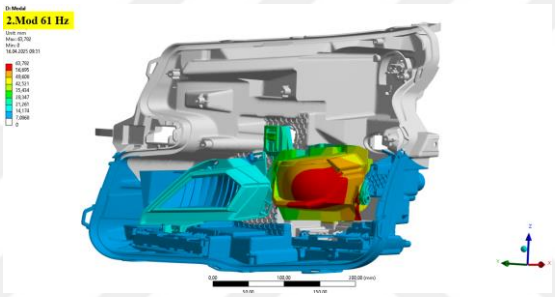
Şekil 4.30. Modal analiz sonucu ışık titreşiminin inceleneceği bölge

Şekil 4.29'da belirtilen bölge modal analiz sonrasında ışık titreşimi açısından incelenecektir. Çalışmanın devamında Şekil 4.29'da belirtilen ön aydınlatma grubunda bilgisayar destekli modal analiz yapılmıştır. Şekil 4.31'de 1.mod şekli ve frekans değeri gösterilmiştir.



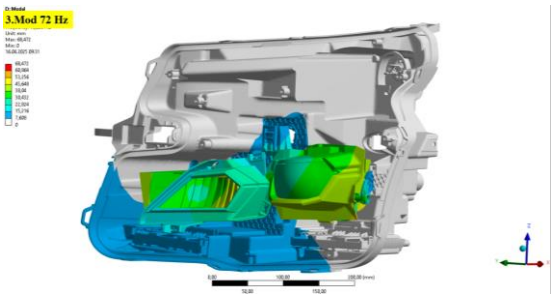
Şekil 4.31. Ön aydınlatma grubunun 1.mod şekli ve frekans bilgisi

Ön aydınlatma grubunda Şekil 4.31'den de görüldüğü gibi rezonans ışık kaynağı üzerinde ve 40 Hz'te oluşmaktadır. Genel çalışma şartları 10 Hz ile 50 Hz'tir. Bu frekans değerleri içerisinde ışık kaynağı üzerinde herhangi bir titreşim hareketi oluşması istenmemektedir. Modal analiz sonuçları incelendiğinde ışık titremesinde yer değiştirmenin ilk modda oluşacağı görülmüştür. Çalışma devamında diğer mod şekilleri ve frekans bilgileri incelenmiştir. Şekil 4.32'te 2.mod sonucu şekli ve frekans bilgisi mevcuttur. Ön aydınlatma grubunun hareketine reflektör ve gövde grubu da katılmıştır ve 2.mod 61 Hz 'te gerçekleşmiştir.



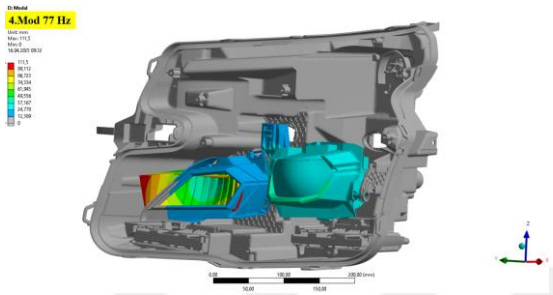
Şekil 4.32. Ön aydınlatma grubunun 2.mod şekli ve frekans bilgisi

Çalışma devamında ön aydınlatma grubunun hareketini daha iyi anlayabilmek için 3.mod şekli ve frekans bilgiside incelenmiştir. Şekil 4.33'te 3.mod şekli ve frekans bilgisi mevcuttur. 3.mod 72 Hz'te oluşmuştur. Hareket yine ışık kaynağı, reflektör ve gövde üzerinde oluşmaktadır. Gövdenin 3.mod şeklindeki harekete daha fazla oranda katıldığı Şekil 4.33'ten de görülebilmektedir.



