

**OTOMOBİL AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE
KULLANILAN BASKILI DEVRE KARTI ÜZERİNDE
ELEKTRONİK BİLEŞENLERİN EN UYGUN ŞEKİLDE
DAĞILIMINI SAĞLAYAN KULLANICI ARAYÜZÜNÜN
OLUŞTURULMASI**

Fahri Berk BİLBAY



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOBİL AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BASKILI
DEVRE KARTI ÜZERİNDE ELEKTRONİK BİLEŞENLERİN EN UYGUN
ŞEKİLDE DAĞILIMINI SAĞLAYAN KULLANICI ARAYÜZÜNÜN
OLUŞTURULMASI**

Fahri Berk BİLBAY
0000-0001-8761-1282

Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

OTOMOBİL AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BASKILI DEVRE KARTI ÜZERİNDE ELEKTRONİK BİLEŞENLERİN EN UYGUN ŞEKİLDE DAĞILIMINI SAĞLAYAN KULLANICI ARAYÜZÜNÜN OLUŞTURULMASI

Fahri Berk BİLBAY

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

Baskılı devre kartları (PCB'ler) kullanıldığı yere göre içerdiği elektronik bileşenler (transistor, kondansatör, direnç, entegre devre vb.) ve bu bileşenlerin devre kartları üzerindeki yerleşimleri değişiklik gösterebilir. Bu durum devre kartlarının belirli test senaryolarından geçmek zorunda olduğunu da göz önünde bulundurarak konsept kart tasarımının yapılmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Titreşim yüklemeleri, baskılı devre kartlarının ve elektronik bileşenlerin hasara uğramasına yol açabilir. Otomotiv aydınlatma sistemleri de dahil olmak üzere endüstride sıkça kullanılan baskılı devre kartların belirli test şartlarından geçmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmanın amacı otomotiv aydınlatma sistemlerinde kullanılan baskılı devre kartları için dinamik test şartlarını dahil ederek kart üzerine yerleştirilecek bileşenleri, deneysel tasarım metodu kullanarak uygun bir şekilde dağılımını gerçekleştiren bir arayüz oluşturmaktır. Çalışmada baskılı devre kartı ve üzerindeki tüm bileşenlerin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve endüstride sıkça kullanılan dinamik test senaryosu kullanılarak fiziksel test ile korelasyonu yapılmıştır. Devre kartı üzerinde yer alan bileşenlerin pozisyonları tasarım parametresi, rastgele titreşim analizi sonrası elde edilen gerilme ve yorulma hasarı ise cevap fonksiyonu olarak belirlenmiş ve deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda baskılı devre kart tasarımcısı, kart üzerindeki elektronik bileşen dağılımını tecrubesi yerine, test şartnamelerine uygun ve sanal/fiziksel olarak doğrulanmış analizlerin sonuçlarına göre en uygun bir şekilde seçebileceği arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüz aynı zamanda tasarımcının PCB tasarımının yorulma hasarı açısından başarılı/başarısız kontrolü yapmasına da olanak tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Baskılı Devre Kartı, PCB, Mekanik Analiz, Sinüs Tarama Analizi, Rastgele Titreşim Analizi, Termal Analiz, Termal-Mekanik Analiz, Deneysel Tasarım, DOE, Yorulma, Hasar, Optislang, Optimizasyon, Otomotiv Aydınlatma

2025, IX + 96 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

CREATING AN USER INTERFACE THAT PROVIDES OPTIMIZED DISTRIBUTION OF ELECTRONIC COMPONENTS ON THE PRINTED CIRCUIT BOARD USED IN AUTOMOBILE LIGHTING SYSTEMS

Fahri Berk BİLBAY

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

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

Printed circuit boards (PCBs) may vary in terms of the electronic components (transistor, capacitor, resistor, integrated circuit, etc.) and their layout on the circuit boards depending on the use. This situation makes it very difficult to define the design concept of the PCBs by considering certain loading conditions. Vibration loadings can cause damage on the PCBs and also on the electronic components. It is very important to take into account of certain dynamic test conditions in automotive lighting industry when designing and validating the PCB's.

The aim of this study is to take into account of the road conditions when designing PCBs used in automotive lighting systems and to create an interface that distribute the components to the appropriate locations by using the design of experimental (DoE) method. In the study, a finite element model of the PCB with all its components was created and correlated with physical testing by using the dynamic test scenario frequently used in the industry. The locations of the components on the PCB were determined as the design parameters, the stresses and fatigue damage obtained after random vibration analysis as the response functions in the DoE method. As a result, an interface has been created where the PCB designer can choose the component locations on the board based on test specifications with the virtually/physically verified analyses, rather than based on user experience. This interface also allows the designer to perform a pass/fail check of the PCB design for fatigue damage.

Keywords: Printed Circuit Board, PCB, Mechanical Analysis, Sine Sweep Analysis, Random Vibration Analysis, Thermal-Mechanical Analysis, Design of Experiment, DoE, Damage, Fatigue, Thermal Map, Sherlock, Optislang, Optimization, Automotive Lighting

2025, IX + 96 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı doktora bitirme çalışmasıdır. Bu çalışmanın amacı otomotiv aydınlatma sistemlerinde kullanılan baskılı devre kartları için dinamik test şartlarını dahil ederek kart üzerine yerleştirilecek bileşenleri, deneysel tasarım metodu kullanarak uygun bir şekilde dağılımını gerçekleştiren bir arayüz oluşturmaktır. Çalışma sonucunda baskılı devre kart tasarımcısı, kart üzerindeki elektronik bileşen dağılımını tecrubesi yerine, test şartnamelerine uygun ve sanal/fiziksel olarak doğrulanmış analizlerin sonuçlarına göre en uygun bir şekilde seçebileceği arayüz geliştirilmiştir

Bu süreç boyunca bana yol gösteren, değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır'a içten teşekkürlerimi sunuyorum. Doktora çalışmam boyunca bilimsel ve akademik gelişimim adına gösterdiği katkılar sadece bu çalışmamla kalmayıp, bana kariyerim için de büyük yararlar sağladı.

Doktora sürecinde bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimiyle yolumu aydınlatan Barış Ediz'e teşekkürlerimi sunarım. Onun derin bilgisi ve tecrubesi bu zorlu yolu daha verimli kıldı.

Doktoram boyunca bana değerli destek ve fırsatlar sunan, bilgi birikimimi geliştirmeme katkı sağlayan Marelli Mako'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Firmamın araştırma sürecimde bana sağladığı kaynaklar, ekipmanlar ve her türlü destek çalışmalarımı başarıyla yürütmeye olanak tanıdı. Ayrıca işbirliği içinde olduğum Ar-Ge bölümü çalışma arkadaşlarıma da ayrıca teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu zorlu doktora yolculuğunda bana her zaman güç veren, yanımda olan ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan canım eşim Rümeysa'ya en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Son olarakta bu süreçte desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Fahri Berk BİLBAY
15/01/2025

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Baskılı Devre Kartı Elemanları	5
2.2. Baskılı Devre Kartı Yapısı	9
2.3. Baskılı Devre Kartı Avantajları ve Kullanım Alanları	11
2.4. Baskılı Devre Kartları Test Koşulları	12
2.5. Baskılı Devre Kartlarında Sonlu Elemanlar.....	13
2.5.1. Baskılı Devre Kartlarında Sherlock Yazılımı	13
2.6. Kaynak Araştırması.....	14
2.6.1. PCB Titreşim Testleri ve Analizleri.....	15
2.6.2. PCB Termal Mekanik Testleri ve Analizleri	18
2.6.3. PCB Deneysel Tasarım ve Optimizasyon Çalışmaları.....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	23
3.1. FR4 Malzeme Özelliklerinin Elde Edilmesi	24
3.2. FR4 Plakasının Malzeme Özelliğinin Doğrulanması.....	29
3.2.1. Deneysel Modal Analiz (DMA).....	29
3.2.2. Darbe Çekiç Test Metodu	32
3.2.3. Hızlı Fourier Dönüşümleri (FFT)	34
3.2.4. Sönümlü Serbest Titreşim Hareketi	35
3.2.5. Deneysel Modal Analiz Uygulama Yöntemleri.....	36
3.2.6. Deneysel Modal Analiz Parametreleri	38
3.2.7. Çekirdek Plakasının Sonlu Elemanlar Modeli	41
3.2.8. Çekirdek Plakasının Çekiç Gezdirme Deneysel Modal Analizi	42
3.3. Devre Kartının Fiziksel Testi ve Sonlu Elemanlar Modeli	46
3.3.1. Termal Mekanik Analiz	46
3.3.2. Devre Kartının Termal Mekanik Testi	49
3.3.3. Devre Kartının Sonlu Elemanlar Modeli	51
3.4. Devre Kartının Deneysel Tasarımı ve Kullanıcı Arayüzü Oluşturma	65
3.4.1. Deneysel Tasarım Bileşenleri	66
3.4.2. Tasarım ve Cevap Değişkenlerinin Seçilmesi	68
3.4.3. Deneysel Tasarım Metodları	69
3.4.4. Deneysel Tasarımda Optislang Yazılımı	71
3.4.5. Deneysel Tasarımda Kullanılan İstatistiksel Araçlar.....	72
3.4.6. Elektronik Komponentlerin En Uygun Dağılımını Yapan Kullanıcı Arayüzü Oluşturulması	73

4. BULGULAR.....	74
4.1. FR4 Malzemesi Çekme Testi Sonucu Elastik Modüllerin Elde Edilmesi ve Sonlu Elemanlar Analizi ile Karşılaştırılması	74
4.2. FR4 Plakasının Malzeme Özelliklerinin Doğrulanması	75
4.3. Devre Kartının Fiziksel Testi ve Sonlu Elemanlar Korelasyonu	79
4.3.1. Devre Kartı Sinüs Tarama Test ve Analiz Sonuçları	79
4.4. Devre Kartının Deneysel Tasarım Sonucu.....	82
4.5. Devre Kartı Tasarım Arayüzü ve Korelasyonu.....	84
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	88
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	96



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

f	Doğal frekans (Hz)
T	Periyot (s)
x	Yer değiştirme (m)
$x(t)$	Kütlenin 't' anındaki yer değiştirme miktarı (m)
$v(t)$	Kütlenin 't' anındaki hızı (m/s)
$a(t)$	Kütlenin 't' anındaki ivmesi (m/s ²)
ω_n	Sönümsüz açısal doğal frekans (rad/s)
k	Yay sertliği veya yay katsayısı (N/m)
m	Cismin kütlesi (kg)
R	Titreşim hareketinin tepe genliği (m)
θ	Faz açısı (rad)
A	Sistemin modal şekilleri ile bağlantılı değişken
N	Sistemi tanımlayan serbestlik derecesi sayısı
t	Zaman (s)
w	Sistemin sönümlü frekansları (Hz)
σ	Sönüm katsayısı
$X(\omega)$	Tepki fonksiyonunun Fourier dönüşümü
$F(\omega)$	Etki fonksiyonunun Fourier dönüşümü
$H(\omega)$	Transfer fonksiyonu

Kısaltmalar

PCB	Baskılı Devre Kartı
LED	Işık Yayan Diyot
DMA	Deneyisel Modal Analiz
FRF	Frekans Cevap Fonksiyonu
MAC	Modal Güvence Kriteri
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümleri
DoE	Deneyisel Tasarım
SE	Sonlu Elemanlar
PSD	Güç Spektral Yoğunluğu
DAQ	Veri Toplama
DOF	Serbestlik Derecesi
CTE	Isıl Genleşme Katsayısı
CCD	Merkezi Bileşik Tasarım
CoP	Prognoz Katsayısı
MDO	Çok Disiplinli Optimizasyon
MoP	Optimal Prognoz Metamodeli
D	Diyot
T	Transistör
IC	Entegre Devre

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa	
Şekil 2.1.	Arka aydınlatma sistemi ve çevre elemanları	4
Şekil 2.2.	Montajlı arka aydınlatma sistemi	4
Şekil 2.3.	Baskılı devre kartında kullanılan komponentler	5
Şekil 2.4.	PCB LED ışıkların aydınlatma görüntüsü	6
Şekil 2.5.	İleri yönlü ve ters yönlü diyot akışları (Anonim, 2014)	6
Şekil 2.6.	Direncin büyüklük ve yük hareketi gösterimi (a) 10Ω (b) 100Ω (Anonim, 2021a)	7
Şekil 2.7.	Entegre devre izometrik (a) ve yukarıdan görüntüsü (b) (Anonim, 2013)	8
Şekil 2.8.	Baskılı devre kartında kullanılan komponentlerin lehim bağlantı uç tipleri (a) Gullwing (b) C-Lead (c) Thruhole (d) Stub	8
Şekil 2.9.	Baskılı devre kartı katmanları (Anonim, 2018a)	9
Şekil 2.10.	Baskılı devre kartı çekirdeğinde yer alan FR4 malzemesi (Anonim, 2018b)	9
Şekil 2.11.	Baskılı devre kartında lehim maskesinin gösterimi	10
Şekil 3.1.	PCB için kullanıcı arayüzü oluşturulmasının akış şeması	24
Şekil 3.2.	Tek yönde çekme testi örneği	25
Şekil 3.3.	Şematik gerilim-gerinim diyagramı	26
Şekil 3.4.	ISO 527-4 çekme testi numunesi	27
Şekil 3.5.	X ve Y yönlerindeki çekme testi numuneleri	27
Şekil 3.6.	Çekme testi makinesi	28
Şekil 3.7.	Deneysel modal analiz sistematığı	30
Şekil 3.8.	Fourier dönüşümü	31
Şekil 3.9.	Modal çekiç sistemi	32
Şekil 3.10.	Sönümlü serbest titreşim sistemi	35
Şekil 3.11.	Sönümlü titreşim modeli (a) 0,1 sönüm oranı (b) 0,3 sönüm oranı	36
Şekil 3.12.	Çekicinin hareketli olduğu tek referanslı çekiç testi	37
Şekil 3.13.	İvme ölçerin hareketli olduğu tek referanslı çekiç testi	37
Şekil 3.14.	Çok referanslı çekiç testi	37
Şekil 3.15.	Örnek frekans cevap fonksiyon eğrisi	38
Şekil 3.16.	Örnek FRF ve tutarlılık eğrileri	39
Şekil 3.17.	MAC matris örneği	40
Şekil 3.18.	Çekirdek plakası sonlu elemanlar modeli	41
Şekil 3.19.	Çekme numunesi sınır şartının gösterimi	42
Şekil 3.20.	Deneysel modal analiz test düzeneği	43
Şekil 3.21.	Darbe çekici ve ölçüleri	44
Şekil 3.22.	PCB pizetronics ivmeölçer	44
Şekil 3.23.	Dewesoft veri toplama cihazı	45
Şekil 3.24.	Termal kamera ölçüm sistemi	48
Şekil 3.25.	Devre kartının termal harita görüntüsü	48
Şekil 3.26.	Sarsıcı test makinesi	49
Şekil 3.27.	Test fikstürü (a) PCB (b) Test plakası (c)	50
Şekil 3.28.	Sinüs tarama test sistemi	51
Şekil 3.29.	Baskılı devre kartının (üst) Sherlock’a (alt) aktarımı	52

Şekil 3.30.	PCB Sherlock SE Modeli	53
Şekil 3.31.	Sonlu elemanlar modeli (a) Test fikstürü (b) PCB (c) Test plakası	56
Şekil 3.32.	PCB Ansys Mechanical sonlu elemanlar modeli	57
Şekil 3.33.	Bağlantı uçları Transistör (a) Diyot (Kesit alınmış) (b) Entegre devre (c)	57
Şekil 3.34.	PCB, test fikstürü ve test plakasının bağlantıları	58
Şekil 3.35.	PCB SE modelinin sıcaklık dağılımı	58
Şekil 3.36.	Sinüs sinyali (a) Sinüs taraması (b)	59
Şekil 3.37.	Sinüs tarama türleri	60
Şekil 3.38.	Sinüs tarama SE analizinde kullanılan ivmeölçer ve eksen takımı	61
Şekil 3.39.	Harmonik (sol) ve rastgele (sağ) titreşim sinyal örnekleri (Anonim,2012)	62
Şekil 3.40.	Deneysel tasarımda PCB yorulma ömrü hesaplamada kullanılan PSD eğrisi	63
Şekil 3.41.	Bakır bağlantı uçlarının çift doğrusal S-N eğrisi	64
Şekil 3.42.	Deneysel tasarım bileşenleri	66
Şekil 3.43.	PCB'nin tasarım alanı	69
Şekil 4.1.	Çekme numunesi sonlu elemanlar analiz (soldaki) ve test (sağdaki) sonucu	75
Şekil 4.2.	FR4 plakasının DMA testinin FRF eğrisi	76
Şekil 4.3.	FR4 plakasının tutarlılık eğrisi	76
Şekil 4.4.	FR4 plakası DMA ve SE modelinin MAC karşılaştırması	77
Şekil 4.5.	Mod 1 şekilleri (a) DMA sonucu (b) Ansys SE sonucu	78
Şekil 4.6.	Mod 3 şekilleri (a) DMA sonucu (b) Ansys SE sonucu	78
Şekil 4.7.	Mod 6 şekilleri (a) DMA sonucu (b) Ansys SE sonucu	78
Şekil 4.8.	Mod 7 şekilleri (a) DMA sonucu (b) Ansys SE sonucu	78
Şekil 4.9.	Sinüs tarama fiziksel test ve sonlu elemanlar genlik ile frekans karşılaştırılması	79
Şekil 4.10.	Sinüs tarama fiziksel test ve sonlu elemanlar geçirkenlik ile frekans karşılaştırılması	80
Şekil 4.11.	Baskılı devre kartının doğal frekans modları ilk mod (a) ikinci mod (b) üçüncü mod (c)	80
Şekil 4.12.	PCB eleman boyutundan bağımsızlığı	81
Şekil 4.13	PCB deliklerin mevcut olduğu (üstteki) ve olmadığı (alttaki) versiyonları	82
Şekil 4.14.	Cevaplar ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiler-1	83
Şekil 4.15.	Cevaplar ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiler-2	83
Şekil 4.16.	Cevaplar ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiler-3	84
Şekil 4.17.	Arayüzdeki PCB baz tasarım örneği	85
Şekil 4.18.	Arayüzdeki optimum PCB tasarım örneği	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. FR4 malzemesinin özellikleri	55
Çizelge 3.2. Elektronik komponentlerin malzeme özellikleri	55
Çizelge 3.3. Bakır katmanların ve bağlantı uçlarının malzeme özellikleri	56
Çizelge 3.4. SE modelinde kullanılan elemanların özellikleri	57
Çizelge 3.5. Ansys Mechanical’da kullanılan çift doğrusal S-N parametreleri	64
Çizelge 4.1. FR4 malzemesinin X yönündeki elastik modülü	74
Çizelge 4.2. FR4 malzemesinin Y yönündeki elastik modülü	74
Çizelge 4.3. FR4 plakasının DMA testi ve SE doğal frekanslarının karşılaştırması	76
Çizelge 4.4. FR4 DMA ve SE modal güvence kriteri (MAC) karşılaştırması	77
Çizelge 4.5. Baskılı devre kartı modlarının frekans ve geçirgenlikleri	81
Çizelge 4.6. Tahmin edilmiş ve SE ile çözdürülmüş maksimum gerilme karşılaştırması	87

1. GİRİŞ

Baskılı devre kartları (PCB) sahip olduğu anizotropik malzeme yapısı, içerdği çeşitli elektronik bileşenleri (transistör, rezistör, diyot, entegre devre vb.), ağır test koşulları ve kart üzerindeki elektronik bileşenlerin hasar oluşumuna karşı hassasiyeti nedeniyle PCB tasarımının bu etmenler hesaba katılarak yapılması oldukça önemlidir.

Otomotiv endüstrisinde çokça kullanılan PCB'ler, çalışmaları sırasında çeşitli dinamik yüklere ve titreşim frekanslarına maruz kalabilmektedir. Elektronik kartlarda titreşim yüklemeleri nakliye, taşıma, üretim ve son kullanım sırasında oluşabilir. Bu nedenle, elektronik paketlemede titreşim kaynaklı devre kartının yapısal güvenilirliği değerlendirmesi, endüstride önemli bir konu haline gelmiştir. Ayrıca otomotiv aydınlatma sektöründe kullanılan PCB'lerin, üzerinde yer alan LED komponentleri çalıştırması sırasında oluşan sıcaklık ile ortamdan gelen titreşim birleşik olarak etki etmektedir. Bu sebeple baskılı devre kartlarının sanal analiz veya fiziksel test hesaplamaları yapılırken her iki durumun göz önüne alınması oldukça önemlidir.

PCB'ler iki iletken bakır katman arasında yer alan yalıtkan kompozit tabakadan oluşan sandviç bir yapıdadır. PCB üzerinde yer alan onlarca komponentlerin tipleri, malzeme özellikleri, lehim uçlarının tipleri, sandviç yapısının kalınlığı gibi değişkenler devre kartının sonlu elemanlar modelini oluşturmasını ve doğrulanmasını oldukça zorlu hale getirmektedir.

Eğer PCB tasarım aşamasında test koşullarındaki yüklere dayanamayacak bir şekilde tasarlanırsa, çekirdek katmanda veya devre kartı ile komponentleri birbirine bağlayan lehim uçlarında hasarlar oluşabilir ve kart çalışmaz veya kusurlu hale gelebilmektedir. Bu durum PCB'nin test aşamasında ortaya çıkacağı için oldukça fazla zamandan ve maliyetten kayıplar olacaktır.

Bu çalışmanın amacı otomotiv aydınlatma sistemlerinde kullanılan PCB'ler için dinamik test şartlarını dahil ederek kart üzerine yerleştirilecek bileşenleri, deneysel tasarım metodu kullanarak uygun bir şekilde dağılımını gerçekleştiren bir arayüz oluşturmaktır.

Çalışmada PCB ve üzerindeki tüm bileşenlerin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve endüstride sıkça kullanılan dinamik test senaryosu kullanılarak fiziksel test ile korelasyonu yapılmıştır. PCB üzerinde yer alan bileşenlerin pozisyonları tasarım parametresi, rastgele titreşim analizi sonrası elde edilen gerilme ve yorulma hasarı ise cevap fonksiyonu olarak belirlenmiş ve deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda PCB tasarımcısı, kart üzerindeki elektronik bileşen dağılımını tecrubesi yerine, test şartnamelerine uygun ve sanal/fiziksel olarak doğrulanmış analizlerin sonuçlarına göre en uygun bir şekilde seçebileceği arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüz aynı zamanda tasarımcının PCB tasarımının yorulma hasarı açısından başarılı/başarısız kontrolü yapmasına da olanak tanımaktadır.

İlk aşamada modal ve termal mekanik sonlu elemanlar analizleri yapabilmek için PCB'nin çekirdek katmanında yer alan FR-4 malzeme özellikleri, tek eksenli çekme testi sonrasında elde edilmiştir.

İkinci aşamada FR-4 malzeme özelliğini doğrulamak amacıyla 4 mm kalınlığında 160 mm x 400 mm boyutlarında PCB plakasına deneysel modal analiz (DMA) yapılmıştır. DMA sonrasında elde edilen frekans cevap fonksiyonu (FRF) ve modal güvence kriteri (MAC) sonuçları sonlu elemanlar modeliyle karşılaştırılıp FR-4 malzeme karakterizasyonu yapılmıştır.

Üçüncü aşamada PCB üzerinde yer alan LED komponentleri çalıştırması sırasında oluşan sıcaklık dağılımını sonlu elemanlar modeline dahil etmek amacıyla termal kamera ile görüntü alınmış ve sonlu elemanlar modeline entegre edilmiştir. Sonraki adımda PCB'ye sonlu elemanlar modelindeki aynı sınır şartlarında sinüs tarama testi yapılmış ve sonlu elemanlar modeli ile bu test doğrulanmıştır. PCB, dinamik özelliği açısından fiziksel test ve sonlu elemanlar sonucuyla karşılaştırılmıştır ve doğrulanmıştır.