Şekil 4.33. Ön aydınlatma grubunun 3.mod şekli ve frekans bilgisi

3.Mod 72 Hz'te oluşmuştur ve mod şekline reflektör ve gövde hareketi de katılmıştır. 4.Mod şeklininde ön aydınlatma grubunun hareketinin anlaşılması açısından incelenmesi Şekil 4.34'te belirtilmiştir.



Şekil 4.34. Ön aydınlatma grubunun 4.mod şekli ve frekans bilgisi

Şekil 4.34'te belirtilen 4.mod şekli incelendiğinde hareket reflektör üzerinde maksimum olmak kaydı ile reflektör ve modül üzerinde gerçekleşmiştir ve rezonans frekansı 77 Hz'tir.

İlk dört mod frekans bilgisi Çizelge 4.15'ten incelenebilir.

Çizelge 4.15. İlk 4 mod frekans bilgisi

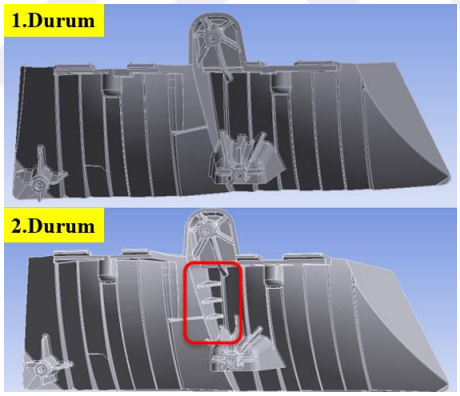
Mod Numarası	**Frekans [Hz]**
1	40
2	61
3	72
4	77

Hem harmonik analiz için hemde yapının hareket bilgisini edinmek için modal analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçları belirtilmiştir. Bu sonuçlar neticesinse ışık titreşimi 40 Hz'te maksimum seviyede olucağı bellidir.

Işık titremesi açısından bakıldığında genel çalışma frekansı olan 10 Hz ile 50 Hz arasında ışık kaynağı üzerinde bir rezonans oluşması istenmemekte idi. Bizim çalışmamızda modal analiz sonucu neticesinde ilk modda ışık kaynağının rezonansı 40 Hz'tir. 50 Hz'in altında ışık kaynağı rezonansı bulunduğu için bununla ilgili bir çalışma yapılması gerekmektedir.

Işık titremesi problemini giderebilmek için genel çalışmalar neticisinde izlenebilcek 3 farklı ana yol mevcuttur. Bunları sıralamak gerekirse;

- Işık kaynağının ışık titremesine sebep olan rezonans frekansını sınır frekans değerinden yukarıya ötelemek bir çözüm olabilir. Bu frekansı öteleyebilmek için ölçüm yapılan parça üzerinde çeşitli güçlendirme çalışmaları yaparak rezonans frekasını daha üst değerlere öteleme gerçekleştirilebilir.

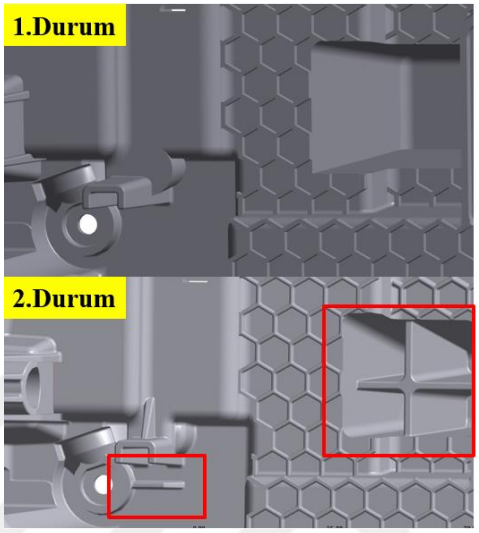


Şekil 4.35. Yapısal iyileştirme yardımı ile ışık titreşiminin önüne geçilmesi

Şekil 4.35'te reflektörün titremesi kaynaklı oluşan ışık titremesinin sınır frekans değerinden ötelemek için yapılan iyileştirme örneğini bulabilirsiniz. 2.Durumda belirtilen yere yapısal iyileştirme eklenerek ışık titremesi frekans değeri daha üst frekans değerlerine ötelenmesi fikri düşünülmüştür.

- Işık titremesini incelemek için ölçüm yapılan parçada yapılan değişikler sonucu yeterli seviyede üst frekanslara taşıyamıyorsa ilgili parçanın bağlı olduğu

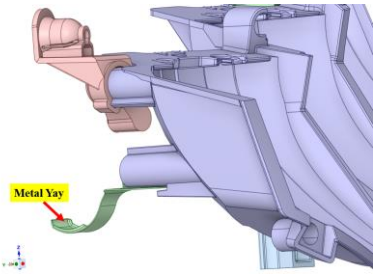
parçaların hareketleri incelenip bunlar üzerinde yapısal değişiklikler yapılarak ya da malzeme değişikliğine gidilerek güçlendirme çalışmaları yapılabilir.(Örn: Holding frame, gövde vb.)



Şekil 4.36. Işık kaynağı dışındaki parçalarda iyileştirme yapılması

Şekil 4.36'da gövde üzerinde çeşitli yapısal dayanım arttırıcılar kullanılarak ışık titremesi probleminin çözümü konusunda örnek verilmiştir.

- Bir önceki maddelerde uygulanan fikirler işe yaramadığı durumda ışık titremesi problemi oluşturan ilgili parça yada grubun tasarım açısından uygun bulunan bir bölgesine titreşim esnasında oluşan yer değiştirmeyi düşürücek bir tasarımı eklenir. Şekil 4.37'de ışık titremesi genliğini düşürmek için kullanılan yay örneği mevcuttur.



Şekil 4.37. Işık titremesini azaltmak için konulan yay

Yukarıdaki maddeler mevcut ön aydınlatma grubunda ön tasarım çalışmaları yapılırken bilgisayar destekli analiz çalışmaları yardımıyla elde edilen sonuçlarında yardımıyla belirlenir. Belirtilen çözümler tahmin edilbilceği gibi tasarım bütçesi ve üretilebilirlik gibi konular göz önünde bulundurularak kararlaştırlabilir. Mevcut çalışmamız üzerinde ilerlediğimizde ilk önce modal analizde ışık kaynağı üzerinde oluşan ilk moddaki hareketi inceleyerek yapabilceklerimize karar verebiliriz.

Çalışmanın devamında yapılan incelemeler neticesinde holding frame parçası üzerindeki hareketi Şekil 4.38'den incelediğimizde ilgili parçanın rijitliğini arttırdığımızda ilk modun daha yüksek frekanslara ötelenebilceği aşikardır. Şekil 4.38'den de anlaşılacağı gibi holding frame üzerinde bir bükülme hareketi mevcuttur. Bu hareketi engellemek için ya parça üzerinde parçanın bükülmesini kolaylaştıran hat üzerinde yapısal eklemeler yapılarak bunun önüne geçilmesi sağlanabilir. Fakat; çalışmamızın ilk aşamalarında elde ettiğimiz malzeme verilerinden mekanik ve dinamik açıdan dayanımı iyi olan PBT GF50 malzemesini kullanarakta bu frekansı ötelemeye çalışması yapabiliriz.



Şekil 4.38. Holding frame 1.modal analiz 1.mod şekli

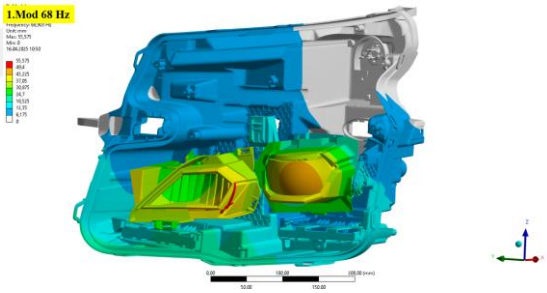
Şekil 4.38'de gösterilmiş olan parça için kullanılan malzeme PBT'dir. PBT malzemesi için kullanılan mekanik analizler testler neticesinde elde edilmiştir.