Dördüncü aşamada deneysel tasarım modeli oluşturmak için tasarım değişkenleri ve fonksiyon cevapları belirlenmiştir. Deneysel tasarım modelinde maksimum deney sayısı ve metamodel algoritması seçilmiştir. Seçilen algoritmaya göre deneyler oluşturulmuş ve deneylerin çözümü doğrulanmış sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılmıştır.

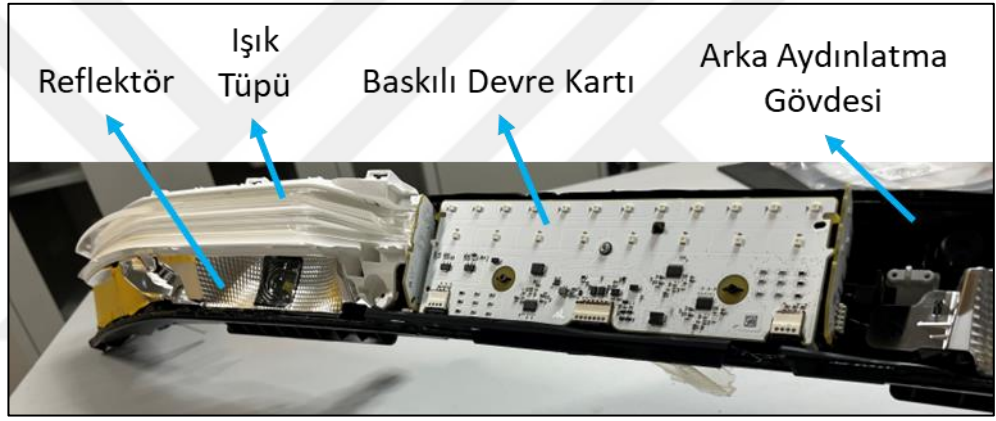
Beşinci aşamada regresyon işlemi yapılmış ve deneylerden elde edilen her bir cevap fonksiyonları için tasarım parametrelerine bağlı denklemler ve cevap yüzeyleri elde edilmiştir. Elde edilen denklemlerin son kullanıcı tarafından kullanılabilmesi için bir arayüz oluşturulmuştur.



2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Baskılı devre kartı ya da diğer bilinen adıyla PCB, elektronik komponentleri bir arada tutan ve elektriksel olarak birbirine bağlanmasını sağlayan mekanik bir parça işlevi görmektedir. PCB'lerde birçok katman bulunur ve bu katmanların yapı malzemeleri de birbirinden farklıdır. Günümüzde bilgisayarlarda, akıllı telefonlarda, otomobillerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Çalışmada otomobil arka aydınlatma sisteminde kullanılan PCB, çevre elemanları ile birlikte Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Arka aydınlatma sistemi ve çevre elemanları

Arka aydınlatma sistemi, montajlı ve LED ışıklar aydınlatılmış olarak ise Şekil 2.2'de görülmektedir



Şekil 2.2. Montajlı arka aydınlatma sistemi

2.1. Baskılı Devre Kartı Elemanları

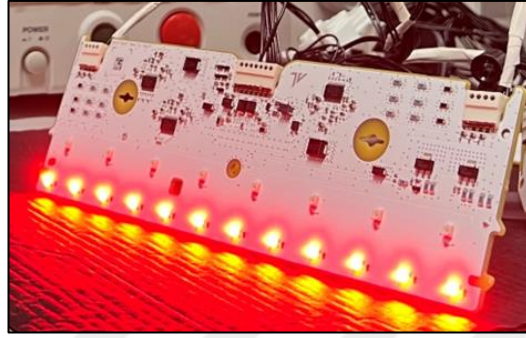
Elektronik paketleme, elektronik ürünler oluşturmak için entegre devreleri ve devre kartı üzerinde yer alan diğer bileşenleri sistem düzeyinde birbirine bağlayan köprüdür. Elektronik komponentlerin sayısı ve tipleri PCB'nin kullanıldığı yere göre değişmektedir. PCB'lerde kullanılan başlıca komponentler Şekil 2.3'te görüldüğü gibi LED, diyot, rezistör, transistör, kapasitör ve entegre devrelerdir.

KOMPONENT ADI	DETAY
LED	
DIYOT	
REZISTOR	
TRANSISTOR	
KAPASITOR	
ENTEGRE DEVRE	

Şekil 2.3. Baskılı devre kartında kullanılan komponentler

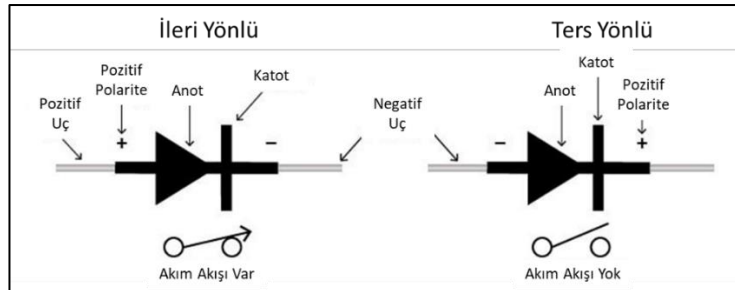
LED, ışık yayan diyotun (light-emitting diode) kısaltması anlamına gelir. LED, PCB'ye lehimlenmiştir ve elektriksel olarak bağlı olduğu kapasitörden akım çekerek ışığı oluşturur. Işığın oluşması ayrıca bir miktarda ısıyı da oluşturur ve ısıyı yüksek

verimlilikle aktarabilen ve dağıtabilen ince bir termal iletken dielektrik malzeme tabakası içerir. Birçok kullanım alanı olan LED komponentlerin otomobillerde ön ve arka aydınlatma sistemlerinde kullanılmaktadır. Şekil 2.4'te otomobil arka aydınlatma sisteminde kullanılan bir devre kartı LED bileşenlerinin aydınlatılmış hali görülmektedir.



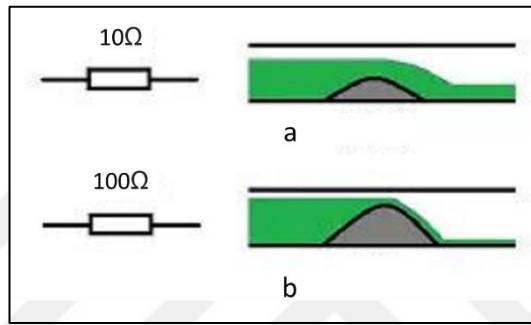
Şekil 2.4. PCB LED ışıkların aydınlatma görüntüsü

Diyotlar akım çekmeleri açısından LED'lere çok benzerler. PCB'deki akımların akış yönünü kontrol etmek için kullanılan küçük bir yarı iletken elektronik bileşendir. LED'lerin aksine, basit diyotlar hiçbir şeyi aydınlatmaz. Bunun yerine, akımı alıp zincirdeki diğer bileşenlere iletirler. Ancak bu iletim yalnızca bir yönde olur, diğer yönlerde akımı bloke eder. Diyotlar, bir anot (pozitif kurşun) ve katot (negatif kurşun) tarafından belirlenen polariteye sahiptir. Çoğu diyot, yalnızca anoda pozitif voltaj uygulandığında akımın akmasına izin verir. Bir diyot akım akışına izin verdiğinde, ileri yönlüdür, ters kutuplandığında, bir yalıtkan görevi görür ve Şekil 2.5'te görüldüğü gibi akımın akmasına izin vermez.



Şekil 2.5. İleri yönlü ve ters yönlü diyot akışları (Anonim, 2014)

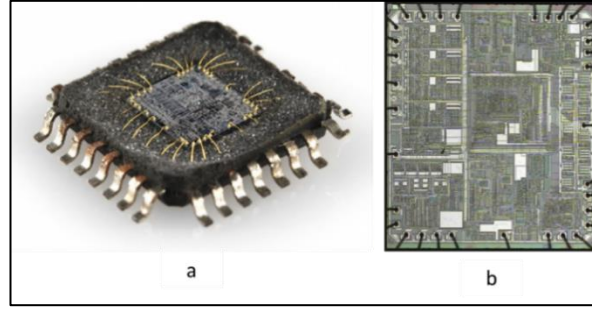
Akım ve voltaj gibi, direnç de bir devrenin temel parametresidir. Dirençler devrelerde en çok kullanılan bileşenlerdir. Adından da anlaşılacağı gibi, bir direnç, elektrik akımının akışını kısıtlayan ve gerilimi azaltan bir bileşendir. Bir iletkene voltaj uygulandığında, yük iletken boyunca belirli bir yönde akar ve yükün akışı sırasında yük çarpışması meydana gelir, bu durum enerji kaybına neden olur ve içinden geçen akım miktarını sınırlar. Harekete karşı çıkan mekanik sürtünme gibi, dirençler de elektrik yükünün hareketine karşı çıkar. Dirençli bileşenler, akımı engelleyen enerji tüketen bileşenlerdir. Bir direncin temel fiziksel özelliği, elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürmektir.



Şekil 2.6. Direncin büyüklük ve yük hareketi gösterimi (a) 10Ω (b) 100Ω (Anonim, 2021a)

Şekil 2.6'daki benzetmede görüldüğü gibi bir direncin büyüklüğünün artmasıyla birlikte yükün hareketi azalır. Bir iletkenin direnci genellikle sıcaklık, malzeme, uzunluk ve kesit alanı ile ilgilidir. Örneğin aynı koşullar altında iletken ne kadar uzunsa direnç o kadar büyük olur; kesit alanı ne kadar büyük olursa, direnç o kadar küçük olur.

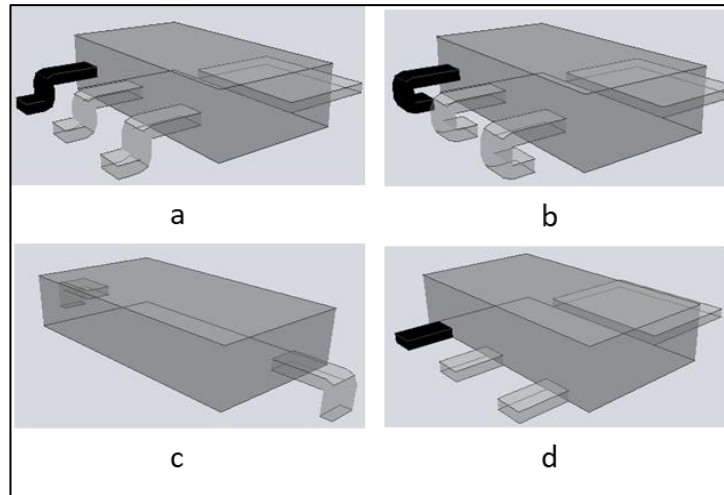
Devrelerde akımı ve şarjı engellemek için kullanılan dirençlerin aksine, bir devrede akımı yükseltmek için transistörler kullanılır. Transistör, akım veya voltaj akışını düzenleyen veya kontrol eden, ayrıca bu elektrik sinyallerini yükselten ve üreten, bir anahtar görevi gören minyatür bir yarı iletkendir. Anahtar olarak, elektrik devresi veya elektronik cihaz üzerinden sinyallerin akışını kontrol etmek için açık veya kapalı olmak üzere iki farklı durumdan birinde olabilir.



Şekil 2.7. Entegre devre izometrik (a) ve yukarıdan görüntüsü (b) (Anonim, 2013)

Entegre devreler çoğu devrenin kalbi ve beynidirler. Bunlar, hemen hemen her devre kartında bulunan küçük siyah çiplerdir. Bir entegre devrede tümü küçük bir çipe doldurulmuş ve ortak bir amaca ulaşmak için birbirine bağlanmış Şekil 2.7’de görüldüğü gibi elektronik bileşenlerden (dirençler, transistörler, kapasitörler vb.) oluşur.

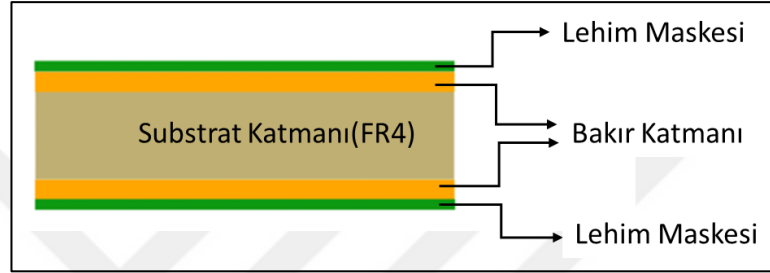
Diyot, transistör ve entegre devre gibi elektronik komponentler ile PCB arasındaki bağlantıyı sağlamak için çeşitli tiplerde lehim uçları kullanılmaktadır. Genellikle mekanik ve termal test koşullarında en yüksek gerilmeler lehim uçlarının kesişim bölgelerinde görülmektedir. Endüstride kullanılan bazı lehim bağlantı uçları Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8. Baskılı devre kartında kullanılan komponentlerin lehim bağlantı uç tipleri (a) Gullwing (b) C-Lead (c) Thruhole (d) Stub

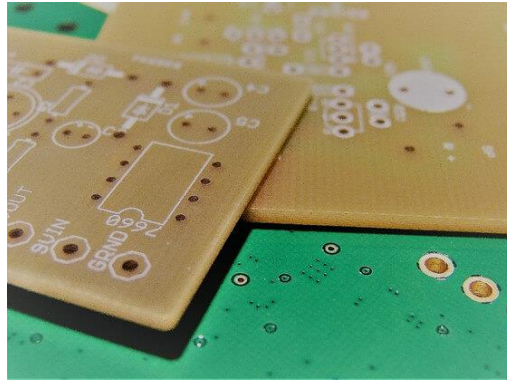
2.2. Baskılı Devre Kartı Yapısı

PCB katmanları, yüzeyine kazınmış iletken yollara sahip bakır katmanlar arasında yalıtkan özellik gösteren FR-4 malzemesinin sandviç bir şekilde paketlenmesiyle oluşur. Ayrıca bakır katmanın dış etmenlerden korunması amacıyla lehim maskesi ile kaplanır. Bir devre kartının iletken ve yalıtkan katmanlardan oluşan sandviç şeklindeki yapısı Şekil 2.9’da görülmektedir.



Şekil 2.9. Baskılı devre kartı katmanları (Anonim, 2018a)

Substrat katmanı: Bu, PCB'nin üzerine inşa edildiği temel malzemedir. Tipik olarak %60-%65 fiberglas takviyeli %30-%40 epoksi reçine esaslı bir yapıdan oluşur ve karta mekanik destek sağlamak için kullanılır. FR-4 gibi içerisinde fiberglas yer alan sağlam bir çekirdek malzeme kullanmak, PCB'lere sertliklerini verir ve kazara kopma gibi hasarları önlemeye yardımcı olur. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve esneyebilen bir özelliğe sahip olduğu için çarpılma miktarını da azaltır. Şekil 2.10’da bakır katmandan ve lehim maskesinden arındırılmış bir FR-4 malzemesi görülmektedir.

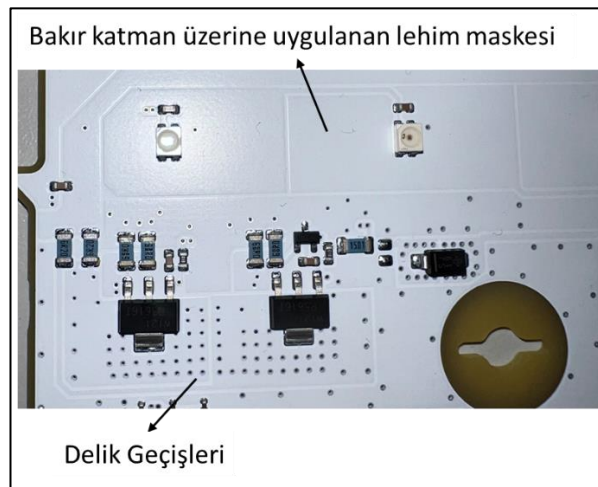


Şekil 2.10. Baskılı devre kartı çekirdeğinde yer alan FR4 malzemesi (Anonim, 2018b)

FR-4, otomotiv elektroniğinde yüksek dayanım, güvenilirlik, sıcaklık toleransı, elektriksel izolasyon ve uygun maliyet gibi avantajları nedeniyle en çok tercih edilen PCB malzemesidir.

Bakır katmanı: Substrat tabakaya bir yapıştırıcı ile yapıştırılan ve daha sonra ısıyla sabitlenen bir bakır folyo tabakasıdır. Bakır katman, sinyal iletimi ve ısı dağılımı için gerekli olağanüstü elektriksel ve termal özelliklere sahip olduğundan, PCB tasarımının ayrılmaz bir parçasıdır. Çekirdek kısmının alt ve üst taraflarında yer alan bu bakır katmanlar, küçük çaplı delik geçişlerini kullanarak üst ve alt katmanlar arasında elektriksel bağlantı kurmasına olanak sağlar.

Lehim maskesi: Bu, iletken tabaka üzerine uygulanan bir polimer tabakasıdır. Lehim maskesi tabakası, iletken tabakayı hasardan korumak ve lehimin montaj sırasında istenmeyen bölgelere akmasını önlemek için kullanılır. Bu katman, PCB'ye yeşil veya beyaz rengini verir. Bakır izlerinin diğer metal, lehim veya iletken uçlarla yanlışlıkla temas etmesini önlemek için bakır katmanın üzerine kaplanmıştır. Lehim maskesi ayrıca, kartın hangi bölgelerine lehimlenebileceğini göstererek ve lehimlenemeyen alanları yeşil veya başka bir renk maskesiyle sınırlandırarak kullanıcıya rehberlik etmeye yardımcı olmak için de kullanılır. Şekil 2.11'de komponentler haricinde tüm bakır katmanının üstüne lehim maskesinin uygulandığı görülmektedir.



Şekil 2.11. Baskılı devre kartında lehim maskesinin gösterimi

2.3. Baskılı Devre Kartı Avantajları ve Kullanım Alanları

PCB'ler modern elektronik ekipmanların hayati bir parçasıdır. PCB gerekli olan çok sayıda pasif ve aktif bileşenden oluşur. Bileşenler kart üzerindeki izlerle birbirine bağlanır. Küçük boyutlara sahip komponentlerin birbirine bağlanmasıyla PCB üzerinde gelişmiş devreler oluşturulmaktadır. PCB'lerin başlıca avantajları:

- **Boyut:** PCB'ler, geleneksel kablolama yöntemlerine kıyasla kompakt tasarımlara ve daha küçük devrelere izin verir.
- **Maliyet:** PCB'ler, otomatik makineler kullanılarak toplu olarak üretilebildikleri için geleneksel kablolama yöntemlerinden daha uygun maliyetlidir. Bu, birim başına maliyetin daha düşük ve üretim sürecinin daha hızlı ve daha verimli olduğu anlamına gelir.
- **Tekrar üretilebilirlik:** PCB'ler yüksek oranda tekrar üretilebilir, yani her birim bir öncekiyle aynı özelliklere göre yapılabilir. Bu, onları seri üretim için ideal hale getirir ve her birimin aynı şekilde çalışmasını sağlar.
- **Test etme:** PCB'ler kolayca test edilebilir ve hata ayıklanabilir. Elektronik bileşenler kart üzerine yerleştirilebilir ve devrenin son montajından önce düzgün çalıştıklarından emin olmak için test edilebilir. Bu, devre tamamlanmadan önce devredeki sorunları tanımlamayı ve düzeltmeyi kolaylaştırır.
- **Esneklik:** PCB'ler oldukça esnektir ve çok çeşitli uygulamalara uyacak şekilde tasarlanabilir. Belirli bir form faktörüne uyacak şekilde üretilebilirler ve ayrıca bir dizi farklı elektronik bileşen ve işlevi barındırabilirler.

PCB'ler, basit cihazlardan karmaşık sistemlere kadar çok çeşitli elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. PCB'lerin kullanım alanlarına bazı örnekler aşağıdaki gibidir:

- **Tüketici Elektroniği:** PCB'ler, akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar, oyun konsolları ve televizyonlar gibi çeşitli tüketici elektroniği ürünlerinde kullanılmaktadır.

- **Otomotiv Endüstrisi:** PCB'ler otomotiv endüstrisinde aydınlatma sistemleri, motor kontrol üniteleri, kilitlenme önleyici fren sistemleri ve bilgi-eğlence sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır.
- **Havacılık ve Savunma:** PCB'ler, havacılık ve savunma endüstrilerinde rehberlik ve kontrol sistemleri, iletişim sistemleri ve uçuş kontrol sistemleri için kullanılmaktadır.
- **Tıbbi Cihazlar:** PCB'ler, kalp pilleri, EKG makineleri ve ultrason makineleri gibi tıbbi cihazlarda kullanılır.
- **Enerji Endüstrisi:** PCB'ler enerji endüstrisinde güç yönetim sistemleri, güneş paneli kontrol sistemleri ve rüzgar türbini kontrol sistemleri için kullanılmaktadır.
- **Endüstriyel Kontrol Sistemleri:** PCB'ler, otomasyon ekipmanları, makine kontrol sistemleri ve robotik gibi endüstriyel kontrol sistemlerinde kullanılır.
- **İletişim Sistemleri:** PCB'ler, kablosuz baz istasyonları, yönlendiriciler ve anahtarlar gibi iletişim sistemlerinde kullanılır.

Özetle, PCB'ler basit tüketici ürünlerinden karmaşık endüstriyel ve havacılık uygulamalarına kadar çok çeşitli elektronik cihazlarda kullanılmaktadır.

2.4. Baskılı Devre Kartları Test Koşulları

PCB'ler çoğu elektronik cihazda çok önemli bileşenlerdir ve bunların düzgün çalışmasını ve güvenilirliğini sağlamak önemlidir. PCB testi, işlevselliğini ve güvenilirliğini sağlamak için kartın çeşitli test koşullarına tabi tutulmasını içerir. Spesifik test koşulları, PCB'nin kullanım amacına ve uygulamanın gerekliliklerine bağlıdır. PCB'ler için bazı yaygın test koşulları şunlardır:

- **İşlev Testi:** PCB'nin beklediği gibi çalıştığını ve amaçlanan işlevleri yerine getirdiğini doğrulamayı içerir.
- **Çevresel Test:** Çeşitli çalışma koşullarında güvenilirliğini sağlamak için PCB'nin sıcaklık, nem, titreşim ve şok gibi çeşitli çevresel koşullara tabi tutulmasını içerir.
- **Güç Verme Testi:** PCB'nin doğru şekilde açıldığını ve beklediği gibi çalıştığını doğrulamayı içerir.

- **Elektrik Testi:** PCB üzerindeki elektrik bağlantılarının amaçlandığı gibi çalıştığını doğrulamayı içerir.

Genel olarak, PCB'ler için test koşulları, gerekli spesifikasyonları karşıladıklarından ve çeşitli çalışma koşullarında güvenilir olduklarından emin olmak için tasarlanmıştır.

2.5. Baskılı Devre Kartlarında Sonlu Elemanlar

Sonlu eleman analizi, PCB'leri tasarlamak ve analiz etmek için önemli bir araçtır. PCB'ler, çoğu elektronik cihazın temel bir bileşenidir ve cihaz içindeki farklı elektronik bileşenleri bağlamak ve kontrol etmek için kullanılır. Sonlu elemanların PCB'lerin tasarım sürecinde kullanılması, performanslarını optimize etmeye ve güvenilirliklerini artırmaya oldukça yardımcı olur. PCB'lerin tasarımında sonlu eleman analizinin kullanıldığı durumlar aşağıdaki gibidir:

Mekanik Analiz: Eğilme, burulma ve titreşim gibi mekanik gerilimle ilgili olası sorunları belirlemeye, kartın dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırmak için tasarımını optimize etmeye yardımcı olabilir. PCB'nin doğal frekanslarının elde edildiği modal analiz, çalışır haldeki yoldan toplanan verilere denk olarak rastgele titreşim analizi ve sinüs tarama analizi, çalışma durumundaki sıcaklığın ve mekanik etmenlerin dahil edildiği termal mekanik analiz gibi analiz çeşitleri kullanılarak PCB'nin doğrulanması gerçekleştirilebilir.