PBT malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 4.16‘da belirtildiği gibidir.

Çizelge 4.16. PBT mekanik malzeme özellikleri

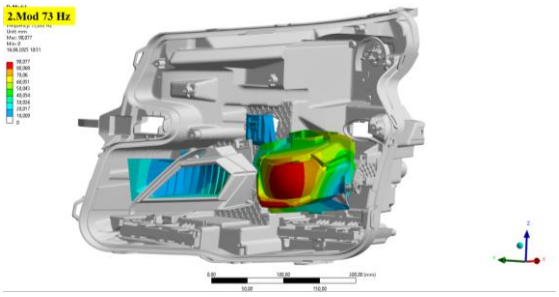
Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Elastik modülü [GPa]	Poisson Oranı
PBT	1.31	1977	0.4

Çalışmanın devamında Şekil 4.38’de gösterilmiş braket için PBT GF50 malzemesi kullanılarak modal analiz yapılıp ilk dört rezonans değerinin ve şeklinin incelenmesi planlanmıştır. Rezonans frekanslarını inceleyerek ışık titremesi hareketinin hangi moda ötelendiğinin yorumu yapılacaktır.



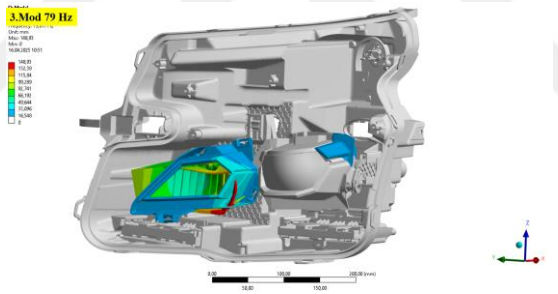
Şekil 4.39. Ön aydınlatma grubunun 1.mod şekli ve frekans bilgisi

Şekil 4.39’da 1.mod şekli ve frekans bilgisi beliritlmiştir. Ön aydınlatma grubunda ilk mod hareketi reflector ve modül hareketine gövde hareketinin de katılmasıyla 68 Hz’te oluşmuştur. Modülün hareketine bakıldığında ışık titremesinin 68 Hz’te maksimum oluşacağı ön görülmektedir.



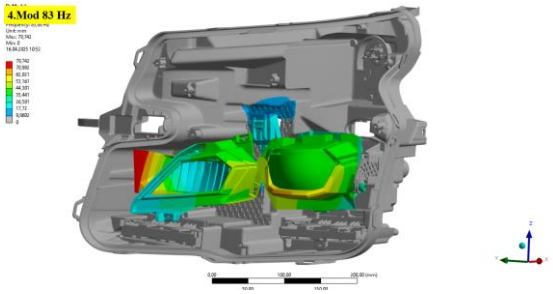
Şekil 4.40. Ön aydınlatma grubunun 2.mod şekli ve frekans bilgisi

Şekil 4.40'ta 2.mod şekli ve frekans bilgisi gösterilmiştir. 2. Mod 73 Hz'te oluşmuştur. Hareket reflektör ve modülün hareketinden oluşmaktadır. Çalışma devamında yapının hareketinin ayrıntılı incelenmesi için 3.Mod şekli ve frekansının incelenmesi öngörülmüştür.



Şekil 4.41. Ön aydınlatma grubunun 3.mod şekli ve frekans bilgisi

Şekil 4.41'de 3.mod şeklinin 79 Hz'te olduğu bilgisi verilmiştir. Mod şekli incelendiğinde hareketin tekrardan reflektör ve modül üzerinde oluştuğu gözlenmiştir. Çalışma devamında Şekil 4.42'te 4.mod ve frekans bilgisi verilmiştir.