Termal Analiz: Komponentlerin çalışma veya çevre sıcaklığının sıcaklık değişimleri durumlarındaki ısı dağılımını iyileştirmek, aşırı ısınma ve bileşen arızası riskini azaltmak için tasarımını optimize etmeye yardımcı olur.

2.5.1. Baskılı Devre Kartlarında Sherlock Yazılımı

Sherlock, elektronik devre kartları özelinde statik veya dinamik çeşitli tiplerde sonlu elemanlar analizlerin yapıldığı bir yazılımdır. Ayrıca elektronik devre kartları ve üzerinde yer alan elemanların güvenilirlik ve dayanım analizleri yapılmaktadır. Bu modül, otomotiv,

havacılık ve diğer birçok alanda elektronik devre kartlarının yapısal veya akış analizlerini yapmak için kullanılmaktadır.

PCB içerisinde transistör, direnç, kapasitör, aydınlatma elemanları, diyot, entegre devreler gibi birçok çeşitli bileşeni kapsamaktadır. Bu bileşenlerin çok fazla olması, her bir bileşenin malzemelerinin ve pozisyonlarının farklı olması klasik sonlu elemanlar yazılımları ile modellenmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu durum, devre kartındaki bileşenlerin tipleri, pozisyonları, malzemelerin yer aldığı kart tasarımının Sherlock modülüne aktarılmasıyla birlikte oldukça kolaylaşmakta ve zamandan tasarruf sağlamaktadır.

PCB tasarımının içeri aktarılmasıyla bu tasarımda yer alan tüm bileşenlerin malzemeleri lokal veya Sherlock'un kütüphanesi ile eşlenebilmektedir. Devre kartının çalışma koşullarındaki yükleme şartları tanımlanıp yaşam döngüsü oluşturulabilmektedir. Otomobil aydınlatmada sıkça kullanılan termal harita işleme ve aktarma özelliğiyle birlikte LED'lerin çalışma koşulunda devre kartında oluşturacağı ön gerilmeleri de modele dahil etme imkanı vardır. Ayrıca devre kartının katmanlarının, üzerinde yer alan komponentlerin ve bağlantı uçlarının detaylı bir şekilde eleman yapısının otomatik olarak oluşturulması da modelin sonucunun kesinliğini arttırmakta ve zamandan tasarruf sağlamaktadır.

2.6. Kaynak Araştırması

PCB'ler sahip olduğu anizotropik malzeme yapısı, içerdiği çeşitli elektronik bileşenleri (transistör, rezistör, diyot, entegre devre vb.), ağır test koşulları ve kart üzerindeki elektronik bileşenlerin titreşimlere karşı hasar oluşumuna hassasiyeti nedeniyle bu etmenler hesaba katılarak yapılması oldukça önemlidir. Son yıllarda titreşim ve termal etmenlerin baskılı devre kartlarına olan etkileri ve devre kartı tasarımının optimizasyonu ile ilgili yapılmış çok sayıda çalışma vardır.

2.6.1. PCB Titreşim Testleri ve Analizleri

Gu ve ark. (2007) PCB elektronik bileşenlerin titreşim yorulma ömür yüklerini toplamak, kaydetmek ve analiz etmek için metodoloji geliştirmiştir. PCB titreşim yüklerini, parça üzerinde belirlenen noktalardan strengeler vasıtasıyla ölçmüştür. Ölçülen yükleri parça üzerindeki gerinimi hesaplamak için sonlu elemanlar analizi ile kalibre etmiş, parçanın hasar hesaplamasında kullanılabilen bir analitik model geliştirmiştir. Hasar hesaplamasında Miner's kuralını kullanmış ve analitik model ile hesapladığı yorulma ömür sonuçlarının testler ile uyumlu olduğunu belirtmiştir.

Burmitskih ve ark. (2013) üzerinde elektronik bileşenlerin de olduğu detaylı PCB modeli ile basitleştirilmiş PCB modelinin modal analizini yapıp ilk iki doğal frekansı karşılaştırmıştır. Basitleştirilmiş modelinde transistör, direnç, kondansatör gibi elektronik komponentleri modelden silip yerine bunların kütlelerini PCB'ye eklemiştir. Sonuç olarak detaylı ve basitleştirilmiş modelin ilk iki doğal frekansı arasında %3,5 fark görmüştür.

Ren ve ark. (2014) PCB doğal frekanslarını ve titreşim modlarını elde etmek için sonlu elemanlar modelinde serbest sınır şartları kullanarak modal analiz yapmıştır. Analiz sonucunu doğrulamak için devre kartının deneysel modal testini de yapmış ve doğal frekansları karşılaştırmıştır. Ayrıca farklı kalınlıktaki devre kartlarının da karşılaştırmasını yapmış ve analiz ile test modelleri arasında hata oranının %10'u geçmediğini belirtmiştir.

Che ve ark. (2015) PCB'nin sonlu elemanlar modelini oluşturmuş ve 20 ile 2000 Hz frekans aralığında rastgele titreşim senaryosunu koşturmuştur. Özellikle entegre devre ile PCB'yi bağlayan uçların detaylı modellemesini yaptığını belirtmiştir. Aynı senaryoyu fiziksel test olarak gerçekleştirmiş ve sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırmıştır. Sonuç olarak yorulma analizi incelendiğinde entegre devre ile PCB arasındaki lehim bağlantı uçlarının kritik bölge olduğunu ve hasarın öncelikle bu bölgede oluştuğunu görmüştür. Fiziksel testte de çatlakların bu uçlardan başladığını belirtmiş.

Jayaraman ve ark. (2016) havacılık endüstrisinde kullanılan baskı devre kartları için modal ve şok cevap spektrum analizleri yapmıştır. Sonlu elemanlar modelinde baskı kartının üzerinde bileşenler bulunan ve bulunmayan olarak iki çeşit model oluşturmuştur. Çıplak ve üzerinde komponentler bulunan baskı kartlarının şok ve modal analiz sonuçlarını, fiziksel testler ile kıyaslamış ve aralarında en fazla %3 fark elde etmiştir.

Somashekar ve ark. (2016) PCB'lerin dinamik özelliklerini araştırmak ve birçok test denemelerinden kaçınmak için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak PCB'lerin doğal frekanslarını ve frekans cevap fonksiyonlarını (FRF) elde etmiş ve fiziksel testler ile bunları doğrulamıştır.

Zhang ve ark. (2016) PCB'nin dinamik özelliklerini doğrulamak amacıyla çalışma yapmıştır. Devre kartının sanal ortamda modal analizini yapmış ve ilk dört modun şeklini ve değerlerini elde etmiştir. Sanal ortamda elde ettiği sonuçları doğrulamak amacıyla devre kartına çekiç ile darbe deneyi yapmış ve ilk dört mod frekansını ve şekillerini fiziksel ortamda yaptığı test ile elde etmiştir. Sonuç olarak sanal/fiziksel testleri karşılaştırmış ve hata oranlarının %10'u geçmediğini belirtmiştir.

Huang ve Ying (2017) PCB'lerde termal çarpılmayı incelemek için strengeler kullanarak oda sıcaklığında, yüksek sıcaklıkta ve yükleme durumunda inceleme yapmıştır. Çalışmanın oda sıcaklığında olan ilk fazında teorik ve deneysel sonuçlar iyi bir şekilde korele olduğunu, ikinci adımda yüksek gerinim değerlerinden dolayı strengelerin hassasiyetinden kaynaklı bir miktar sapmaların olduğunu, titreşim yüklemesini yaptığı üçüncü adımda ise teorik ve strengeler ile ölçüm metodu kullanılarak elde edilen deneysel sonuçların eşleştiğini belirtmiştir.

Garcia ve ark. (2018) uzay araçlarında kullanılan PCB'lerin kalkış sırasında maruz kaldığı titreşim yüklerini simüle etmek için sonlu eleman modeli kullanmıştır. PCB ile üzerindeki komponentleri bağlayan lehim uçlarının yorulma ömürlerini incelemek için rastgele titreşim analiz senaryosunu koşturmuş ve Steinberg'in yorulma hasar eşitliğini ve Miner'ın kümülatif yorulma endeksini kullanmıştır. Sonuç olarak fiziksel yorulma testinde hasarın sonlu elemanlar analiz sonucunda da tahmin ettiği gibi lehim bağlantı

uçlarında meydana geldiği ve sanal/fiziksel sonuçlar arasında korelasyonun iyi olduğunu belirtmiştir.

Gharaibeh (2018) PCB ve üzerindeki komponentler için anizotropik malzeme özelliklerinin etkisini araştırmak amacıyla hem serbest hemde sabit sınır şartlarını dahil ederek sonlu elemanlar analiz modeli oluşturmuş ve bunu fiziksel testler ile korele etmiştir. Sanal analiz ile PCB'nin modal frekanslarını ve şekillerini çıkarmış, çekiç testi ile fiziksel olarak korelasyonunu yapmıştır. Sonuç olarak sanal ve fiziksel testleri karşılaştırmış ve aralarındaki korelasyon farkının en fazla %10 olduğunu belirtmiştir.

Arabi ve ark. (2018) PCB'de kullanılan malzeme tipinin farkını anlamak amacıyla sonlu elemanlar modeli oluşturmuş ve modal titreşim analizi yapmıştır. PCB'de anizotropik malzeme modeli kullanmak amacıyla çekme testleri yapmış ve iki farklı elastik modül bulmuştur. Sonlu elemanlar modelini fiziksel test ile doğrulamıştır. Sonuç olarak izotropik ve anizotropik malzemele tipleri kullanılarak yapılan modal titreşim analiz sonuçlarının benzer olmadığını belirtmiştir.

Samavatian ve ark. (2018) farklı açılardaki rastgele titreşim yüklerinin PCB'ler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla çalışma yapmıştır. PCB ve üzerinde komponentleriyle birlikte oluşturduğu sonlu elemanlar modelinde 0° , 30° , 45° , 60° ve 90° açılar ile rastgele titreşim yükleri uygulamıştır. Sonuç olarak PCB'ye dik yönde uygulanan yüklemde en yüksek gerilmelerin görüldüğünü belirtmiştir.

Verma ve ark. (2020) PCB için modal ve rastgele titreşim analizleri yapmıştır. Birçok rastgele titreşim senaryosu verileri kullanmış ve PCB'nin yorulma ömrünü tahmin etmiştir. Rastgele titreşim analizlerinde gerilmelerin en çok bileşenlerin PCB'ye bağlayan lehim ucu bölgelerinde oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca modal analiz ve test sonuçları arasında düşük bir hata oranının olduğunu belirtmiştir.

Kalyani ve ark. (2020) baskılı devre kartlarının malzeme karakteristiğini incelemek için izotropik ve anizotropik iki adet malzemeye sahip devre kartlarının modal analizini yapmıştır. Ayrıca PCB'nin elastisite modülünü değişken olarak tanımlamış ve üç yöndeki

modüllerini karşılaştırmıştır. Sonuç olarak X ve Y yönlerindeki elastisite modüllerinin analize etkisinin olduğunu, diğer yandan Z yönündeki elastisite modülünün modal analize etkisinin çok az olduğunu belirtmiştir.

Tinca ve ark. (2021) PCB'nin statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarını incelemek için sonlu elemanlar ve fiziksel test modelleri oluşturmuştur. PCB üzerinde yer alan komponentlerin yerleşimini ve bu komponentlerin malzemelerini basit bir şekilde sonlu elemanlar modelinde tanımlamak için Sherlock yazılımını kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelini doğrulamak amacıyla sanal ve fiziksel ortamda aynı dinamik ve statik testleri gerçekleştirmiş ve korelasyonu sağlamıştır.

Fathzade ve ark. (2021) PCB'nin modal frekanslarını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 0-1000 Hz arasında ilk üç doğal frekanslarını ve mod şekillerini bulmuştur. Modal analiz sonucunu kullanarak PCB'nin rastgele titreşimler altında sinüzoidal analizlerini yapmış ve yorulma ömrünü tahmin etmiştir. Rastgele titreşim ile yapılan yorulma analizinde, lehim bağlantı noktalarının oldukça önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

2.6.2. PCB Termal Mekanik Testleri ve Analizleri

Nowak ve ark. (2011) PCB'nin termal mekanik özelliklerini incelemek için çeşitli analiz ve test çalışmaları yapmıştır. Öncelikle çalışmasına PCB malzemesini karakterize ederek ve sonlu elemanlar modelinde kullanarak başlamıştır. Hem deneysel hemde sanal olarak -40/+85 °C ve -55/+125 °C sıcaklıklarında iki farklı çevrimsel senaryoyu koşturmuş ve aralarındaki korelasyonu incelemiştir. Sonuç olarak elde ettiği test bilgilerini Weibull dağılımı kullanarak sonuçlarının güvenilirliğini belirtmiştir.

Hu ve ark. (2011) PCB'lerdeki iletken bakır katmanı üzerinde çalışma yapmıştır. Bakır iz olarak adlandırılan bu katman komponentleri maskeleyecek şekilde üretilmektedir. Bu çalışmada düz bakır katman ile maskelenmiş bakır katman arasındaki farkı araştırmıştır. Sıcaklık farkından kaynaklanan çarpılmayı analiz etmek için sonlu elemanlar modeli

oluşturmuştur. Sonuç olarak her iki bakır iz modeli karşılaştırılmış ve aralarında gerinim açısından en fazla yaklaşık %5 fark olduğu görülmüştür.

McLeish ve ark. (2014) PCB modelinin oluşturulmasında Sherlock yazılımının kullanılması ile ilgili bir çalışma yapmıştır. PCB’de yer alan komponentlerin tiplerini (kapasitör, transistör, rezistör vb.), komponent pozisyonlarını, komponentlerin malzemelerini ve lehim uçlarını, derin delikleri gibi özellikleri modele kolaylıkla aktarıldığını belirtmiştir. Termal, titreşim, rastgele veya harmonik yükleme senaryoları PCB üzerinde yapılabildiğini ve modelin Ansys Workbench arayüzüne aktarılabilirdiğini de belirtmiştir.

Serebreni ve ark. (2018) PCB’lerdeki sınır şartlarının kart üzerindeki gerinim miktarına etkisini incelemek için elektronik bileşenler ile birlikte termal mekanik sonlu elemanlar analiz modeli oluşturmuştur. Kullandığı Sherlock yazılımı ile birlikte modelinde paket düzeyinde, baskılı devre kart özelliklerini (malzeme, kalınlık vb.) tasarım dosyasından kapsamlı bir şekilde modele entegre ettiğini belirtmiştir. Sonuç olarak analizde uygulanan yazılım paketi, karmaşık elektronik düzenekleri oluştururken zamandan oldukça tasarruf sağladığını belirtmiştir.

Yang ve ark. (2018) PCB ile komponentler arasındaki bağlantıyı sağlayan lehim uçlarının çeşitli tasarımları üzerinde çalışmıştır. Oluşturduğu lehim uç tasarımlarını karşılaştırmak amacıyla sonlu elemanlar modelinde -55 °C ile 125 °C derece arasında termal şok test şartı uygulamıştır. Lehim uçlarının yorulma ömürlerini karşılaştırmıştır.

Akbari ve ark. (2019) PCB ile entegre devre veya transistör ile arasındaki bağlantıyı sağlayan lehimlerin üç farklı tipini (konkav, düz ve konveks) incelemiştir. Bakır maskelemeyi (solder mask) ve bakır yastıkları (copper pad) dahil ettiği modelinde ayrıca çıplak PCB için düzlemsel yönte iki farklı elastisite modülü kullanmıştır. Termal yükleme analiz sonuçları incelendiğinde konkav lehim ucundaki gerilmenin en düşük, konveks olanın ise en yüksek olduğunu belirtmiştir.

Chaudhari ve ark. (2019) PCB'nin yüksek sıcaklık değişimlerdeki mekanik davranışlarını incelemek amacıyla sonlu elemanlar modeli oluşturmuş ve termal mekanik analiz koşturmuştur. Ortam sıcaklığını çevrimsel olarak -40 °C'den 125 °C'ye çıkarmış ve hasar oluşana kadar devam etmiştir. Analiz ve test sonunda PCB üzerinden ölçdüğü gerinimleri ve hasarın oluştuğu bölgeleri karşılaştırmıştır. Sonuç olarak maksimum gerinimlerin PCB ile komponenti bağlayan lehim uçlarında oluştuğunu ve hasarın bu bölgelerde oluştuğunu belirtmiştir.

2.6.3. PCB Deneysel Tasarım ve Optimizasyon Çalışmaları

Maia ve ark. (2010) PCB'nin lehim uç tiplerini incelemek amacıyla üç farklı lehim uç tasarıma sahip deney tasarımları oluşturmuştur. Strengç kullanarak PCB ve komponentler üzerinden gerinim değerleri okumuştur. Topladığı verileri sonlu elemanlar modelini kurup aynı torsiyon test senaryosunu sanal ortamda uygulamış ve fiziksel/sanal test korelasyonun iyi bir seviyede olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak lehim uçlarında oluşan gerinimler arasındaki ilişkiyi tanımlamıştır.

Aoues ve ark. (2012) deneysel tasarım modelinde çeşitli tasarım değişkenleri belirlemiş ve lehim uçlarındaki yorulma ömrüne olan etkilerini incelemiştir. Tasarım değişkeni olarak sıcaklık, lehim ucu boyu ve kalınlığı, PCB boyu ve kalınlığı, komponent kalınlığı gibi parametreleri seçmiş. Cevap fonksiyonu olarak ise lehim uçlarındaki yorulma ömrünü belirlemiştir. Sonuç olarak yaptığı deneysel tasarım sonucunda, tasarım parametrelerin PCB'deki yorulma ömrüne etkisini incelemiştir.

Xia ve ark. (2013) PCB'nin termal yorulma direncini iyileştirmek için malzeme özellikleri, lehim uçlarının kalınlıkları, iletim katsayıları gibi bazı değişken parametreler seçmiş ve deneysel tasarım metodunu kullanarak bu parametrelerin termal yorulmaya sağladığı katkıları elde etmiştir. Termal yükleme profili tanımlanmış olan analizinin cevap fonksiyonu olarak bağlantı uçlarındaki gerilmeleri incelemiş ve Coffin-Manson modelini kullanarak bu uçlardaki yorulma ömürlerini elde etmiştir. Sonuç olarak incelediği parametrelerin termal yorulma ömürlerine olan etkilerini ve hangi parametrelerin en önemli olduğunu göstermiştir.

Han (2014) çalışmasında PCB üzerinde yer alan komponentleri farklı pozisyonlarda titreşim ve PSD analizlerini yapmıştır. Sonlu elemanlar modelini oluşturduğu baskılı devre kartlarının analizlerini yapmış ve her bir pozisyonun yorulma ömürlerini kıyaslamıştır. Sonuç olarak maksimum gerilmelerin PCB ile komponentleri bağlayan lehimlerde oluştuğunu ve bu gerilme miktarlarının yorulma ömürlerini direkt etkilediğini belirtmiştir. Maksimum gerilmelerin pozisyonları belirgin bir şekilde görüldüğü için bunların pozisyonlarını da optimize etmenin mümkün olduğunu belirtmiştir.

Xu ve ark. (2016) en uygun PCB modelini elde etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanarak modal ve yorulma analizleri yapmış, anizotropik PCB'nin malzeme özelliklerini tasarım değişkeni olarak belirlemiştir. Gerçekleştirdiği optimizasyon çalışması sonucunda kritik bölgelerdeki lehimlerin güvenliği için en uygun PCB malzemesini elde etmiştir.

Alexandridis ve ark. (2017) PCB'nin termal özelliğini baz alarak devre kartı üzerindeki komponentlerin pozisyonlarını iyileştirmek amacıyla sürü optimizasyon tekniği kullanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde devre kartı ile komponentler arasındaki bağlantıyı sağlayan lehim bağlantıları ihmal etmiş ve yapışık kabul etmiştir. Optimizasyon modelinde amaç olarak komponentlerde oluşan sıcaklığı minimize etmek olmuştur. Sonuç olarak bir miktar analiz iterasyonundan sonra termal analiz çözümüne göre PCB üzerindeki bileşenlerin dizilimini elde ettiğini belirtmiştir.

Gao ve ark. (2021) sonlu elemanlar yazılımında modal ve yorulma analizleri yapmış ve PCB'de yer alan elektronik bileşenleri basit bir şekilde modellemiştir. PCB üzerinde yer alan elektronik bileşenleri üç farklı lokasyonda dağılımlarını yapmış ve güvenilirliğini incelemiştir. Bu üç farklı lokasyonda yer alan komponent dağılımlarının sonlu elemanlar modelini oluşturmuş ve çözmüş. Sonuç olarak elektronik bileşenlerin PCB üzerindeki lokasyonları devre kartı üzerindeki gerilim dağılımlarını ve yorulma ömrünü oldukça fazla etkilediğini belirtmiştir.

Chen ve ark. (2021) PCB'lerde yorulma ömrünü tahmin etmek için sonlu elemanlar ve deneysel tasarım metodu kullanmıştır. Çip kalınlığı, PCB kalınlığı, lehim bağlantısının

kalınlığı gibi tasarım değişkenlerini belirlediği deneysel tasarımında cevap fonksiyonu olarak gerinim değerlerini göz önüne almıştır. Sonuç olarak PCB ile komponent arasında bağlantıyı sağlayan basit bir modelin yorulma ömür tahminini, sinir yapay ağ metodu kullanarak %90 doğrulukta tahmin ettiğini belirtmiştir.

Gao (2021) belirli bir PCB'nin modal frekanslarını elde etmek için sonlu elemanlar yazılımı kullanmış ve ilk 6 modunu çıkarmıştır. PCB bağlantı noktalarının koordinatlarını tasarım parametresi olarak, modal frekansları da cevap fonksiyonu olarak tanımlamış ve optimizasyon modeli kurmuştur. Sonuç olarak en uygun bağlantı merkez koordinatlarına sahip modeli elde ettiğini belirtmiştir.