Şekil 4.42. Ön aydınlatma grubunun 4.mod şekli ve frekans bilgisi

Şekil 4.42'de 4.modun 83 Hz'te oluşturğu görülmektedir. 4.mod hareketinde reflektör ve modülün hareketi gözlenmektedir. Hareket ayrıntılı incelendiğinde modülün gövde ile bağlantısının da harekete katıldığı gözlenmektedir.

İlk dört mod frekans bilgisi Çizelge 4.17'de incelenebilir.

Çizelge 4.17. İlk 4 mod frekans bilgisi

Mod Numarası	**Frekans [Hz]**
1	68
2	73
3	79
4	83

5. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada birçok sektörde kullanılan plastik malzemelerden olan PBT malzemesinin farklı cam fiber (GF) katkı oranına bağlı olarak değişen mekanik özelliklerini elde etmek için çekme testine başvulmuştur. Ardından kullanılması planlanan tasarımda dinamik durumlarda da incelenmesi gerektiği için deneysel modal analizler PBT GF10, PBT GF20, PBT GF30 ve PBT GF50 fikstür plakaları üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deneysel anlamda sonuçlar elde edildikten sonra bilgisayar ortamında çekme analizinden elde edilen veriler girilerek her bir malzeme için ayrı ayrı malzeme modelleri oluşturulmuştur. Bunun akabinde bilgisayar destekli modal analizler PBT GF10, PBT GF20, PBT GF30 ve PBT GF50 fikstür plakaları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.
Deneysel modal analiz ve bilgisayar destekli modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında uyumluluğun iyi bir derece olduğu görülmüştür. Sonuçlar incelenirken ilk dört mod kullanılmıştır. Bunun nedeni otomobil çalışma şartları açısından ilk dört modun incelenmesi yeterlidir. Bu sonuç oluşturduğumuz malzeme modelini ilerleyen çalışmalarda kullanabileceğimizi doğrulamaktadır.

Çalışmanın devamında ise ön aydınlatma grubunda modal analiz yapılarak titreşim davranışı hakkında bilgi edinilmesi sağlanmıştır. Bahsi geçen ışık titremesi problemi mevcut ön aydınlatma grubunda mevcuttur. Bu ışık titremesi sorununun giderilebilmesi için 3 ayrı ana başlıkta düşünülen fikirlerden ilki olan ışık kaynağının bağlı olduğu parça üzerinde malzeme değişimi gerçekleştirilerek mevcut titreşim frekansını ötelemenin uygulanmasına karar verilmiştir. Çalışmanın başında yapılan testlerden elde edilen sonuçlar neticesinde mekanik anlamda dayanıklılığı yüksek olan PBT GF50 malzemesi kullanılarak ilgili parçayı kuvvetlendirme yoluna gidilmiştir. Bu fikri uygulamak için ön aydınlatma grubunda bulunan Şekil 4.38'de gösterilen holding frame parçasına PBT GF50 malzemesi tanımlanıp bilgisayar destekli modal analiz tekrarlanmıştır ve ışık kaynağının ilk titreşim modunun daha yüksek frekanslara ötelenmesi sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

Altındal, S. (2009). *Yarı-Kesikli Bir Stiren Polimerizasyon Reaktörünün Bulanık Kontrol Yöntemi İle Sıcaklık Kontrolü* [Yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ay, E. (2019). *Plastik Malzemeden Üretilmiş Otomotiv Aydınlatma Parçalarının Modal Analizi ve Sonlu Elemanlar Modelinin Güncellenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Uludağ Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ay, E., Ediz, B., Çal, T., & Çetin, S. T. (2019). Modal Analysis Of Automotive Rear Lamp Lens Produced From Plastic Material. *International Journal of Automotive Science And Technology*, *3*(4), 84–91. https://doi.org/10.30939/IJASTECH..578812