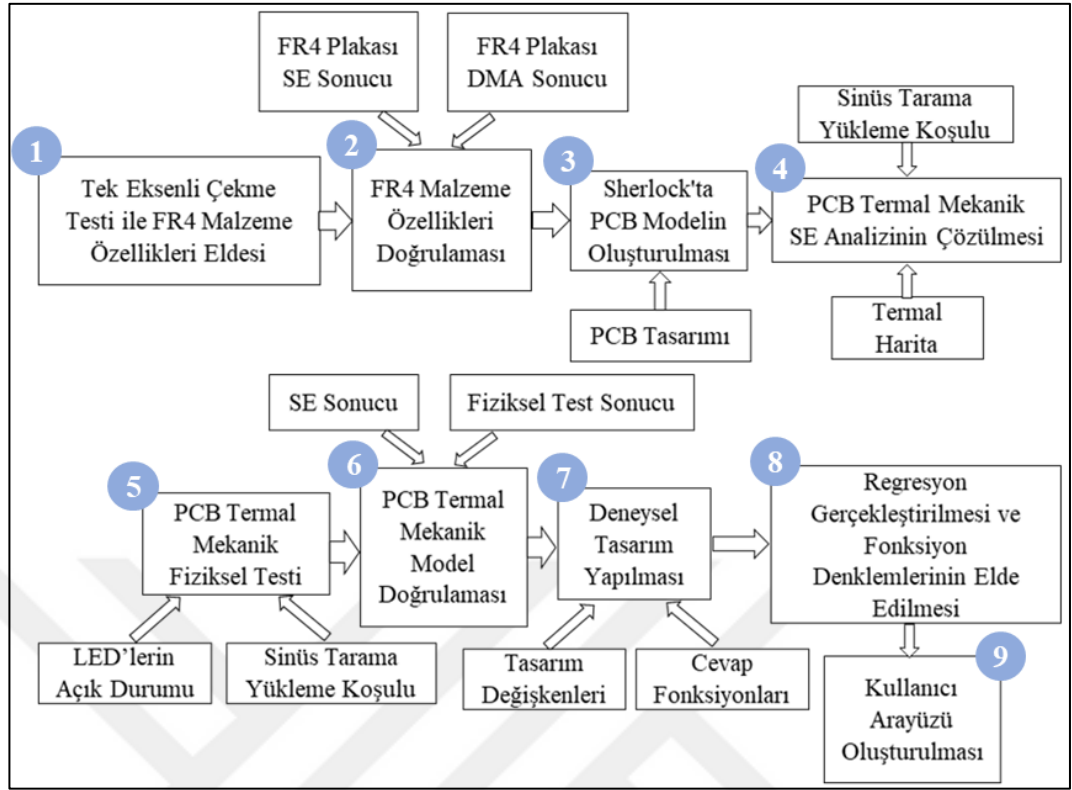
Bilbay ve ark. (2023) PCB için fiziksel test ile korele edilmiş sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. LED ışık açık halde üç adet strengçe transistörlerin olduğu bölgelere yerleştirilmiş ve anlık gerinim verileri okunmuş ve bunlar kaydedilmiştir. Aynı sınır şartlarında LED ışığı açık haldeki sıcaklık haritası dahil edilerek devre kartı için sonlu elemanlar analizi yapılmış ve aynı bölgelerdeki gerinim değerleri okunmuştur. Sonuç olarak devre kartının malzeme özelliklerini tasarım parametresi, strengçelerden okunan gerinim değerlerini cevap fonksiyonu kabul ederek deneysel tasarım ve optimizasyon yapılarak fiziksel test ile korele edilmiş sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmada FR4 malzemesinin (PCB çekirdek katmanı) anizotropik özelliklerini elde etmek ve sonlu elemanlar modelinde kullanmak amacıyla FR4 numuneleri ile tek eksenli çekme testi yapılmıştır. FR4 malzemesinin anizotropik malzeme özelliklerini sanal ortamda doğrulamak amacıyla 160 x 400 mm boyutlarındaki plakalara DMA yapılmış ve MAC ile şekilsel olarak modal doğruluğu tespit edilmiştir.

PCB'nin sonlu elemanlar modeli "Sherlock" yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Elektronik kartın üzerindeki komponentlerin tipleri ve malzemeleri, ayrıca bağlantı uçları detaylı bir şekilde modele dahil edilmiştir. Elektronik kartlar için otomotiv aydınlatmada oldukça önemli olan LED'lerin açık halindeki oluşan ön gerilme de modele dahil edilmiştir. Termal kamera kullanılarak sıcaklık dağılımı elde edilmiş ve modele entegre edilmiştir. Devre kartı modeli LED'ler açık halindeki sınır şartlarında sinüs tarama yükleme koşulu kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. PCB'nin sonlu elemanlar modelini doğrulamak amacıyla kartın aynı sınır şartlarını ve aynı yükleme koşullarını kullanarak modal sarsıcıda sinüs tarama testi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak korele edilmiştir.

Son olarak PCB'nin deneysel tasarım modeli oluşturmak için tasarım değişkenleri ve cevap fonksiyonları belirlenmiştir. Deneylerin çözümü yapılmış ve seçilen parametrelerin cevaplara olan etkisi incelenmiştir. Deneysel tasarım sonuçlarını baz alarak regresyon işlemi yapılmış ve deneylerden elde edilen her bir cevap fonksiyonları için tasarım parametrelerine bağlı denklemler ve cevap yüzeyleri elde edilmiştir. Elde edilen denklemlerin son kullanıcı tarafından kullanılabilmesi için arayüz oluşturulmuştur. Çalışmada izlenen akışı anlatan şema Şekil 3.1'de verilmiştir.



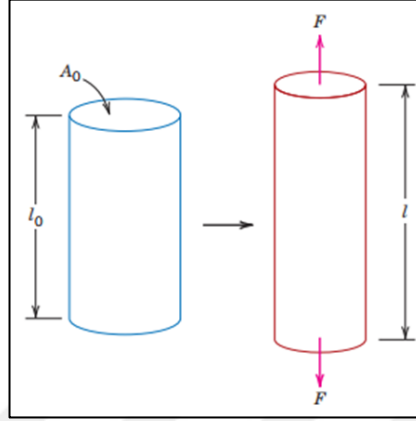
Şekil 3.1. PCB için kullanıcı arayüzü oluşturulmasının akış şeması

3.1. FR4 Malzeme Özelliklerinin Elde Edilmesi

Bazı tek kristalli maddelerin fiziksel özellikleri, ölçümlerin yapıldığı kristalografik yöne bağlıdır. Örneğin, elastik modül ve elektriksel iletkenlik değerler farklı yönlerinde farklı değerlere sahip olabilir. Bu yönlerdeki değişkenlik özelliği anizotropi olarak adlandırılır ve atomik aralığın kristalografik yöndeki varyansı ile ilişkilidir. Ölçülen özelliklerin ölçüm yönünden bağımsız olduğu maddeler ise izotropiktir.

Devre kartında kullanılan çekirdek malzemesi yapısı sebebiyle anizotropik olarak kabul edilmektedir. Çekirdek malzemesini sonlu elemanlar modelinde efektif bir şekilde tanımlamak için farklı yönlerdeki elastik özelliklerin tanımlanması gerekmektedir. Aksi halde PCB'nin sonlu elemanlar ile test sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir (Arabi, 2018). Bu özellikler test numunesi kullanılarak çekme testi ile elde edilmektedir.

Bir yük statikse veya zamanla nispeten yavaş değişiyorsa ve bir elemanın enine kesitine veya yüzeyine düzgün bir şekilde uygulanıyorsa, mekanik davranış Şekil 3.2’deki gibi basit bir çekme testi ile belirlenebilir.



Şekil 3.2. Tek yönde çekme testi örneği

Çekme testi, tasarımda önemli olan malzemelerin çeşitli mekanik özelliklerini tespit etmek için kullanılabilir. Bu test sırasında “dog-bone” numune konfigürasyonu, deformasyonun (uzunluğu boyunca düzgün bir enine kesite sahip olan) dar merkez bölgeyle sınırlandırılması ve ayrıca numunenin uçlarında kırılma olasılığının azaltılması için seçilmektedir.

Çekme testinin çıktısı uzamaya karşı kuvvet olarak kaydedilir. Bu kuvvet-deformasyon özellikleri, numune boyutuna bağlıdır. Örneğin, numunenin enine kesit alanı iki katına çıkarsa, aynı uzamayı üretmek için iki kat yük gerekir. Bu geometrik faktörleri en aza indirmek için kuvvet ve uzama, ilgili mühendislik gerilimi ve mühendislik gerilimi parametrelerine göre normalleştirilir. Mühendislik gerilimi (σ) aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

Burada F kuvveti (N), A_0 numunenin kesit yüzey alanını (mm^2) temsil etmektedir. Mühendislik gerinimi (ϵ) ise aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

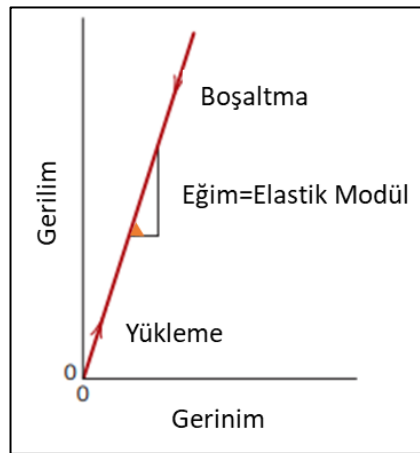
$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2)$$

Burada l_0 herhangi bir yük uygulanmadan önceki orijinal uzunluk, l_i anlık uzunluk, Δl orijinal uzunluğa bağlı olarak herhangi bir anda deformasyon uzaması veya uzunluk değişimidir. Mühendislik gerinimi birimsizdir, gerinim değerinin 100 ile çarpıldığı bir yüzde olarak da ifade edilir.

Bir yapının deforme olma veya gerinme derecesi, uygulanan gerilmenin büyüklüğüne bağlıdır. Gerilimde ve nispeten düşük seviyelerde gerinen çoğu malzeme için, gerilim ve gerinim ilişkisi birbiriyle orantılıdır ve Hooke yasası olarak bilinir.

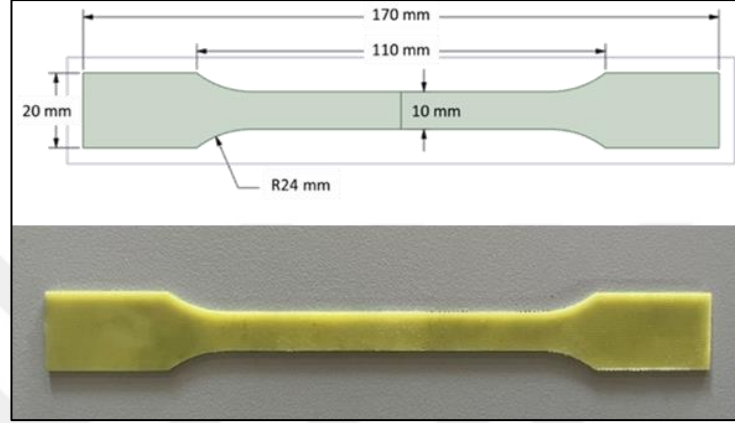
$$\sigma = E * \varepsilon \quad (3.3)$$

Gerilme ve gerinimin orantılı olduğu deformasyona elastik deformasyon denir ve Şekil 3.3'te gösterildiği gibi gerilmeye karşı gerinim grafiği doğrusal bir ilişkiyle sonuçlanır. Bu doğrusal çizginin eğimi elastiklik modülüne karşılık gelir. Bu modül, sertlik veya bir malzemenin elastik deformasyona karşı direnci olarak düşünülebilir. Modül ne kadar büyükse, malzeme o kadar serttir veya belirli bir gerilimin uygulanmasından kaynaklanan elastik gerinim o kadar küçüktür. Elastik deformasyon kalıcı değildir, yani uygulanan yük serbest bırakıldığında parça orijinal şekline döner (Callister, 2007).

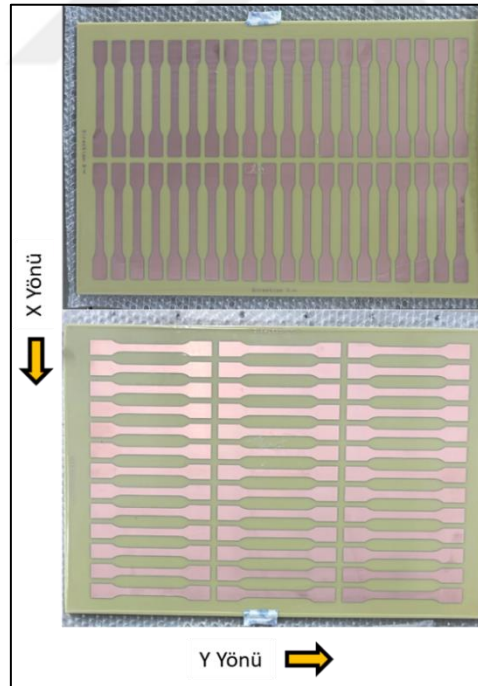


Şekil 3.3. Şematik gerilim-gerinim diyagramı

İki farklı yönde yapılan çekme testi sayesinde malzemenin anizotropik özellikleri elde edilmiştir. ISO 527-4 çekme test standartına göre üretilen 4 mm kalınlığındaki numunelerin detaylı ölçülendirme bilgisi Şekil 3.4'te görülmektedir. Çalışmada çekme test numunelerinin X ve Y yönlerindeki elastik modülünü elde etmek için her iki yönde farklı numuneler Şekil 3.5'teki gibi hazırlanmıştır.



Şekil 3.4. ISO 527-4 çekme testi numunesi



Şekil 3.5. X ve Y yönlerindeki çekme testi numuneleri

FR4 numunelerinin tek yönlü çekme testi için Şekil 3.6’da gösterilen INSTRON markasının 34TM-50 modelindeki test makinesi, ISO 527-4 çekme test şartnamesi baz alınarak kullanılmıştır. Numunelerin uç kısımları makine aparatına yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. X ve Y eksenlerinde kesilmiş 10’ar adet numuneler oda sıcaklığında, 2 mm/dk hızında çekilmiş ve dokunmatik ekstansometre yardımıyla bilgisayardan gerilime karşılık gelen uzama eğrisi elde edilmiştir. Her bir numunenin elastik modülü makine tarafından hesaplanmış ve on adet numunenin ortalaması sonlu elemanlar yazılımına tanımlanmıştır.

Temaslı ekstansometre, Şekil 3.6’da görüldüğü gibi malzemenin yüzeyine sabitlenmiştir. Çalışmada, ekstansometreyi oluşturan iki paralel kol malzeme yüzeyine sabitlenmiştir. Bu kollar arasındaki mesafe, malzemenin uzamasıyla değişmektedir. Test sırasında malzeme çekme işlemi uygulanırken, malzemenin orijinal uzunluğundaki değişiklikler gözlemlenmiştir. Ekstansometre, malzemenin uzama miktarını algılamış ve bu değişikliklerin büyüklüğünü ölçmüştür.



Şekil 3.6. Çekme testi makinesi

3.2. FR4 Plakasının Malzeme Özelliğinin Doğrulanması

Birçok yapı titreşimden etkilenir ve titreşimin etkilerinden dolayı araştırılması ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmaların yapılabilmesi için yapının dinamik özelliklerinin ortaya çıkarılması sağlanmalıdır. Bunun yanısıra yapıların modal özelliklerini ortaya koyan deneysel çalışmalara modal testler (deneysel modal analiz) adı verilir. Dış kuvvete maruz kalan yapılar titreşme eğilimindedir. Modal test ve modal analiz, maruz kaldıkları kuvvetlerin bir sonucu olarak yapıların dinamik davranışını karakterize edilmesinde kullanılır. Deneysel modal analizler, yapıların nasıl titreştiğini, kuvvetlere nasıl direndiklerini ve yapısal mekaniklerinin ne olduğunu anlamak için gereklidir.

3.2.1. Deneysel Modal Analiz (DMA)

Deneysel modal analiz, doğrusallık ve zamanla değişmezlik olmak üzere iki temel varsayımın kontrol edilmesini gerektirir. Doğrusallık, modal analizin temelidir ve bireysel modları üst üste bindirilmesiyle sistem davranışını tanımlar. Deneysel modal analiz için gerekli ölçümler belirli bir süre boyunca ölçüm bütünlüğünü sağlamak için sistemin zamanla değişmeyen olması gerekir. Deneysel modal analizde istenilen ölçümler belirli bir zaman süresince yapılabildiğinden elde edilen ölçümlerde bir bütünlük sağlayabilmek için sistemin zaman alanında değişmez olması gerekmektedir (Anonim, 2019, Thompson, 1996).

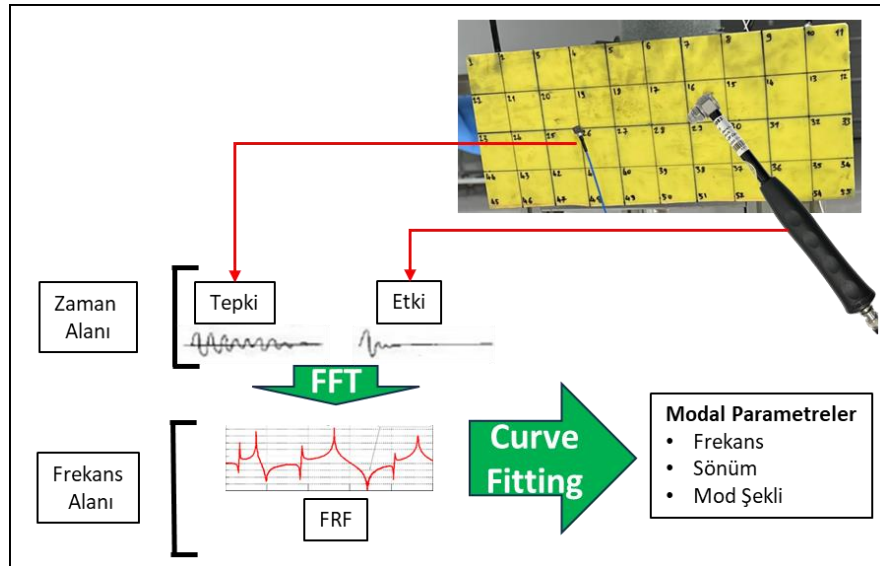
Zamanda değişmezlik kabulü temelinde olmak üzere, sistemde ölçüm yapılan zaman dışında ortaya çıkan değişimler yardımıyla iki ölçüm arasında oluşan değişimler izlenir. Örneğin, oluşan değişim bir hasar sebebiyle olur ise, hasar ve lokasyonu tespit edilebilir.

Deneysel modal analiz metodunda çözümleme, sistem davranışının her birine dik olan modları ile tanımlanabileceğini kabul eder. Bu kabul vasıtasıyla birimdeki tahrik uyarısına göre zaman uzayındaki sistemin ötelenme fonksiyonu aşağıdaki denklemde olduğu gibi yazılabilir.

$$x(t) = \sum_{k=1}^N e^{\sigma_k t} [A_k e^{j\omega_k t} + A_k^* e^{-j\omega_k t}] \quad (3.4)$$

Bu denklemde A: sistemdeki modal şekiller ile bağlantılı değişken, t: zaman, N: serbestlik derecesi sayısı, σ : sönüm katsayısıdır, ω : sistemin sönümlü frekanslarıdır.

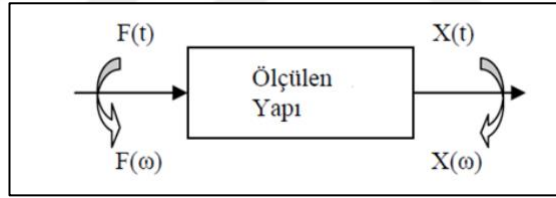
Deneyisel modal analizi başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmek için yapı dinamiğini temel olarak anlamak gerekir. Özellikle frekans cevap ve transfer fonksiyonları ile modal parametreler aralarındaki ilişki oldukça önemlidir (Ewins, 2000). Frekans cevap fonksiyonu (FRF), elde edilen yanıtın girdiye oranı olarak isimlendirilir. FRF fonksiyonunun kutupları, sistemin doğal frekanslarını gösterir. Benzer şekilde, kutuplardan modal sönüm oranları da elde edilir. Yapı üzerindeki noktalardan yeteri kadar veri elde edilmesiyle birlikte modların şekilleri elde edilebilmektedir. Bunu yapmak için yapıya bir kuvvet uygulanması ve yapının bu kuvvete tepkisinin ölçülmesi gerekir. Bu yöntemde yapı üzerindeki kuvveti ölçmek için bir çekiç veya sarsıcı ve yapının kuvvete karşı tepkisini ölçmek için ivmeölçer kullanılır. Veri toplama analizöterleri, yapı içindeki sinyal adımlarını değerlendirmek için yapı ile birlikte kullanılır.



Şekil 3.7. Deneyisel modal analiz sistematiği

Çalışmadaki yapıya uygulanan kuvvetin çekiç olarak yer aldığı Şekil 3.7’de görülmektedir. Çekicinin uç kısmında yer alan kuvvet ölçer uç kullanılarak yapıya uygulanan etki miktarı zaman alanında ölçülmüştür. Kuvvetin uygulanmasıyla ve yapının titreşime maruz kalmasıyla birlikte yapının etkiye gösterdiği tepki cevabı yapıdaki ivmeölçerler yardımıyla zaman alanında ölçülmüştür. Bu işlem basitçe değerlendirilirse temelinde Şekil 3.7’deki sistematik bulunur. Modal analiz sistematığının mantığı ivmeölçer çeşitleri, kuvvet çeşitleri veya uygulamadaki seçenekler değişse dahi aynı şekilde çalışmaktadır. Şekil 3.8’deki gibi zaman alanındaki uygulanan ölçümler “Fast Fourier Transform” (FFT) dönüşümü kullanılarak etki ve cevap fonksiyonlarının frekans alanına dönüştürülmesini sağlamaktadır (Schwarz, 1999).

Çalışmada FRF verilerini modal parametrelere dönüştürmek için eğri uydurma (curve fitting) yöntemleri kullanılmıştır. FRF grafiği üzerindeki tepe noktalarını (rezonans frekanslarını) belirleyerek modal parametreleri tahmin eden basit ve hızlı bir eğri uydurma yöntemi olan tepe tutma yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Fourier dönüşümü

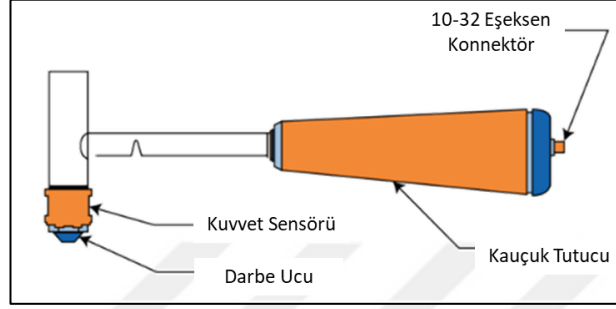
Frekans Cevap Fonksiyonu, fourier dönüşümleri yapılmış tepki fonksiyonunun etki fonksiyonuna bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$\alpha(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (3.5)$$

Sonuç olarak frekans cevap fonksiyonları yardımıyla yapının mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları belirlenir.

3.2.2. Darbe Çekiç Test Metodu

Frekans cevap fonksiyonu genellikle sabit bir çıkış ile giriş noktaları arasında hesaplanarak yapılmaktadır. Çalışmada Şekil 3.9'da görüldüğü gibi giriş için üzerinde kuvvet ölçen sensör bulunan darbe çekiç kullanılmıştır. Çıkış için ise ivmeölçerler tercih edilmiştir.



Şekil 3.9. Modal çekiç sistemi

Darbe çekiç test yöntemi, çekicinin kendisini veya ivmeölçeri gezdirmeye durumuna bağlı olarak adlandırılır. Test esnasında ivmeölçeri gezdirmek yerine ivmeölçer belli bir sabit noktadan cevap alır ve darbe çekiç serbestlik derecesi arasında etkiye olacak şekilde uygulanır. İvmeölçer gezdirmeye metoduna göre bu yöntem daha çok tercih edilmektedir. Darbe çekicinin parça üzerinde gezdirmenin ivmeölçer gezdirmeye göre avantajları aşağıdaki gibidir;

- İvmeölçerin tekrarlı bir şekilde sökülmesi/takılması ve hareket ettirilmesi yapının üzerindeki kütle dağılımını ve ölçüm doğruluğunu etkiler.
- İvmeölçerin gezdirildiği yöntemde ivmeölçerin sökülmesi ve takılması darbe çekicinin gezdirildiği yöntemle göre daha az zaman almaktadır. Bu nedenle işlemin doğruluğu ve kolaylığı açısından darbe çekicinin gezdirilme yöntemi tercih edilmektedir.