Baldan, E. (2018). *Otomotiv Fan Kanadının Dinamik Karakteristiğinin Deneysel ve Teorik Modal Analiz Metotları ile İncelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çal, E. (2024). *FR4 ve Aluminyum PCB Test Plakalarının MAC Metodu Kullanılarak Titreşim Davranışlarının İncelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1964). *An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series*. https://www.ams.org/journals/mcom/1965-19-090/S0025-5718-1965-0178586-1/S0025-5718-1965-0178586-1.pdf

Darbe Çekici Uçları. (n.d.). Retrieved April 28, 2025, from https://rmc.com.tr/otomatik-darbe-cekici/

Doç, Y., & Dal, H. (2019). *Sönümlü Serbest Titreşim Deney Föyü*. https://mustafaeroglu.sakarya.edu.tr/sites/mustafaeroglu.sakarya.edu.tr/file/sonumlu_serbest_titresimler_deney_FOY_2019.pdf

Ediz, B., Ay, E., & Öztürk, E. (2022). *Application of rotational accelerometers on the measurement of automotive headlamp cut-off deviation*. https://doi.org/10.26701/ems.989166

Elkhatib, F., & Poorman, T. (2007). Resonant Frequency Prediction of Automotive Lamps. *SAE Technical Papers*. https://doi.org/10.4271/2007-01-0603

Erdemir, F., & Ozkan, M. T. (2019). Plastik Parçalarda Bir Esneyerek Kilitlenen Bağlantı Modelinin Modal Analizi. *Journal of Polytechnic*, *22*(4), 927–933. https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.499235

Erdoğan, G. (2016). *Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelrin Modal Analizi* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ewins, D. J. . (2000). *Modal testing : theory, practice, and application*. 562.

Fu, Z.-F., & He, J. (2001). Modal Analysis - 1st Edition. In *Elseivier*. Butterworth Heinemann.

Güvenç, M. A. (2021). *Tornalama Süreçlerinde Aktif Titreşim Kontrolü,Yapay zeka Uygulamaları veNesnelerin İnterneti Uygulamaları* [Doktora tezi]. İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.

İbram, E. (2022). *Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı İç Geometrilere Sahip PLA Esaslı Plakaların Serbest Tşitreşim Analizi* [Yüksek lisans tezi]. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

ISO 2631-1. (n.d.). Retrieved April 25, 2025, from https://www.iso.org/standard/7612.html

Kablo Yapıları. (n.d.). Retrieved April 25, 2025, from https://www.electramuhendislik.com/2024/01/24/kablo-yapilari/

Kalkan, A. (2022). *Yeni Fotoaktifbir Zincirtransfer Ajanının Sentesi ve Fart/Madix Polimerizasyonunda Kullanımı* [Yüksek lisans tezi]. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Korkmaz, B. Ş. (2023). *Modal Test ve Sonlu Elemanlar Metodu İle Bir Biyelin Titreşim Analizi* [Yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Liese, M., Bluhm, R., Queisser, J., & Ickes, G. (2003). Thermoplastics for innovative vehicle lighting. *ATZ Worldwide 2003 105:7*, *105*(7), 20–22. https://doi.org/10.1007/BF03224616

Maia, N. M. Mendes., & Montalvao e Silva, J. M. (1998). *Theoretical and experimental modal analysis*. Research Studies Press.

Modal Test İpuçları: Darbe Çekici Gezdirme ve İvmeölçer Gezdirme. (n.d.). Retrieved April 25, 2025, from https://blog.dta.com.tr/modal-ipuclari-cekic-gezdirme-ve-ivmeolcer-gezdirme/

Modal Test Ve Modal Analiz. (n.d.). Retrieved April 25, 2025, from https://rmc.com.tr/modal-test-ve-modal-analiz/

Otomobil Üreticileri ve Tedarikçileri İçin Değiştirilmiş Pbt Mühendislik Plastik Pbt Gf30 Plastik Hammadde. (n.d.). Retrieved April 25, 2025, from http://tr.custom-plastic-molds.com/plastic-raw-material/pbt/modified-pbt-engineering-plastic-pbt-gf30.html

Pala, M. F. (2020). *Etkin Bir Modal Analiz İçin Sensör Konumlarının Belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

PBT. (n.d.). Retrieved April 25, 2025, from https://xometry.pro/tr/malzemeler/pbt/

PBT plastik. (n.d.). Retrieved April 25, 2025, from https://www.ensingerplastics.com/tr-tr/yari-mamul/muhendislik-plastikleri/pbt-material

Pirvu, C., Georgescu, C., & Deleanu, L. (2014). *Tensile properties for blends of polybuthylene terephthalate and polyamide with aramid fibers*. https://www.researchgate.net/publication/279757447_Tensile_properties_for_blends_of_polybuthylene_terephthalate_and_polyamide_with_aramid_fibers

Roucoules, C., Hummel, K., Pluy, N., & Sanon, A. (2012). *Impact of plastic mechanical properties on modal prediction of optical module*. https://past.isma-isaac.be/downloads/isma2012/abstract_book_for_web.pdf

Şahin, E. (2009). *Bir Turbo Türbininin Modal Testinde Kütle Yüklemesi Etkisinin İncelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Schwarz, B. J., & Richardson, M. H. (1999). *EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS*.

Şekerci, H. U. (2013). *Bir Hava Aracı Komponentinin Dinamik Karakteristiklerinin Teorik ve Deneysel Modal Analiz Metoduyla Belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi].

Storck, H., Sumali, H., & Pu, Y. (2001). Experimental Modal Analysis of Automotive Exhaust Structures. In *SAE Technical Papers*. SAE International. https://doi.org/10.4271/2001-01-0662

Terzioğlu, O. (2021). *Turboşarj Hortumları için Yüksek Sıcaklık ve Ortam Şartlarına Mukavim FKM Kauçuk Esaslı Kompoit Malzemeler Geliştirilmesi ve Karakterizasyon* [Yüksek lisans tezi]. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Thomson, W. Tyrrell. (1993). *Theory of vibration with applications*.

Türker, İnş. Müh. T. (2005). *Çelik Çerçeve Sistemlerinin DİnamikKarakteristiklerinin Deneysel Modal AnalizYöntemleriyle Belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ucun, İ. (2004). *Mermer Kesme Disklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme ve Titreşim Analizi* [Yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Üniversitesi, D. E., Fakültesi, M., & Bölümü, M. M. (n.d.). *Dokuz Eylül Üniversitesi Ders Notları*. Retrieved April 25, 2025, from https://www.academia.edu/20086206/Mekanik_Titresimler_Ders_Notlari_Zeki_Kiral

Uzatici Sağlam, E., Ediz, B., & Güler, H. (2023). *Determination of the Causes of Flickering of Vehicle Headlamp by Using Structural Analysis*. https://www.tfd39.org/

Veri Toplama Sistemleri. (n.d.). Retrieved April 25, 2025, from https://rmc.com.tr/veri-toplama-sistemleri/

Yıldız, Ö. (2021). *Bir Füzenin Dinamik Karakterizasyonunda Çok EkseknliTahrik Durumu İçin Modal Davranışının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yılmaz, M., & Uysal, M. (2021). Trapez Saçlarının Titreşim Davranışlarının Sonlu Elemanlar ve Deneysel Modal Analizleriyle İncelenmesi. *NWSA Academic Journals*, *16*(2), 7–19. https://doi.org/10.12739/NWSA.2021.16.2.2A0186

Yumurtaci, E. (2023). *Taşıt Motoru Koruma Sacının Doğal Frekanslarının İtyileştirilmesinde Topografya Optimizasyonunun Uygulanması* [Yüksek Lisans Tezi]. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.