Doğru çekiç ucu seçimi, deneysel modal teste dahil olan frekans aralığı için oldukça önemlidir. Daha sert uca sahip malzeme seçilmesi daha geniş frekans aralığında tarama yapma olanağı sağlar ve aynı zamanda çekicinin çift vuruş ihtimalini de azaltabilir. Daha yumuşak uca sahip malzeme seçilmesi daha dar frekans aralığında yapıda daha uzun

darbe süresi oluşturur, ancak modal testte incelenen frekans aralığı daha küçük olur. Çalışmada FR4 plakası için daha belirgin FRF eğrileri verdiği ve çift vuruş ihtimallerinin daha az olduğu için plastik uç kullanılmıştır.

İvmeölçerler, frekans cevap fonksiyon sonucunu başarılı bir şekilde elde edilmesini sağlar ve test aşamasında yapıdaki ivme ölçümünü mümkün kılan deneysel modal analizin oldukça önemli bir parçasıdır. Test esnasında etkiye karşı tepki veren elemanlardır. Pizo elektrik özelliğe sahip ivmeölçerler genellikle yapısal titreşim ölçümlerinde tercih edilmektedir. Bu tipe sahip ivmeölçerler, piezoelektrik özelliğe sahip malzeme gerildiği zaman elektrik yükü ve titreşim ivmesiyle orantılı olan bir elektrik sinyali üretir. İvmeölçerlerin tipi titreşim testlerinin türlerine bağlı olarak değişim gösterir. Bu sebeple titreşim testleri yapılırken yapı üzerinden doğru verileri okumak için kullanılan ivmeölçer seçimi oldukça önemli bir rol üstlenir. İvmeölçerlerin ölçüm frekans aralığında doğal frekansının olmaması ve ölçümü etkilememesi oldukça önemlidir. İvmeölçerlerin türü hassasiyete ve frekans bandına göre değişmektedir. Örneğin düşük frekans bandına sahip yapılarda genellikle yüksek hassasiyetli ivmeölçer kullanılırken, yüksek frekans bandına sahip yapılarda daha düşük ivmeölçer kullanılmaktadır.

Veri toplama (Data Acquisition – DAQ) gerçek dünyada olan fiziksel olay sinyallerini ölçer ve bunları bilgisayar yardımıyla anlaşılabilir bir dijital forma dönüştürür. Veri toplama metodunda, sinyaller analog formdan dijital bir forma dönüştürülür ve sonrasında dijital formda kaydedilir. Sinyal koşullandırıcılar, sensörler, analog-dijital dönüştürücüler yazılıma sahip bir bilgisayar ile çalışır. Veri toplama, darbe çekiç ile elde edilen veriler ile ivmeölçerler arasında köprüs olmasından oldukça öneme sahiptir. Yapılardaki dinamik malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için ivmeölçerlerden elde edilen sinyaller veri toplama sistemine aktarılır ve burada sinyaller işlenir. Sinyal işleme adımı bilgisayardaki özel yazılımlar kullanılarak uygulanmaktadır. Bilgisayara sinyallerin aktarımı zaman alanında olmaktadır fakat pratik sebeplerden ve hesaplama ihtiyacından dolayı sinyallerin aktarımı frekans alanında tercih edilmektedir (Anonim, 2022a).

3.2.3. Hızlı Fourier Dönüşümleri (FFT)

Fourier dönüşümleri, birçok uygulamada sinyal analizi gerçekleştirirken kullanılan yöntemlerden biridir. Hızlı Fourier Dönüşümünün kısaltması olan FFT, zaman alanında toplanan sinyalleri frekans alanına dönüştürür. FFT dönüşümü kullanılarak büyük sayıdaki sinyal özelliği, zaman formuna sahip verilerin incelenmesi ile karşılaştırıldığında çok daha fazla katkı sağlayabilir. Sinyal özellikleri frekans alanında frekans bileşenleri ile tanımlanır, zaman alanında ise bileşenlerini oluşturan özelliklerin toplamına eşit sadece bir dalga formu olarak tanımlanır.

Veri toplama sistemleri zaman alanındaki verileri elde etmek için FFT analizinde kullanılır. Sensörden elde edilen veriler bilgisayar yazılımı tarafından derlenir ve analize uygun hale gelmesi için sayısallaştırılır.

Fourier serisi açıldığında,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} * t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} * t\right)] \quad (3.6)$$

olacak şekilde ifade edilmektedir (Ramos, 2007). Bu denklemde, a_0 , b_n ve a_n sırasıyla

$$a_0 = \frac{2}{N} * \sum_{k=1}^N x_k \quad (3.7)$$

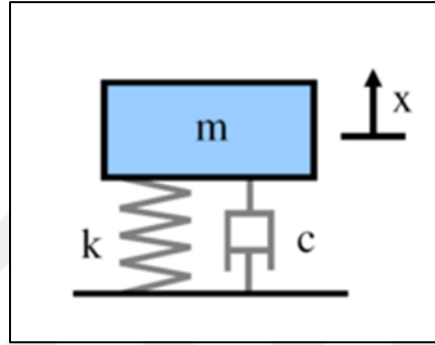
$$a_n = \frac{1}{N} * \sum_{k=1}^N x_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N} * n\right) \quad (3.8)$$

$$b_n = \frac{1}{N} * \sum_{k=1}^N x_k \sin\left(\frac{2\pi k}{N} * n\right) \quad (3.9)$$

olacak şekilde ifade edilmektedir.

3.2.4. Sönümlü Serbest Titreşim Hareketi

Titreşime maruz kalan bütün sistemlerde titreşim uygulayan dış etkilerin zamanla ortadan kalktığı ve sonrasında titreşimlerin yavaşça zayıflayarak tamamen yok olduğu gözlenir. Bu durum sistemlerde bulunan titreşim sönümleyicilerin mekanik enerjiyi absorbe etmesinden kaynaklanır. Sönüm adı verilen bu etkiler sistemin hızına karşı çalışır ve sönüm kuvvetlerini oluşturur ve sistematığı Şekil 3.10'daki gibidir (Anonim, 2019).



Şekil 3.10. Sönümlü serbest titreşim sistemi

Sönümlü serbest titreşimin genel formülasyonu;

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_d\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad (3.10)$$

Olacak şekilde diferansiyel denklem ile tanımlanabilir. Denklemdaki ζ , sönüm faktörü olup aşağıdaki denklem 3.11'deki gibi gösterilir.

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.11)$$

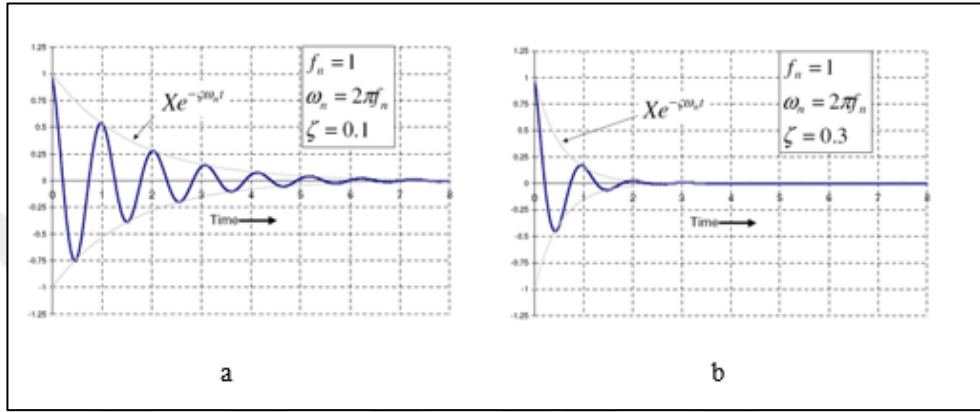
$\zeta < 1$ olma durumu, yani titreşim hareketlerinin ortaya çıkma koşulu altında diferansiyel denklemin çözümü aşağıdaki gibidir;

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t}(A_1 \sin \omega_d t + A_2 \cos \omega_d t) \quad (3.12)$$

Burada w_d ;

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.13)$$

Şeklinde tanımlanır ve titreşim frekansı olarak adlandırılır (Yokoyama, 2023). Sönümlü titreşimdeki sönüm oranı etkisinin gösterimi Şekil 3.11’de görülmektedir.



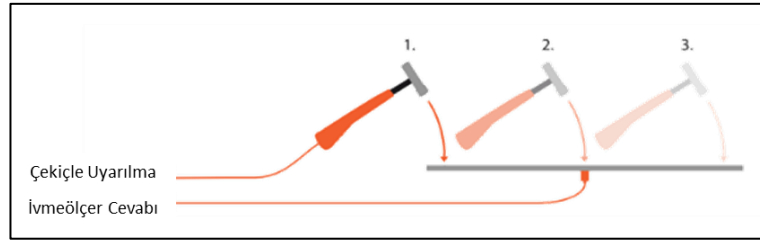
Şekil 3.11. Sönümlü titreşim modeli (a) 0,1 sönüm oranı (b) 0,3 sönüm oranı

3.2.5. Deneysel Modal Analiz Uygulama Yöntemleri

Deneysel modal analizleri tek referanslı ve çok referanslı modal testler olmak üzere iki farklı yöntemde gerçekleştirilebilir.

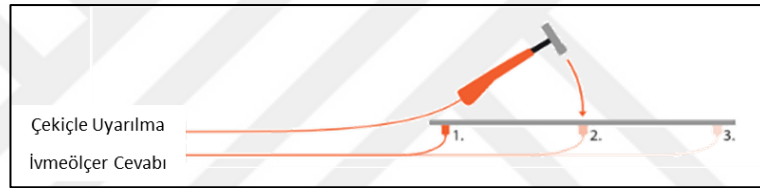
3.2.5.1. Tek Referanslı Modal Test

Tek referanslı gezdirilen çekiç testinde yalnız tek bir serbestlik derecesi (DOF) yanıtına ihtiyaç duyulmaktadır. Yapıya bağlanan ivmeölçer tek bir referans noktası olarak kabul edilir ve bununla birlikte çekiç etki olarak noktalar arasında gezdirilerek verilerin toplanması gerçekleşir. İvme ölçerin sabit, çekicinin hareketli olduğu tek referanslı testin gösterimi Şekil 3.12’de verilmiştir. Çalışmada çekiç gezdirmenin daha pratik olması ve ivmeölçerlerin sökölüp takıldığında sistemin ağırlık merkezini az da olsa değiştirme ihtimali olduğu için tek referanslı modal test metodu kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Çekicinin hareketli olduğu tek referanslı çekiç testi

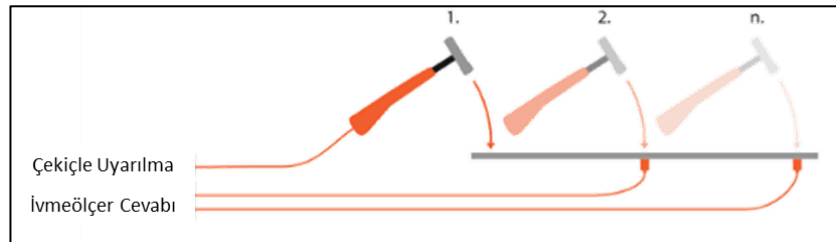
Tek referanslı gezdirilen ivmeölçer testinde uyarıcı olarak kullanılan çekiç tek bir noktaya etki ederken, ivmeölçer tüm noktalar arasında gezdirilerek verilerin toplanması gerçekleşir. Bu yöntemde ivmeölçerler her bir noktada sensörlerin taşınması ve tekrardan takılması nedeniyle gezdirilen çekiç testine kıyasla daha fazla zaman almaktadır ve bunu testin gösterimi Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13. İvme ölçerin hareketli olduğu tek referanslı çekiç testi

3.2.5.2. Çok Referanslı Modal Test

Bazı durumlarda model testi birden fazla referans noktaları ile ölçmek gerekmektedir. Bu yöntem moda ölçümlerde uygun bir referans serbestlik derecesi bulmanın mümkün olmadığı durumlarda kullanılır ve bu testin gösterimi Şekil 3.14’te verilmiştir. Çok referanslı testinde, test edilecek parçanın aynı rezonans frekansında birden fazla moda sahip olduğu durumlarda da kullanılabilir.



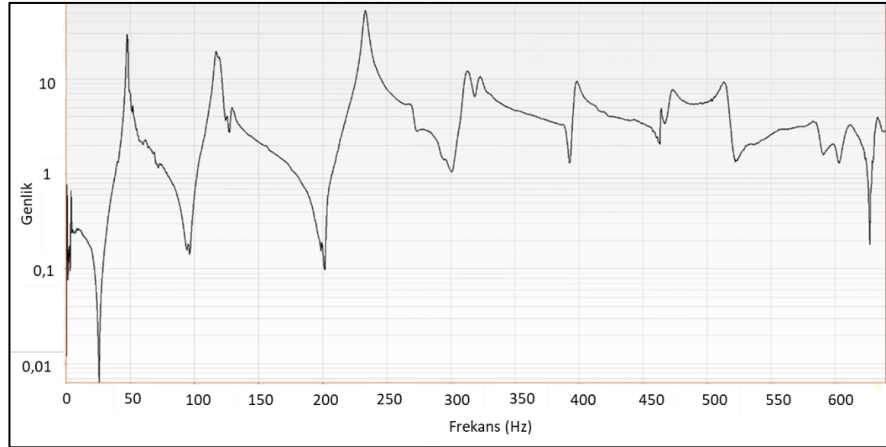
Şekil 3.14. Çok referanslı çekiç testi

3.2.6. Deneysel Modal Analiz Parametreleri

Deneysel modal analiz uygulamasında testin sonuçları hakkında yorum yapmak için birçok parametre hakkında bilgi edinmek gereklidir. Modal test ekipmanları kadar sinyal okuma ve yorumlama, grafiği inceleme ve detaylandırma gibi konular da oldukça önemlidir. Çalışmada sonuçları detaylandırabilmek ve deneysel modal analizdeki testin doğruluğunu yorumlayabilmek için frekans cevap fonksiyonu, tutarlılık ve modal doğrulama gibi parametreler incelenmiştir.

3.2.6.1. Frekans Cevap Fonksiyonu (FRF)

Frekans cevap fonksiyonu, İngilizce kısaltması FRF (frequency response function) olan frekans tabanlı ölçüm fonksiyonu olarak adlandırılır. Deneysel modal analizini en büyük sonucu DOF'lar ile geometri arasındaki cevap fonksiyonlarıdır. Frekans cevap fonksiyonu, etki hareketi olarak kabul edilen girdiler ile tepki hareketi arasındaki ilişkilendirilir ve FFT sinyalleri vasıtasıyla zaman alanında olan sinyali frekans alanına aktararak her bir FFT sinyalinin bışenleri için FRF oluşturur.



Şekil 3.15. Örnek frekans cevap fonksiyon eğrisi

Frekans cevap fonksiyonu, sönümlerin ve rezonans frekansların tanımlanmasında ve fiziksel yapıdaki mod şekillerinin anlamlandırılmasında rol alır. Bu tür kavramların FRF'de gösterimi Şekil 3.15'teki gibi gerçekleşir;

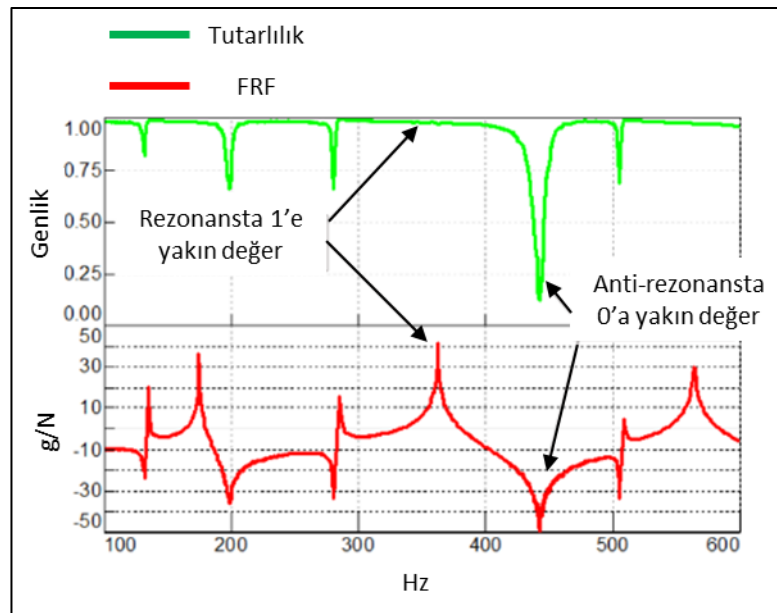
- Grafikteki zirve noktalar testi yapılan yapının doğal frekansını belirtir ve yapının o frekansta rezonansa girdiğini gösterir.
- Sönümlenme, zirve genişliğinin orantısı anlamına gelir ve grafikte zirve yapan bölgeler ne kadar geniş olursa sönümlenme de o kadar yüksek olur.
- Mod şekillerinin belirlenmesinde yapıdaki çoklu FRF fazlarından ve genliklerden yararlanılır.

3.2.6.2. Tutarlılık

Tutarlılık (Coherence), FRF'deki çıktı verisinin girdi verisine göre ne kadar farklı olduğunu gösteren bir fonksiyondur ve bu fonksiyon kullanarak FRF'in kalitesi ve tutarlılığı değerlendirir.

Tutarlılığın değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir;

- Değerin 1 olması ölçümün tekrar edilebilir ve tutarlı olduğunu gösterir.
- Değerin 0 olması ise tam tersi ölçümün tekrar edilemediğini, tutarlı olmadığını ve test kurulumunda hata olduğunu gösterir.



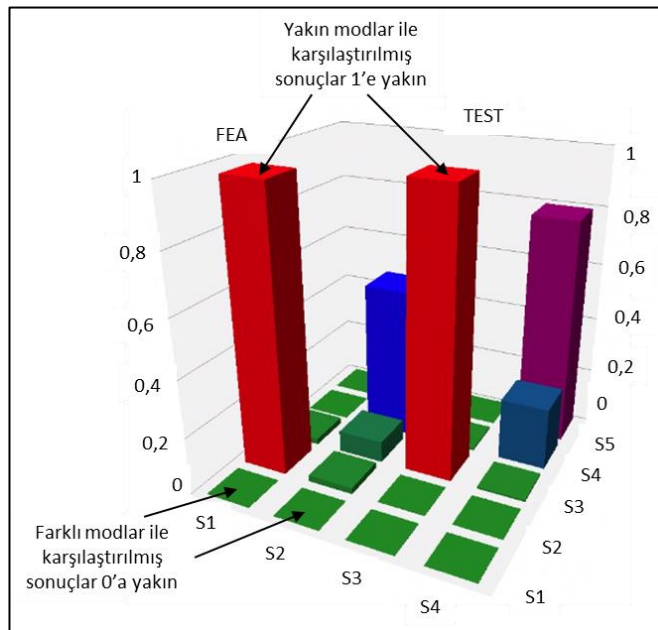
Şekil 3.16. Örnek FRF ve tutarlılık eğrileri

Frekans cevap fonksiyonu ile tutarlılık arasındaki ilişki Şekil 3.16'daki gibidir. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi FRF genliğinin zirve yaptığı yerlerde, tutarlılığın değeri 1'e yakın olmaktadır. Şekilde FRF genliğinin olmadığı (rezonans olmayan) durumlarda, yani anti-rezonans noktalarında tutarlılığın değeri 0'a yakın olmaktadır. Sinyallerin düşük olması nedeniyle bu olay gerçekleşmektedir.

Eğer tutarlılık değeri FRF grafiğindeki rezonans bölgelerinde 0 değerine 1'den daha yakınsa ölçümle ilgili bir problemin olduğunu belirtir. Özetle tutarlılık değerleri, FRF grafiklerinin kalitesinin belirlenmesinde ve modal test ölçümünün doğruluğunda önemli bir rol üstlenmektedir.

3.2.6.3. Modal Güvence Kriteri (MAC)

Modal doğrulama, yapılan modal testler sonrası elde edilen mod şekillerinin benzerliğini incelemek, doğrulamak ve öngörmek için kullanılan önemli bir matris sistemidir. Modal güvence kriteri (MAC), bilgisayar destekli yazılımlar kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizleri ile fiziksel testin kıyasını sağlar ve testin doğruluğu hakkında yüzdesel kıyaslama yaparak bilgi verir.



Şekil 3.17. MAC matris örneği

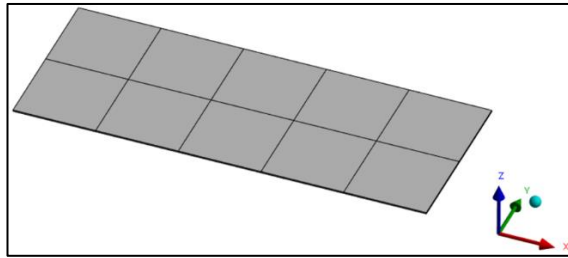
Modal güvence kriteri matrisi Şekil 3.17’de görüldüğü gibi %0 ile %100 arasında değişir ve bu yüzde değerler sonlu elemanlar analizi ile fiziksel testten elde edilen mod şekillerinin birbirine yakınlığını gösterir. Şekildeki matriste sonlu elemanlardan 5, testten ise 4 mod dahil edilerek toplam 20 MAC değeri hesaplanmaktadır. Kırmızı değerler mod şekillerinin oldukça yakın, koyu mavi değerler ise uzak olduğunu gösterir. İki mod şekli arasındaki karşılaştırmayı tanımlamak için modal güvence kriter değeri aşağıdaki gibi ifade edilir. Bu denklem ayriyet ϕ_r ve ϕ_s iki modal vektör arasındaki korelasyonun karesi olarakta kabul edilebilir.

$$MAC(\{\phi_r\}, \{\phi_s\}) = \frac{[\{\phi_r\}^{*t}\{\phi_s\}]^2}{(\{\phi_r\}^{*t}\{\phi_s\})(\{\phi_s\}^{*t}\{\phi_s\})} \quad (3.14)$$

İki karmaşık vektör aynı şekilde hareket eder ve doğrusal bir ilişkiye sahipse MAC değeri 1’e yakın olur. Bu iki vektör doğrusal olarak birbirinden bağımsızsa MAC değeri 0’a yakın olur. (Anonim, 2020)

3.2.7. Çekirdek Plakasının Sonlu Elemanlar Modeli

Mevcut çalışmada, sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ve modal analizin çözümünde Ansys 2023 R2 versiyonu kullanılmıştır. PCB’nin çekirdek plakasının sonlu elemanlar modeli Şekil 3.18’de görülmektedir.

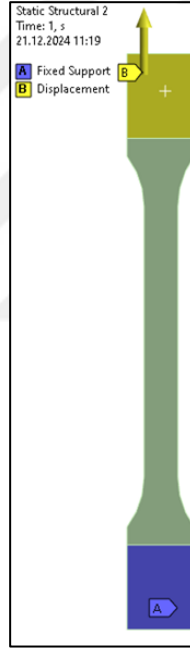


Şekil 3.18. Çekirdek plakası sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar modelinde çekirdek plaka 160 x 400 mm boyutlarında ve kalınlığı 4 mm olacak şekilde tanımlanmıştır. SE modelinde DMA ile aynı düğümüne sahip olması amacıyla ikinci dereceden (orta düğümleri mevcut) tuğla elemanlar (C3D20)

kullanılmıştır. Bu sebeple plaka 55 noktaya ayrılmıştır. Modal analiz oda sıcaklığında (23 °C) ve sınır şartları serbest bırakılarak çözdürülmüştür. Çalışmada yapılan çekme testi sonucunda elde edilen FR4 malzeme parametreleri çekirdek plakanın sonlu elemanlar modelinde kullanılmış ve malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Sonuçların çıktısı olarak yapının ilk altı rezonans modu istenmiştir.

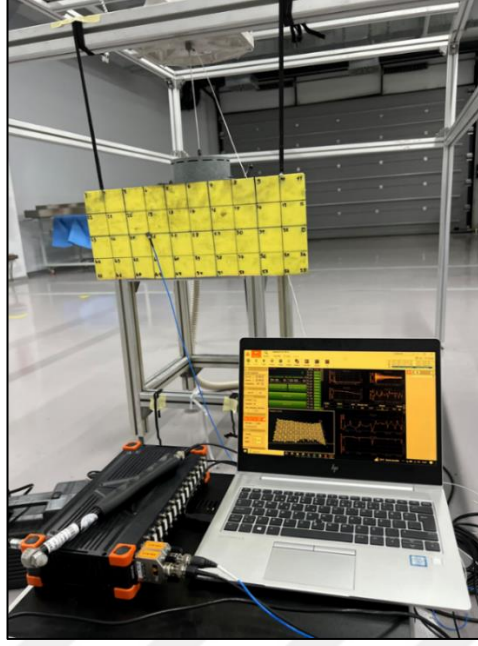
FR4 malzemesini sonlu elemanlar modelinde tanımlamak için 10 adet fiziksel çekme test numunesinden elastik modüllerinin ortalamaları alınmıştır. Çekme testi numunesinin sınır şartları Şekil 3.19’da verilmiştir. Üst kısımda kalan kırmızı sarı 2 mm deplasman ile çekilmiş ve alt tarafta kalan mavi yüzeyden ise sabitlenmiştir.



Şekil 3.19. Çekme numunesi sınır şartının gösterimi

3.2.8. Çekirdek Plakasının Çekiç Gezdirmeli Deneyisel Modal Analizi

Çalışmada PCB çekirdek malzemesi olan FR4 plakasının deneyisel modal analizinde sabit ivmeölçer ve hareketli çekiç kullanılmış ve test düzeneği Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



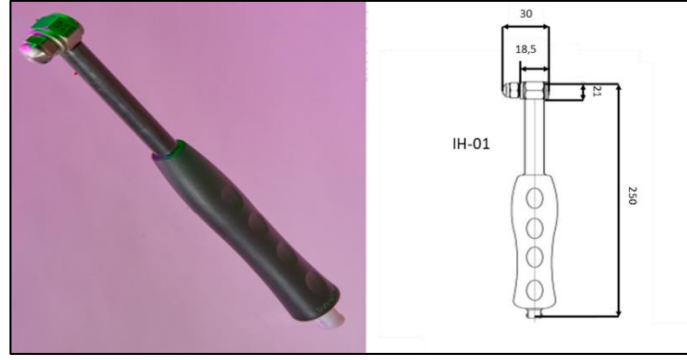
Şekil 3.20. Deneysel modal analiz test düzeneği

Şekil 3.20’de görüldüğü gibi 160 x 400 mm boyutlarında plaka eşit aralıklarla belirlenmiş 55 adet noktaya bölünmüş ve çekiç bu noktalara gezdirilerek vurulmuştur. Sabit olan ivmeölçerden veri toplayıcı araçlardan yararlanılarak sinyaller okunmuş ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Son olarak bilgisayar ortamında elde edilen verilerin frekans cevap fonksiyonu, tutarlılığı ve modal doğrulaması incelenmiştir. Çekiç gezdirmeli modal testte aşağıda verilen ekipmanlar kullanılmıştır.

3.2.8.1. Darbe Çekiç

Deneysel modal testte girdi sinyallerini oluşturan darbe çekici olarak Şekil 3.21’de görülen Instruments firmasının IH-01 isimli darbe çekici kullanılmıştır. Deneysel modal testinde kullanılan çekicinin başlıca özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Hasaasiyet : 25mV/N
- Ölçüm aralığı : 200N
- Çekic Ucu Ağırlığı : 28gr
- Çekic Ucu Tipleri : Naylon
- Toplam Çekiç Ağırlığı : 110g



Şekil 3.21. Darbe çekici ve ölçüleri

3.2.8.2. İvmeölçer

Test aşamasında çekiç ile tahrik edilmiş ivme sinyallerini ölçen ve tepkinin girdisi gibi çalışan PCB Pizotronics markasının 356A03 üç eksenli modeli IEPE/ICP tipi ivmeölçer kullanılmış ve Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. PCB pizotronics ivmeölçer

Deneyisel modal testinde kullanılan ivmeölçerin başlıca özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Hassasiyet: $x = 10,65 \text{ mV/g}$ $y = 9,90 \text{ mV/g}$ $z = 10,69 \text{ mV/g}$
- Geniş Bant Çözünürlüğü: $0,003 \text{ g rms}$
- Ölçüm aralığı: 500 g pk
- Frekans Aralığı: $2 \text{ ile } 8000 \text{ Hz}$ (y ve z eksen) $2 \text{ ile } 5000 \text{ Hz}$ (x eksen)
- Ağırlık: $1,13 \text{ gram}$

3.2.8.3. Modal Test Yazılımları

Deneysel modal test esnasında ivmeölçerin ölçtüğü sinyalleri bilgisayar ortamında incelenmesini sağlayan bazı yazılımlar kullanılmıştır. Darbe çekiç testinde FFT ve FRF grafiklerini elde edilmesinde Dewesoft X3 yazılımı kullanılmıştır.

Yapılan testin doğrulanması, karşılaştırılması ve modal güvence kriterinin hesaplanması amacıyla MEScope yazılımı kullanılmıştır.

3.2.8.4. Veri Toplama Sistemi

Çekiç ile tahrik edilen sinyallerin ve sonrasında ivmeölçer ile alınan ivme sinyallerinin uyumlu bir şekilde ölçülmesinde ve verilerin derlenmesinde Dewesoft markasının 16xSTGS veri toplama cihazı kullanılmış ve Şekil 3.23'te gösterilmiştir.

Veri toplama cihazının başlıca özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Analog Girişler: 16 kanallı
- Örnekleme Hızı: Eşzamanlı olarak 200kS/s
- Aralıklar: $\pm 10V, \pm 1V, \pm 100mV, \pm 10mV$
- Giriş Bağlantısı: DC
- Giriş Empedansı: 10 M Ω



Şekil 3.23. Dewesoft veri toplama cihazı

3.3. Devre Kartının Fiziksel Testi ve Sonlu Elemanlar Modeli

Ön veya arka aydınlatma sistemleri, araç yolda giderken çeşitli titreşimlere ve yüklere maruz kalmaktadır. Araçta oluşan yüklerin toplanması oldukça uzun sürmekle ve değişken olmakla birlikte genellikle endüstride bu yüklere eşdeğer olacak şekilde sinüs taraması veya rastgele titreşim analizi tercih edilir.

Otomotiv aydınlatma sistemlerinde arka aydınlatmada yanan LED ışık veya ışıklar, transistörler gibi elektronik komponentlerin çalışması ve etrafına ısı yayması nedeniyle devre kartı üzerinde bir gerilme oluşturur ve bu ön gerilme tasarım aşamasında hesaba katılır. Bu nedenle devre kartlarını sıcaklık ile oluşan gerilmeleri incelemek için termal mekanik açıdan incelenmesi önemlidir.

Bu çalışmada, PCB'nin sarsıcıda sinüs tarama verisi kullanılarak ve LED ışıklar açık haldeki koşulda fiziksel testi yapılmış ve sonlu elemanlar modeli oluşturularak sanal ortamda doğrulanması yapılmıştır. Hem test kurulumunda hemde sonlu elemanlar modelinde aynı yük ve sınır koşulları oluşturulmuştur.

3.3.1. Termal Mekanik Analiz

Çoğu katı malzeme ısıtıldığında genleşme ve soğutulduğunda büzülme eğilimindedir. Katı bir malzeme için sıcaklığa göre uzunluk değişiminin ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l * (T_f - T_0) \quad (3.15)$$

Yukarıdaki denklemde, l_0 ve l_f , sırasıyla, T_0 sıcaklığından T_f sıcaklığına geçiş sırasında başlangıç ve nihai uzunluk niceliklerini, α_l parametresi ise termal genleşmenin lineer katsayısını temsil eder. Bu katsayı, bir malzemenin ısıtma sırasında ne ölçüde genleştiğini gösterir ve $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ veya $(^{\circ}\text{F})^{-1}$ sıcaklık birimlerine sahip olduğu bilinen bir malzeme özelliğidir. Isıtma veya soğutma işlemi bir cismin tüm boyutlarını etkiler ve bunun sonucunda cismin hacminde bir değişiklik meydana gelir. Cismin sıcaklığa bağlı hacim değişimi şu şekilde hesaplanabilir:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v * \Delta T \quad (3.16)$$

Yukarıdaki denklemde ΔV ve V_0 , cismin hacim değişimi ve başlangıç hacimini temsil eder ve α_v , termal genişlemenin hacim katsayısı anlamına gelir. Çoğu malzemede α_v değeri anizotropiktir ve malzeme yapısına sahiptir. Termal genişlemenin izotropik olduğu malzeme yapıları için α_v yaklaşık $3\alpha_l$ 'dir.

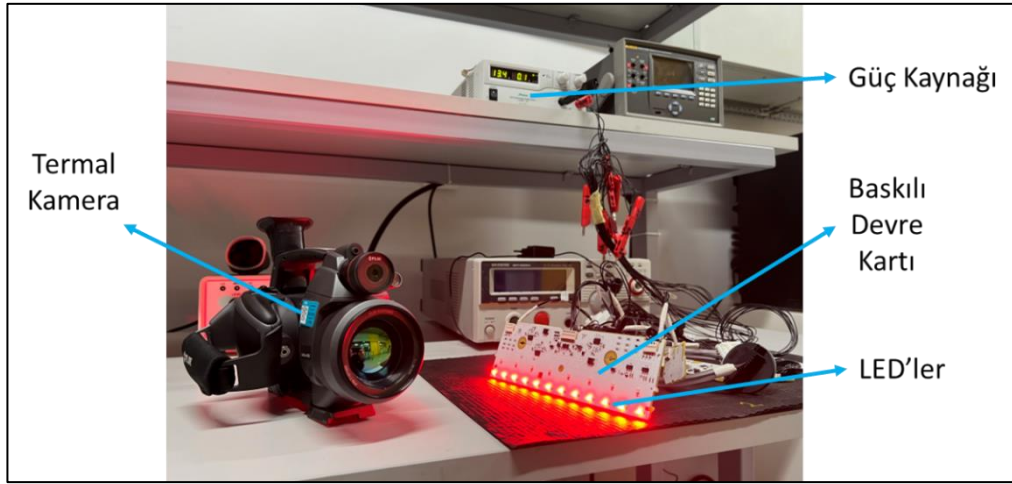
Termal gerilmeler, sıcaklık değişimlerinin bir sonucu olarak yapıda biriken gerilmelerdir. Termal gerilmelerin temelini ve doğasını anlamak çok önemlidir, çünkü bu tür gerilmeler hasara veya istenmeyen kalıcı deformasyona yol açabilir. Homojen bir katı cisim eşit olarak ısıtılır ve sonra soğutulursa, parçada serbest genişleme veya büzülme olacağı için gerilme olmayacaktır. Öte yandan, parçanın eksenel yöndeki hareketi rijit desteklerle sınırlanırsa, gövdede ısı gerilmeleri oluşur. T_0 'dan T_f 'ye sıcaklık değişiminden kaynaklanan bu gerilmelerin büyüklüğü:

$$\sigma = E * \alpha_l * (T_0 - T_f) = E * \alpha_l * \Delta T \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemde E , elastik modülünü ve α_l doğrusal termal genişleme katsayısını temsil etmektedir. Nihai sıcaklık, başlangıç sıcaklığından ($T_f > T_0$) büyükse, genişleme sınırlı olduğundan, gerilme sıkıştırıcı bir etki ($\sigma < 0$) uygular. Nihai sıcaklık, başlangıç sıcaklığından ($T_f < T_0$) düşükse, parçaya sıkıştırma gerilimi uygulanır ($\sigma > 0$). Ayrıca, parçayı sıkıştırmak (veya esnetmek) için gereken gerilim, denklem 3.17'deki $T_0 - T_f$ sıcaklıklarının değişmesiyle yapının serbestçe genişlemesine (veya büzülmesine) izin verdiğiyle aynıdır (Callister, 2007).

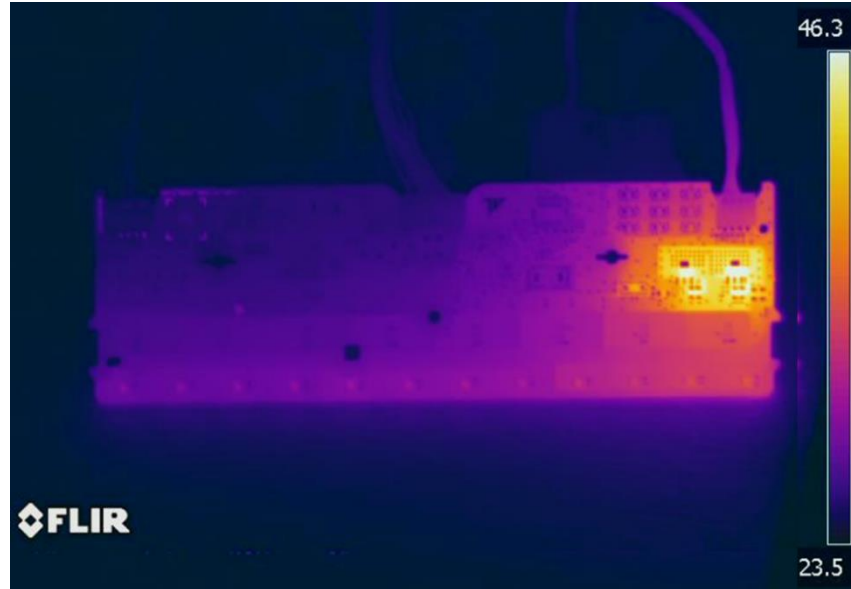
3.3.1.1. Termal Harita Ölçümü

Otomotiv aydınlatma sektöründe kullanılan baskılı devre kartlarının üzerindeki LED komponentlerin çalışma koşulu sırasında ısı oluşumu kart üzerinde ön gerilim oluşmasına neden olur. Bu nedenle baskılı devre kartları için sonlu eleman hesaplamalarında bu durumun dikkate alınması oldukça önemlidir.



Şekil 3.24. Termal kamera ölçüm sistemi

LED ışıklar çalışma koşulu altında PCB'nin yüzeyindeki sıcaklığı ölçmek için FLIR SC 620 termal kamera kullanıldı. PCB 13,5 Voltluk bir güç kaynağına bağlanılmış ve sıcaklık dağılımının stabil duruma gelmesi için LED ışıklar 30 dakika boyunca aydınlatılmıştır. Daha sonra termal kamera ile ölçüm yapılmıştır. Şekil 3.24'teki sistem kullanılarak PCB'nin yüzeyindeki sıcaklık ölçülmüş ve Şekil 3.25'teki gibi sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 3.25. Devre kartının termal harita görüntüsü

3.3.2. Devre Kartının Termal Mekanik Testi

Bu çalışmada otomobil arka aydınlatmada kullanılan PCB'nin, aydınlatma kaynaklı ön gerilmeleri dahil edecek bir şekilde sinüs tarama testi yapılmıştır.

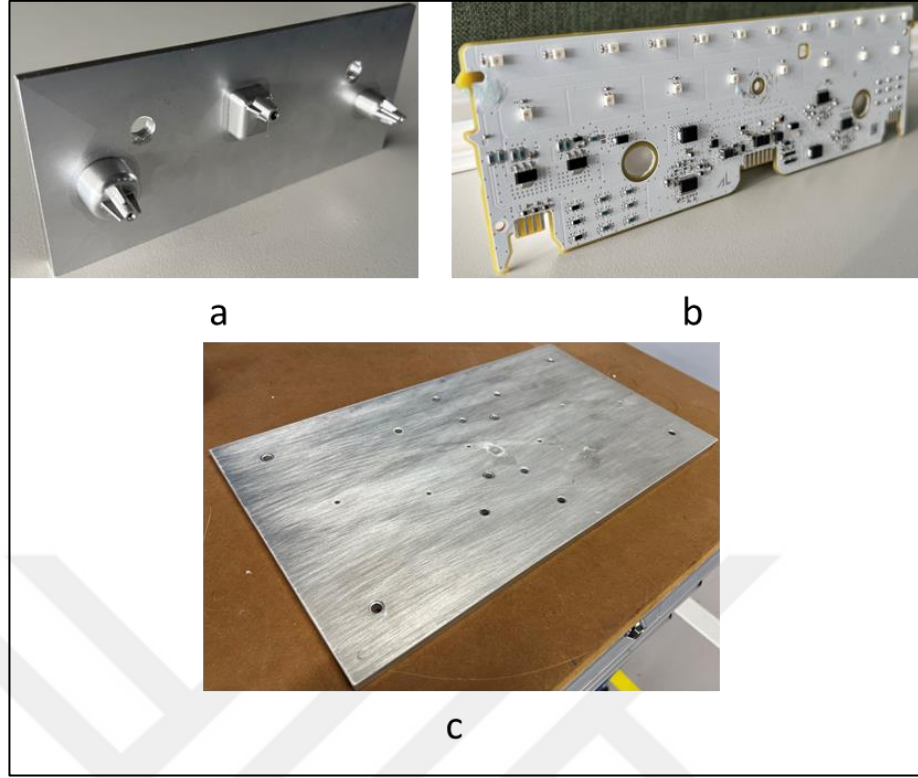
3.3.2.1. Sinüs Tarama Testi

PCB'nin dinamik karakteristiğini incelemek için Şekil 3.26'da gösterilen Dongling ES-20-320 model sarsıcı test makinesi kullanılarak sinüs tarama (sine sweep) testi yapılmış ve devre kartının frekans cevap fonksiyon eğrisi elde edilmiştir.

PCB'nin sarsıcıda testini yapabilmek amacıyla Şekil 3.27'de görülen fikstür ve test plakası tasarlanmış ve üretilmiştir.



Şekil 3.26. Sarsıcı test makinesi



Şekil 3.27. Test fikstürü (a) PCB (b) Test plakası (c)

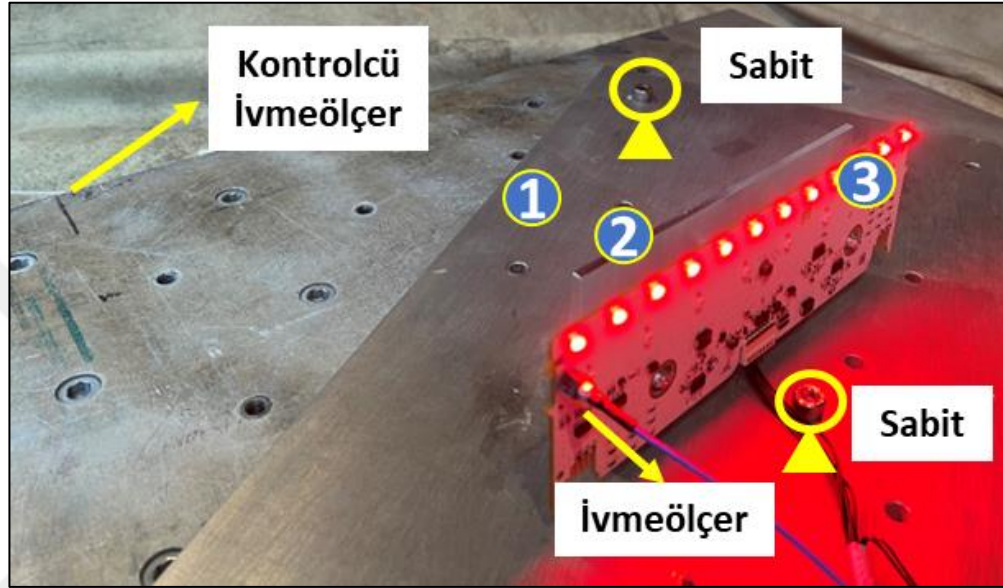
Devre kartı, ortasındaki delik ile fikstür arasında M3 vidayla fikstüre sabitlenmiştir. Fikstür ise alt tarafında yer alan iki adet M4 vidayla ise test plakasına bağlanmıştır. Plaka ile sarsıcı arasında Şekil 3.28’de görüldüğü gibi 2 adet M8 civata kullanılarak birbiri ile bağlantısı sağlanmıştır. Test oda sıcaklığında ve devre kartı üzerindeki LED aydınlatmalar açıkken yapılmıştır.

Şekil 3.28’de görüldüğü gibi sarsıcı plakaya verilen 1g ivme değerinin sürekliliğini kontrol etmek amacıyla kontrolcü ivme ölçer, devre kartı üzerindeki cevap ivme genliklerini ölçmek amacıyla ivmeölçer yerleştirilmiştir. Test sırasında taranan frekanslara karşılık gelen ivmeler kaydedilmiştir.

Yapılan sinüs tarama testinin parametreleri aşağıdaki gibidir:

- Sistemin tahrik edilen genlik değeri 1g olarak tanımlanmıştır.
- Test başlangıç frekansı 5 Hz, bitiş frekansı 500 Hz olarak tanımlanmıştır.

- Tarama aralığı saniyede 1 Hz ve lineer olarak tanımlanmış ve test 8 dakika 15 saniye sürmüştür.
- Şekil 3.28’de görüldüğü gibi tahrik edilen ivme değerini kontrol etmek için kontrolcü ivmeölçeri sarsıcı plakasına bağlanmıştır. Tahrik edilen ivme değerinin cevabını okumak için ivmeölçer PCB’nin üstüne bağlanmıştır.



Şekil 3.28. Sinüs tarama test sistemi

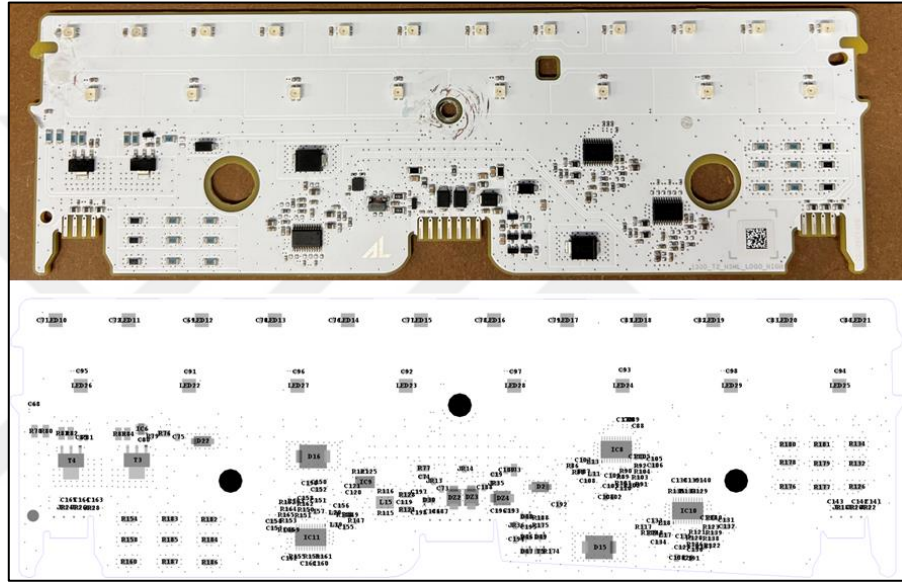
3.3.3. Devre Kartının Sonlu Elemanlar Modeli

PCB fiziksel test sonucunu sanal ortadanda doğrulamak için çeşitli sonlu elemanlar yazılımlarından yararlanılmıştır. Devre kartı üzerinde yer alan birçok komponenti, bağlantı elemanlarını ve bunların malzeme özelliklerini modellemek için “ANSYS Sherlock 2023 R2” yazılımı kullanıldı. PCB analizinin detaylı modellenmesi, çözümü ve çözüm sonrası yorumlanması için “ANSYS Mechanical 2023 R2” yazılımı kullanılmıştır.

3.3.3.1. Sherlock Yazılımı Kullanılarak Devre Kartının Modellenmesi

Sherlock, elektronik devre kartları için statik veya dinamik sonlu eleman analizleri yapan bir yazılımdır. Ayrıca elektronik devre kartlarının güvenilirlik ve dayanım analizleri yapılabilmektedir. Bu modül, otomotiv, havacılık ve diğer birçok alanda elektronik devre

kartlarının yapısal veya akış analizi için kullanılır. Elektronik devre kartları, transistörler, dirençler, kapasitörler, aydınlatma elemanları, diyotlar ve entegre devreler gibi çok çeşitli bileşenleri içerir. PCB üzerindeki çok sayıda bileşen, her bileşenin farklı malzemeleri ve dağılık konumları gibi faktörler, klasik sonlu elemanlar yazılımı ile modellemeyi çok zorlaştırır. Sherlock modülü, elektronik kart tasarımı için bileşen türleri, konumları ve malzemeleri dahil ederek işi çok daha kolaylaştırır ve zamandan tasarruf sağlar (McLesih, 2014).



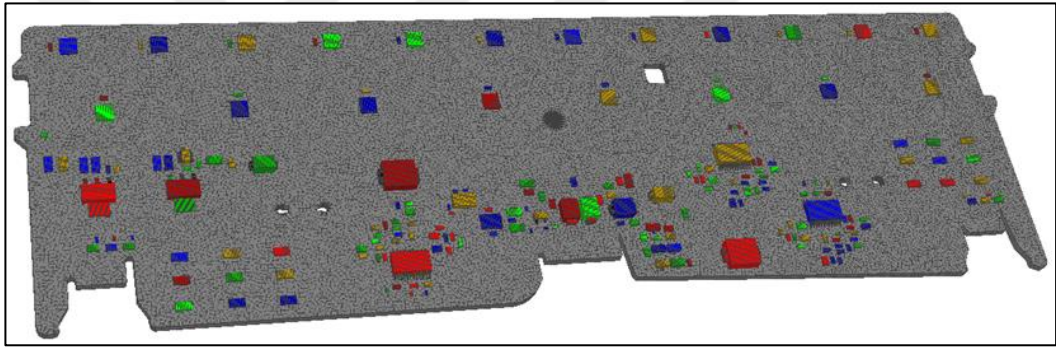
Şekil 3.29. Baskılı devre kartının (üst) Sherlock'a (alt) aktarımı

Öncelikle devre kartı tasarımı, Sherlock yazılım modülünün içine aktarılmış ve burada bazı tanımlamalar yapılmıştır. PCB'nin belirli özelliklerini içeren tasarımını Sherlock'a aktarmak, özellikle zaman tasarrufu bakımından çok verimli bir yöntemdir. Şekil 3.29'da görüldüğü gibi PCB tasarımını içe aktarılması komponent türü (kapasitör, transistör, direnç, diyot vb.), komponent konumu, komponent ve bağlantı uçlarının malzemeleri (elastik modül, yoğunluk, CTE, vb.), PCB katmanları gibi özellikleri içerir.

PCB'deki komponentler, yerel veya Sherlock'taki kitaplığa dayalı olarak malzeme güncellemesini gerektirir. Çalışmada, bileşenlerin boyutlarını, malzeme özelliklerini ve bağlantı tiplerini seçmek için yerel bir kütüphane güncellemesi yapılmıştır.

LED'lerin çalışır durumdayken (Şekil 3.25) alınan görüntüsü yazılımdaki termal harita işleme özelliği kullanılarak PCB'nin sıcaklık dağılımı “Ansys Mechanical” yazılımında kullanılmak üzere metin dosyası olarak dışarıya aktarılmıştır. Ayrıntılı eleman yapısının otomatik olarak oluşturulması, model sonucunun kesinliğini artırmış ve zamandan tasarruf sağlamıştır.

PCB çekirdeği, bakır kaplama (PCB üzerindeki iletken katman), montaj noktaları, açılan delikler ve PCB üzerindeki komponentler ve komponent ile PCB'yi birbirine bağlayan lehim uçlar ayrıntılı olarak modellenmiştir. Yazılımda PCB'nin çekirdek kısmında, komponentlerinde ve bağlantı uçlarında üç boyutlu tuğla elemanlar kullanılmıştır. Sherlock'ta oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli Şekil 3.30'da görülmektedir.



Şekil 3.30. PCB Sherlock SE Modeli

Sherlock sadece eşdeğer gerinim değeri verdiği ve sinüs tarama testi yapılamadığı için çözümü bu modülden almak mümkün değildir. Bu nedenle PCB sonlu elemanlar modeli çözümünde “Ansys Mechanical” çözücüsü kullanılmıştır.

PCB'nin Sherlock'tan “Ansys Mechanical” modülüne aktarılmasıyla birlikte ağ yapısı, ağ tipi, malzeme özellikleri, bağlantı ucunun tipi gibi özellikler de aktarılır. Dışa aktarım “.cdb” dosya tipinde olup aktarma parametreleri aşağıda listelenmiştir:

- **Ağ yapısı tipi:** Yapışık. Yapışık ağ tipi, komponentler arasında 0,1 mm'lik bir tolerans dahilinde temas sağlar. Yapışık ağ model tipi, devre kartı ve tüm komponentlerin ağ yapısının ayrı ayrı oluşturulduğu bir yöntem kullanır. Bu tür

ayrık ağ oluşturma, hem PCB hem de tüm komponentler için daha düzgün üç boyutlu elemanlar sağlar. Tüm üç boyutlu elemanlar oluşturulduktan sonra Sherlock, her bir komponentin elemanları ile karşılık gelen PCB elemanları arasında kısıtlama denklemleri oluşturarak komponentleri otomatik olarak PCB'ye "yapıştırır". Uniform üç boyutlu elemanlar sonuçların doğruluğunu arttırabilir, ancak ek bağları tanımlamak için gereken kısıtlamalar analiz süresini artırır. Yapışık ağ yapısı yöntemi ayrıca daha karmaşık modellerin oluşturulmasına da olanak sağlar (Anonim, 2022c).

- **PCB Model:** Katmanlı model gibi yalnızca belirli bir PCB katmanını kapsayan elemanlar oluşturur, ancak elemanın kapsadığı malzemelere dayalı olarak her bir elemana ayrı malzeme özellikleri atar. Her katman için tanımlanan elemanlar, sonlu elemanlar modelinde yüzey bağlantılarına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak, üst ve alt katmanlardaki elemanlarla düğümleri paylaşır (Anonim, 2022d).
- **Eleman derecesi:** İkinci derece. İkinci dereceden elemanlar (yani, 20 düğümlü tuğlalar), analiz sonucunun kesinliğini arttırmasına kıyasla analiz sürelerinin uzamasına neden olur.

3.3.3.2. Ansys Mechanical Yazılımı Kullanılarak Devre Kartının Analiz Çözümü

PCB'nin modal frekanslarını ve frekans cevap fonksiyonlarını elde etmek için devre kartının modal analizi ve ardından sinüs tarama analizi yapılması gerekmektedir. Bu analizler için komponentlerin malzeme özellikleri ve sınır koşulları tanımlanmalıdır.

Sherlock yazılımından “.cdb” formatında dışa aktarılan PCB tasarımı Ansys Workbench'te içe aktarılır. Modelde her bir komponentin malzemeleri ile ilgili özellikleri yerel kütüphaneden tanımlı olarak gelmektedir ve Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te görülmektedir. FR4 malzemesinin X ve Y yönlerindeki elastik modülleri çekme testi ile elde edilmiş ve yoğunluğu ölçülmüştür. Çizelge 3.1'deki diğer FR4 malzeme özellikleri Amalu ve ark. (2012) yaptığı çalışmasından alınmıştır.

Çizelge 3.1. FR4 Malzemesinin özellikleri

Özellik	Sembol	Birim	Değer
Yoğunluk	ρ	g/cm ³	1,9
Isıl Genleşme Katsayısı	α_x	E-05 °C ⁻¹	1,4
	α_y	E-05 °C ⁻¹	1,4
	α_z	E-05 °C ⁻¹	1,5
	E_x	GPa	25,7
Elastik Modülü	E_y	GPa	23,9
	E_z	GPa	22
	ν_{xy}	-	0,17
Poisson Oranı	ν_{yz}	-	0,2
	ν_{zx}	-	0,17
	G_{xy}	GPa	27
Kesme Modülü	G_{yz}	GPa	22
	G_{zx}	GPa	27

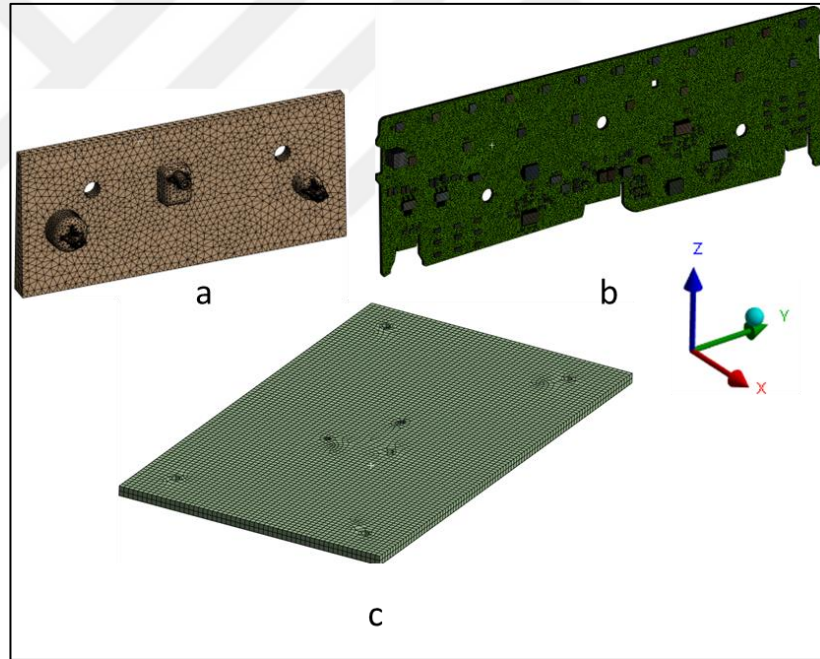
Çizelge 3.2. Elektronik komponentlerin malzeme özellikler

Özellik	Sembol	Birim	Komponent	Değer
Yoğunluk	ρ	g/cm ³	Transistör	3,15
			Entegre Devre	2,62
			Diyot	2,83
			Resistör, Kapasitör	3,65
Isıl Genleşme Katsayısı	α	E-05 °C ⁻¹	Transistör	1,3
			Entegre Devre	1,22
			Diyot	1,31
			Resistör, Kapasitör	0,68
Elastik Modülü	E	GPa	Transistör	50,6
			Entegre Devre	35,6
			Diyot	44,4
			Resistör, Kapasitör	300
Poisson Oranı	ν	-	Transistör	0,29
			Entegre Devre	0,29
			Diyot	0,29
			Resistör, Kapasitör	0,21
Kesme Modülü	G	GPa	Transistör	19,5
			Entegre Devre	17
			Diyot	17,1
			Resistör, Kapasitör	123,9

Çizelge 3.3. Bakır katmanların ve bağlantı uçlarının malzeme özellikleri

Özellik	Sembol	Birim	Değer
Yoğunluk	ρ	g/cm^3	7,44
Isıl Genleşme Katsayısı	α	$\text{E-05 } ^\circ\text{C}^{-1}$	2,42
Elastik Modülü	E	GPa	90,5
Poisson Oranı	ν	-	0,15
Kesme Modülü	G	GPa	39,3
Akma Gerilmesi	σ	MPa	280

Sherlock'ta oluşturulan PCB sonlu elemanlar modeli Ansys Workbench'e aktarılmıştır. Sonlu elemanlar modelini sinüs tarama test düzeneğine birebir uyarlamak için sonlu elemanlar modelinde PCB, fikstür ve test plakası Şekil 3.31'deki gibi ayrı ayrı oluşturulmuştur.

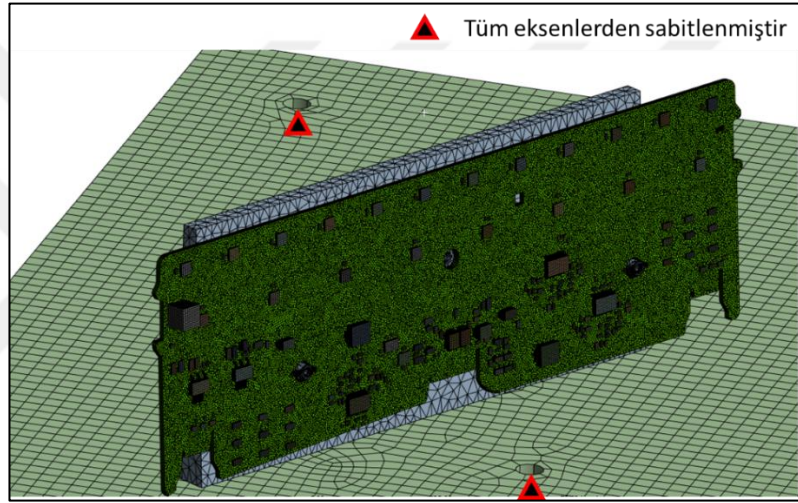


Şekil 3.31. Sonlu elemanlar modeli (a) Test fikstürü (b) PCB (c) Test plakası

SE modelinde kullanılan her bir bileşenin eleman dereceleri, boyutları ve tipleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Çalışmada bağlantı uçları incelendiği için özellikle küçük eleman boyutları ve ikinci dereceden elemanlar kullanılmıştır.

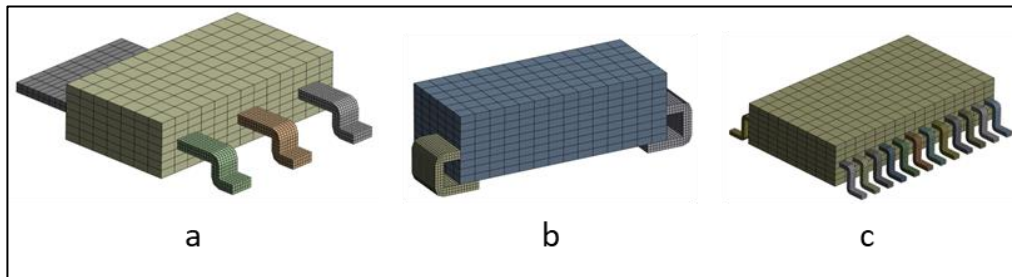
Çizelge 3.4. SE modelinde kullanılan elemanların özellikleri

Komponent	Eleman Derecesi	Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Eleman Tipi
PCB Katmanları ve Elektronik Komponentler	2	0,75	326431	1314794	C3D20
Fikstür	2	2	32565	56835	C3D10
Test Plakası	1	5	10858	61065	C3D8
Bağlantı Uçları	2	0,1	23025	132197	C3D20



Şekil 3.32. PCB Ansys Mechanical sonlu elemanlar modeli

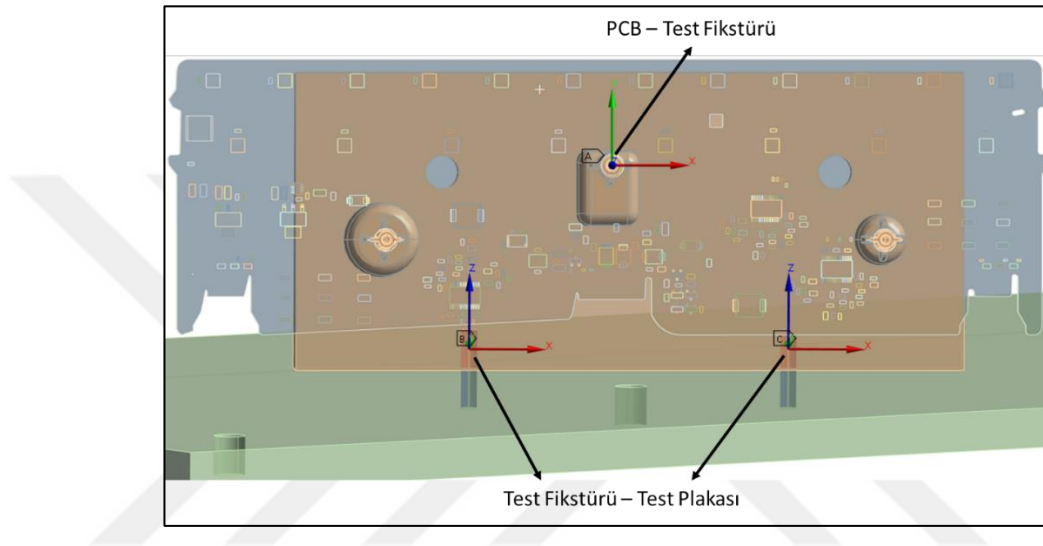
Sonlu elemanlar modeli, toplam 392879 elemandan ve 1564891 düğümden oluşmakta ve Şekil 3.32’de görülmektedir. Oluşturulan her bir elektronik komponentlerin ve lehim bağlantı uçlarının modelleri Şekil 3.33’de görülmektedir.



Şekil 3.33. Bağlantı uçları (a) Transistör (b) Diyot (Kesit alınmış) (c) Entegre devre

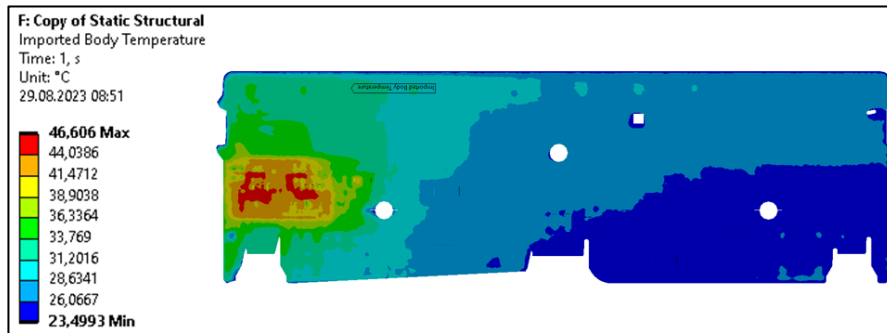
Test plakası, sarsıcıya iki adet M8 cıvatayla bağlandığından dolayı modelde Şekil 3.34’te görüldüğü gibi iki adet cıvata deliğinden tüm eksenlerde sabitlenmiştir.

Test fikstürü ile PCB arasında M3 vida bağlantısını, test fikstürü ile test plakası arasında ise M4 vida bağlantılarını temsilen Şekil 3.34’te görüldüğü gibi tüm yönlerde sabit bağlantıları oluşturulmuştur



Şekil 3.34. PCB, test fikstürü ve test plakasının bağlantıları

PCB’nin sinüs tarama testi LED ışıklar açık durumda yapıldığı için kart üzerinde belirli bir sıcaklık dağılımı oluşmaktadır ve analizin doğruluğu için modele dahil edilmelidir. Termal kamera ile elde edilen bu dağılım Şekil 3.35’te görüldüğü gibi sonlu elemanlar modeline “Imported Load” olarak dahil edilmiştir.



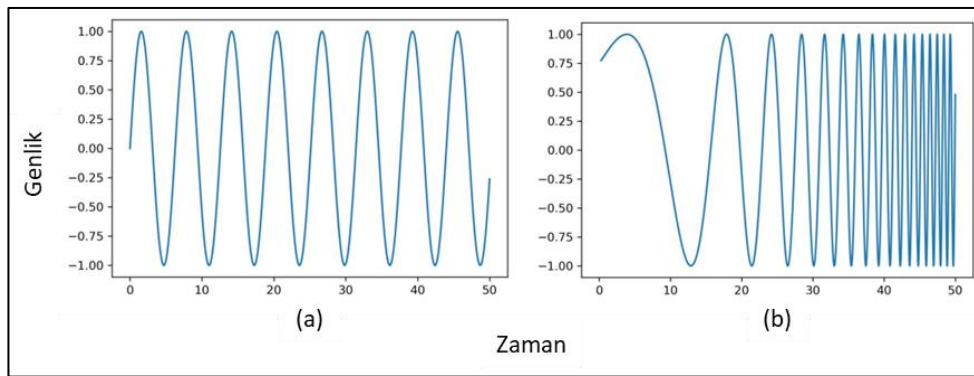
Şekil 3.35. PCB SE modelinin sıcaklık dağılımı

Şekil 3.35'teki PCB üzerindeki sıcaklık dağılımı modele dahil edilerek yük koşulu olarak kullanılmıştır. Bu sayede modal analiz çözdürülürken bu sıcaklık farkından kaynaklı değişimler modele dahil edilmiştir.

Sherlock yazılımından Ansys Mechanical'a aktarılan modeldeki komponentler birbirlerine temas halde gelir fakat komponentler arasında herhangi bir ilişki bulunmaz. Bu nedenle tüm komponentler arasında 0,1 mm boşluk tolerans ile birbirlerine yapışık temas yüzeyleri oluşturulmuştur. Elektronik komponentlerin bağlantı ayakları yüzey montaj teknolojisi kullanılarak PCB'ye bağlantısı oluşturulur. Bu teknolojiye öncelikle PCB bakır katmanın üstüne macun sürülür ve elektronik komponent bağlantı ayaklarıyla birlikte buraya oturtulur, ardından yüksek sıcaklıktaki fırınlarda bu birleşim birbirlerine karışarak bütün olur. Bu sebeple sonlu elemanlar modelinde bu iki parça arasındaki yüzeyler yapışık kabul edilmiştir. Sonlu elemanlar analizini yapabilmek için öncelikle PCB modelinin modal analizi çözdürülmüş ve sistemin modları çıktı olarak istenmiştir.

3.3.3.2.1. Sinüs Tarama Analizi

Sinüs tarama analizinde, bir sisteme (örneğin mekanik bir bileşen) sinüsoidal bir salınım uygulanır. Salınımın frekansı minimum bir değerden maksimum değere kadar sürekli artırılır. Şekil 3.36'da örnek sinüs sinyali ve sinüs tarama şekli görülmektedir.



Şekil 3.36. Sinüs sinyali (a) Sinüs taraması (b)

Sinüs taramasında bileşenler rezonans frekanslarına duyarlı tepki verirler. Rezonans, otomobillerde veya diğer cihazlarda bileşenlerin hasar görmesine veya tahrip olmasına

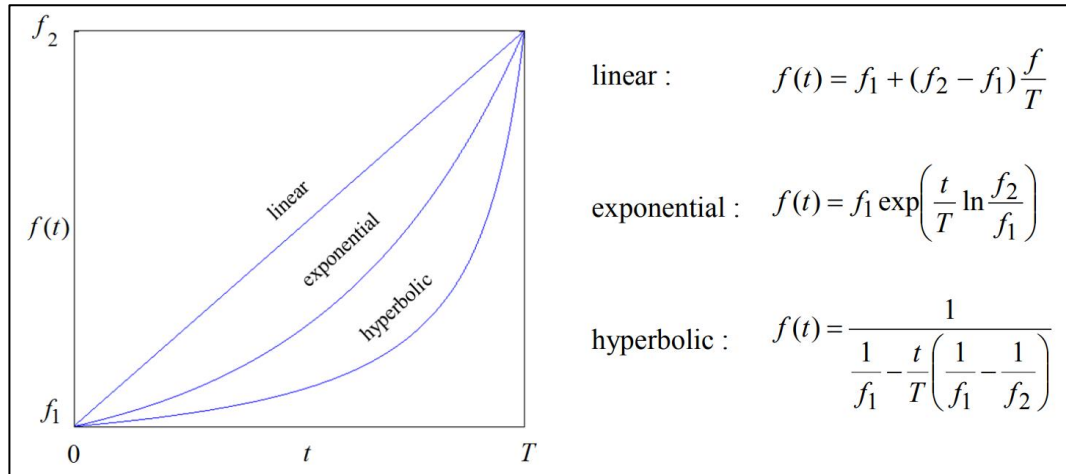
neden olarak güvenlik tehlikesi oluşturabilir. Bu nedenle rezonanslardan kaçınmak gereklidir.

Sinüs taraması rezonans frekanslarını test etmek için basit bir yöntemdir. Bu yöntemde test etmek istenilen sistem sinüzoidal bir sinyalle uyarılır. Sinüs taraması birçok farklı frekanstan sürekli olarak geçtiği için rezonansların algılanmasını mümkün kılmaktadır. Bu nedenle sinüs tarama analizi yapısal analiz testleri için oldukça önemli bir araç haline gelir.

Birim genliğin sinüs tarama uyarımı denklem 3.18 kullanılarak tanımlanabilir. Denklemden $f(t)$, spesifik tarama tipine bağlı olan anlık frekanstır.

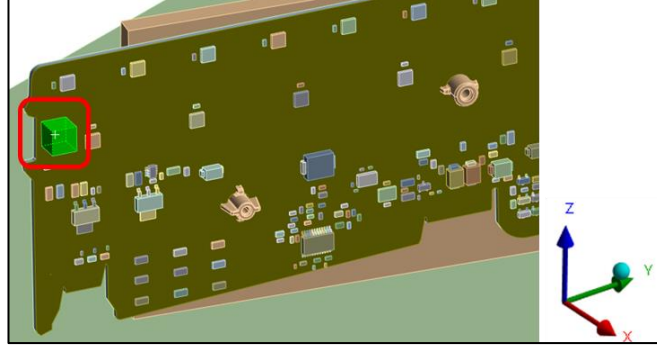
$$\ddot{u}(t) = \sin \left[2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau \right] \quad (3.18)$$

En yaygın üç sinüs tarama türü doğrusal, üstel ve hiperboliktir. Bu tiplerin frekans fonksiyonları $f(t)$ Şekil 3.37’de çizilmiş ve tanımlanmıştır (Roy, 2018).



Şekil 3.37. Sinüs tarama türleri

Çalışmada PCB rezonans frekans cevaplarını elde etmek amacıyla sinüs tarama analizinde 5 Hz ile 500 Hz frekansları arasında 495 adet çözüm aralığı alınmış, +X yönünde 1g ivme ile sistem uyarılmıştır.

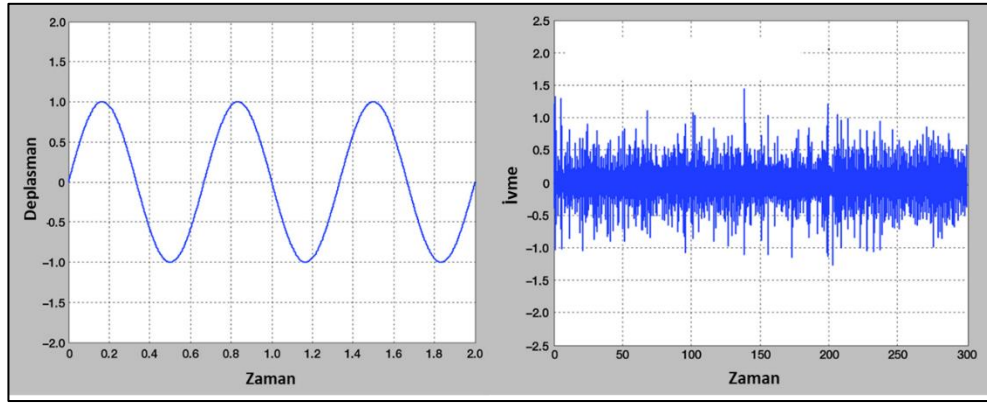


Şekil 3.38. Sinüs tarama SE analizinde kullanılan ivmeölçer ve eksen takımı

Lineer sinüs tarama tipi kullanılmış ve cevap olarak Şekil 3.38'deki ivmeölçerden X yönündeki genlik ve rezonans frekansları alınmıştır.

3.3.3.2.2. Rastgele Titreşim Analizi

Titreşimler, dinamik bir sistemin denge durumunda meydana gelen salınımlardır. Titreşimler, profillerine veya tiplerine bağlı olarak “deterministik” veya “rastgele” olarak sınıflandırılabilir. Periyodik titreşimin tek frekanslı çok özel bir şekli olan harmonik titreşimlerde, zaman sabit bir periyotta kendini tekrar eder. Bu nedenle, sinüzoidal veya harmonik titreşim yalnızca tek bir baskın frekans içerir. Rastgele titreşimler ise, belirli bir zamandaki genliği tam olarak öngörülemeyen ve tahmin edilemeyen titreşimlerdir. Farklı genliklere, frekanslara ve fazlara sahip birçok farklı sinüzoidal titreşim profilinin kombinasyonu olarak görselleştirilebilirler. Böylece rastgele titreşimler, fiziksel çalışma koşullarını daha gerçekçi bir şekilde simüle eder ve zengin frekans içerikleri sayesinde sinüzoidal veya tek frekanslı uyarımın aksine, bir yapıda birden fazla rezonans frekansını aynı anda uyurabilir ve daha hassas yapısal teşhisi sağlar. Şekil 3.39'da sinüzoidal ve rastgele bir titreşim sinyalinin örnekleri gösterilmiştir.



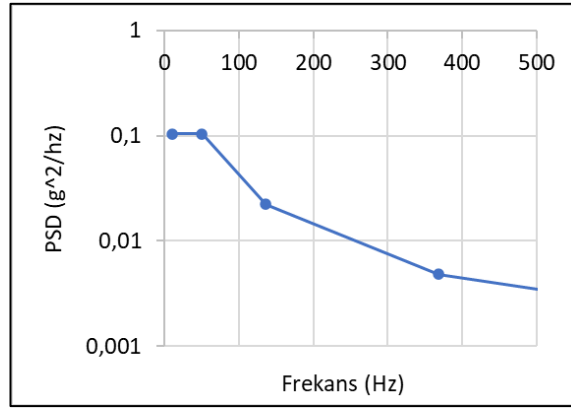
Şekil 3.39. Harmonik (sol) ve rastgele (sağ) titreşim sinyal örnekleri (Anonim,2012)

Araç yoldayken ön veya arka aydınlatma sistemleri çeşitli titreşimlere ve yüklere maruz kalır. Araç üzerindeki yüklerin toplanması çok uzun zaman alsa da endüstride genellikle daha kısa sürede eşdeğer hasar oluşturan rastgele titreşim analizi tercih edilmektedir. Rastgele sinyaller titreşimin şiddeti hakkında genel bir bakış sunar. Ancak titreşimin yapı üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için bu titreşimin frekans spektrumunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu spektrumlar, rastgele titreşimleri tanımlamak için ideal bir araç olan güç spektral yoğunluğu (PSD) kullanılarak elde edilir (Lalanne, 2014).

Güç spektral yoğunlukları (PSD) zamana bağlı sinyalin hızlı fourier dönüşümü (FFT) yöntemiyle frekans alanına dönüştürülüp, karesi alınarak ifade edilir ve birimi ölçülen verinin frekansa bağlı karesi olarak ifade edilir. Eğer ölçülen birim ivme ise PSD birimi “ G^2/Hz ” olur ve denklem 3.19 ile gösterilir. Denklemden N, örnekleme sayısı, S, örnekleme oranını, df ise PSD verisinin çözünürlüğünü ifade etmektedir (Xu, 2016).

$$PSD_{genlik} = (FFT_{genlik})^2 * \frac{1}{df}, \quad df = \frac{S}{N} \quad (3.19)$$

Bu çalışmanın deneysel tasarım kısmında PCB yorulma ömrünü hesaplamak için rastgele titreşim analizi kullanılmıştır. PCB’nin sonlu elemanlar analizinde literatür (Samavatian ve ark., 2018) çalışmasında bahsedildiği gibi en zorlayıcı eksen, devre kartına dik eksen (X eksen) Şekil 3.40’taki PSD profili kullanılmıştır.



Şekil 3.40. Deneysel tasarımda PCB yorulma ömrü hesaplamada kullanılan PSD eğrisi

3.3.3.2.3. Bağlantı Uçlarındaki Yorulmanın Hesaplanması

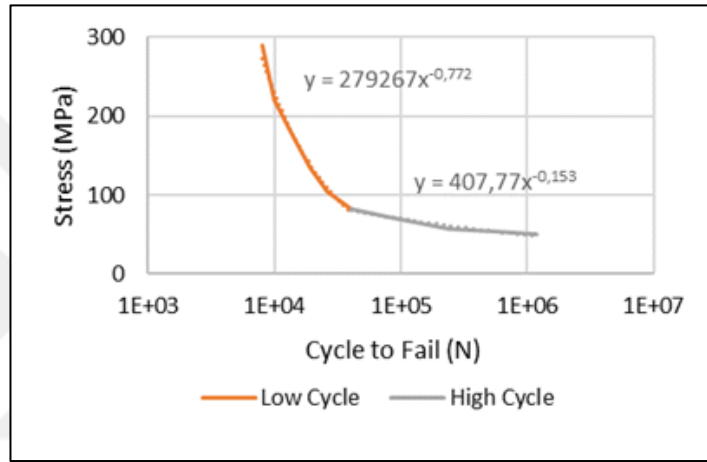
Çalışmada, deneysel tasarımda yanıt fonksiyonu olarak belirlenen PCB ile komponentlerini birbirine bağlayan bağlantı uçlarında oluşan yorulma hasarını hesaplamak için “Miner's Cumulative Damage Ratio” ve “Three-Band Technique” kullanılmıştır. İlk adım, bir yorulma hasarı oluşturmak için gereken gerilme döngüsü sayısını belirlemektir. Bağlantı ucu herhangi bir kaynak olmadan yapının diğer kısımlarına bağlandığında, hesaplanan alternatif gerilmenin konsantrasyon etkileri hesaba katması gerekir. Gerilme konsantrasyon faktörü K, gerilim denkleminde veya alternatif gerilimler için S-N yorulma eğrisinin b eğiminin tanımlanmasında kullanılabilir. Gerilme konsantrasyonu her iki yerde de yalnızca bir kez kullanılmalıdır. 1σ , 2σ ve 3σ gerilimlerinde bir yorulma hasarı oluşturmak için gereken N_1 gerilim çevrimlerinin yaklaşık sayısı aşağıdaki denklemden elde edilebilir:

$$\sum_{x=1}^3 x_{\sigma} * N_1 = N_2 * \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^k \quad (3.20)$$

“Miner's Cumulative Damage Ratio”, gerilme döngüsünün sinüzoidal titreşim, rastgele titreşim, şok veya akustik gürültüden kaynaklanıp kaynaklanmadığına bakılmaksızın her gerilme döngüsünün bir yapının yorulma ömrünün bir kısmını kullandığı fikrine dayanmaktadır (Santosh, 2008). “Miner's Cumulative Damage Ratio” hesaplaması aşağıdaki gibidir:

$$R_i = \sum_i^n \frac{n_i}{N_i} \quad (3.21)$$

Şekil 3.40'daki PSD profili 28800 saniye (8 saat) süreyle çözülmüş ve her sigma değeri için denklem 3.20'ten hesaplanan yorulma ömrünün tersi alınarak yapıda biriken hasar hesaplanmıştır. Bakır bağlantı uçlarında düşük çevrimli yorulma ve yüksek çevrimli yorulma olarak çift doğrusal S-N eğrisi kullanılmış ve Şekil 3.41'de verilmiştir (Harlow, 2023).



Şekil 3.41. Bakır bağlantı uçlarının çift doğrusal S-N eğrisi

Oluşturulan arayüzde bakır bağlantı uçların yorulma hasarlarını hesaplamak için öncelikle Ansys Mechanical yazılımında malzeme yorulma eğrisi tanımlanmıştır. Çift doğrusal S-N eğrisi tanımlamak için yazılıma Çizelge 3.5'te verilen parametreler girilmiştir.

Çizelge 3.5. Ansys Mechanical'da kullanılan çift doğrusal S-N parametreleri

A	First Fatigue Strength Coefficient	6,81E+14
m	First Fatigue Strength Exponent	1,29591212
C	Second Fatigue Strength Coefficient	1,82E+56
r	Second Fatigue Strength Exponent	6,534037499

Oluşturulan arayüzde bakır bağlantı uçlarındaki hasar hesaplanırken:

- Öncelikle elektronik komponentin pozisyonuna göre yüzey cevap denklemleri kullanılarak bağlantı uçlarında oluşan maksimum gerilme hesaplanır.
- İkinci adımda bağlantı uçlarının hangi çevrimde hasara uğrayacakları hesaplanır. Bu hesaplama sırasında 1σ , 2σ ve 3σ için 3.20 numaralı denklem kullanılarak her bir σ değeri için hasarın oluşacağı “ N_i ” çevrim sayıları belirlenir. Elde edilen bu değerler, düşük ve yüksek çevrim sayıları açısından ayrı ayrı değerlendirilir.
- Üçüncü adımda her bir 1σ , 2σ , 3σ değerleri ve 500 Hz’e kadar olan doğal frekanslar kullanılarak 8 saatlik PSD verisi için “ n_i ” çevrim sayısı hesaplanır.
- Dördüncü adımda 3.21 numaralı denklem kullanılarak her bir doğal frekanslar için bakır uçlarda oluşan hasarlar hesaplanır. Bu hasar değerleri hesaplanırken her bir doğal frekansların tüm sisteme olan etkileri (effective mass) dahil edilmiştir. Son olarak her bir doğal frekans için hesaplanan hasarlar toplanarak toplam hasar elde edilir.

3.4. Devre Kartının Deneysel Tasarımı ve Kullanıcı Arayüzü Oluşturma

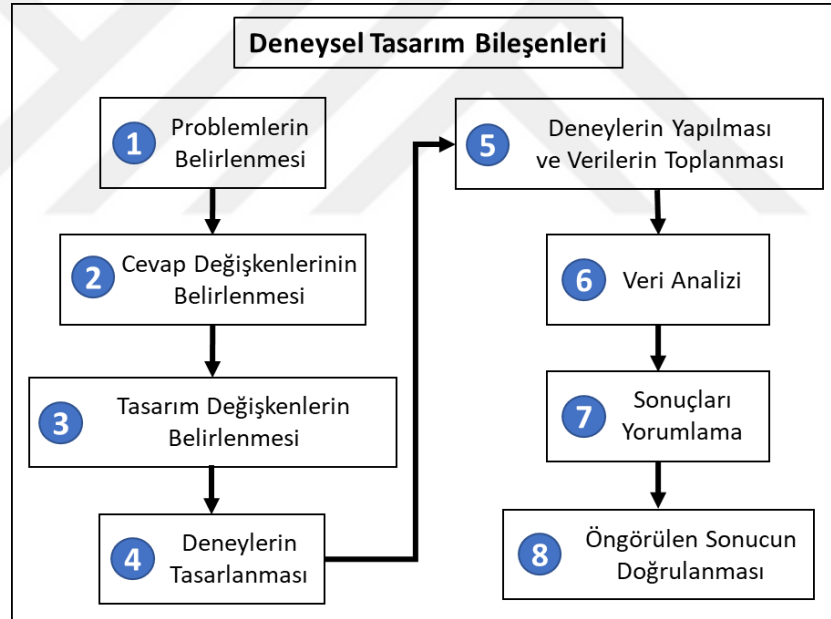
Sanal prototipleme sürecinde bilgisayar destekli mühendislik tabanlı optimizasyonların gerçek dünya uygulamalarında, fiziksel modellerin karmaşıklığını azaltmak ve hızlı çözülebilen sayısal modeller elde etmek her zaman mümkün olmamaktadır. Tipik olarak her sayısal simülasyon saatler hatta günler alır (McLeish, 2014). Sonuç olarak verimli meta modeller maliyetli tasarım çalışmalarına alternatif haline gelmektedir. Soruna en uygun meta modelin seçiminde otomatikleştirilmiş bir yaklaşım sağlamanın yanı sıra, metamodelin prognostik kalitesini değerlendirmek için bağımsız bir test veri seti kullanılmalıdır. Bu nedenle, en iyi prognoz kalitesine sahip seçilen metamodele optimize prognozun meta modeli (MoP) adı verilir. Gelişmiş filtreleme deneysel tasarım teknikleri kullanılarak değişken uzayın otomatik olarak küçültülmesiyle yüksek boyutlu problemlere de etkin bir yaklaşım sağlanmaktadır (Most, 2009).

Deneysel tasarım (DoE), bir parametrenin veya parametre grubunun değerini kontrol eden faktörleri değerlendirmek için kontrollü testleri planlama, yürütme, analiz etme ve

yorumlama ile ilgilenen uygulamalı istatistiklerin bir dalı olarak tanımlanır. DoE, çeşitli deneysel durumlarda kullanılabilen güçlü bir veri toplama ve analiz aracıdır (Andrea, 2008).

İstenen bir çıktı (cevap) üzerindeki etkilerini belirleyerek birden fazla tasarım değişkeni faktörünün manipüle edilmesine izin verir. DoE, birden çok tasarım girdisini aynı anda manipüle ederek, her seferinde tasarım girdilerini değiştirerek gözden kaçabilecek önemli etkileşimleri belirleyebilir.

Deney tasarımı problemlerin tanımlanması, deneyin amaçlarının, değişkenlerinin ve kısıtlamalarının dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerekir ve Şekil 3.42'deki deneysel tasarım bileşenleri adımları izlenir.



Şekil 3.42. Deneysel tasarım bileşenleri

3.4.1. Deneysel Tasarım Bileşenleri

Deneysel tasarımda bir problem, deneysel tasarım tarafından ele alınabilecek şekilde açıkça tanımlanmalı ve ifade edilmelidir. Dikkatli planlama ve ayrıntılara verilen önem, deneysel tasarımdaki tehlikelerden kaçınılmasına yardımcı olur. Çoğu durumda, deney yapmak için sınırlı kaynaklar mevcuttur ve minimum sayıda çalıştırma yaparak en iyi

sonuçları almak istenmektedir. Bu nedenle problem, deney amacını önemli ölçüde etkileyebilecek potansiyel faktörler göz önüne alınarak net bir şekilde anlaşılmalı ve belirlenmelidir.

Bir deney tasarımıdaki cevap değişkeni, bağımsız tasarım değişkenin manipülasyonuna cevap olarak ölçülen veya gözlenen değişkendir. Başka bir deyişle, deneyin ölçmeye çalıştığı sonuç veya etkidir. Bir deney tasarımıda cevap değişkenini tanımlamak için öncelikle problemin veya hipotezin belirlenmesi gerekir.

Tasarım değişkenleri, cevap değişkeni üzerindeki etkilerini araştırmak için bir deney tasarımı (DoE) çalışmasında manipüle edilen veya değiştirilen faktörler veya değişkenlerdir. Tasarım değişkenleri, deneyin bağımsız değişkenleri, faktörleri veya girdileri olarak da adlandırılır. Bir DoE çalışmasında tasarım değişkenlerini tanımlamak için faktörlerin tanımlanması ve düzeylerin belirlenmesi gibi bazı yönergeler yer alır. Faktörlerin tanımlanması, cevap değişkeni üzerinde etkisi olması beklenen faktörlerin veya değişkenlerin tanımlanmasını içerir. Düzeylerin belirlenmesi ise çalışmada incelenecek her bir tasarım değişkenin aralığını veya düzeylerini belirlenmesini içermektedir.

Deneylerin tasarımında kullanılan tam faktöriyel, kesirli faktöriyel, cevap yüzeyi ve taguchi tasarımları gibi çeşitli deneysel tasarım türleri vardır. Faktör sayısına, mevcut kaynaklara ve deneyin amaçlarına göre en uygun tasarımı seçilir ve deney tasarımı gerçekleştirilir.

Deneylerin yürütülmesinde deneyler plana göre yapılır ve veriler kaydedilir. Kaydedilen verilerin tasarım değişkenlerinin cevaplar üzerindeki etkilerini belirlemek için istatistiksel metotlar kullanılarak veriler analiz edilir. Tasarım değişkenleri arasındaki etkileşimleri ve her cevap için en uygun ayarlar tanımlanır.

Deneysel sonuçların yorumlanması, istatistiksel anlamlılık, etki büyüklüğü ve verilerdeki modeller dahil olmak üzere birçok faktörün dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir. İstatistiksel anlamlılık, gruplar arasında gözlenen farklılıkların şans eseri

olmama olasılığının bir ölçüsüdür. Deneysel tasarımdaki istatistiksel anlamlılığı belirlemek için genellikle ANOVA (Varyans Analizi) veya regresyon analizi gibi istatistiksel yöntemler kullanılır.

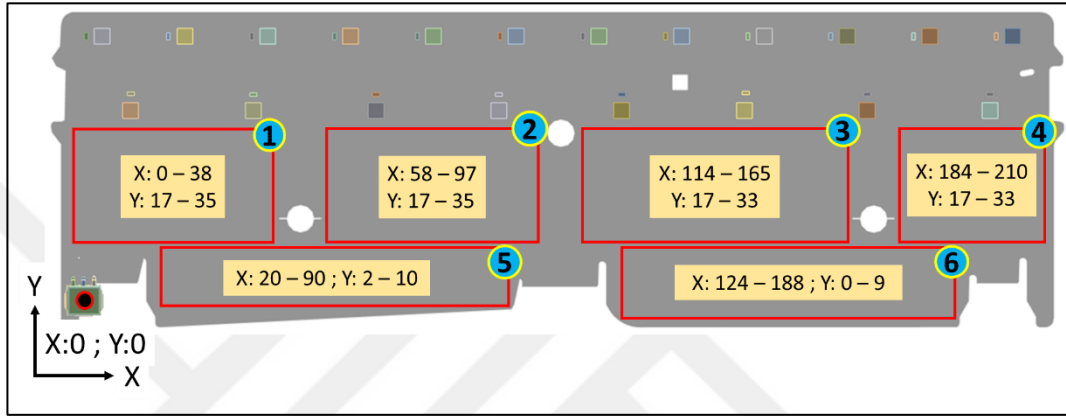
Etki büyüklüğü, bir ilişkinin büyüklüğünü veya değişkenler arasındaki farkı ifade eden istatistiksel bir kavramdır. Deney tasarımında önemli bir husustur çünkü araştırmacıların önemli bir etkiyi tespit etmek için gereken örneklem büyüklüğünü belirlemesine yardımcı olur. Genel olarak, etki büyüklüğü deneysel tasarımda önemli bir husustur çünkü araştırmacıların anlamlı etkileri tespit etmek için gereken uygun örneklem büyüklüğünü ve istatistiksel gücü belirlemesine yardımcı olur.

Bu çalışmadaki problem, otomotiv aydınlatmasında kullanılan PCB tasarım sürecinde, devre kartının araçta karşılaşılabileceği yüklerin ve bunlardan dolayı oluşabilecek risklerin konsept tasarımında hesaba katılmamasıdır. Devre kartında oluşan yükler kart üzerinde belli bir yük oluşturur ve bu yük miktarı kart tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır. Aksi takdirde PCB üretildikten ve test aşamısına geldikten sonra oluşabilecek problemler zaman ve maliyet kaybına neden olur. Deneysel tasarım modelinde değişken olarak elektronik komponentlerin kart üzerindeki lokasyonları, cevap fonksiyonu olarak ise elektronik komponentleriyle PCB'yi bağlayan uçların maksimum gerilme miktarı ve yorulma hasarları belirlenmiştir.

3.4.2. Tasarım ve Cevap Değişkenlerinin Seçilmesi

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde (Che 2015, Garcia, 2018, Yang 2018, Akbari 2019, Fathzade 2021) elektronik komponent ile bakır katmanı birbirine bağlayan lehim uçların PCB'de yorulma hasarı anlamında en kritik yer olduğu görülmektedir. Bu çalışmada PCB bileşenlerinin konuma bağlı değişimlerini incelemek amacıyla deneysel tasarım oluşturulmuştur. Her elektronik komponentin X ve Y lokasyonları tasarım değişkeni olarak belirlenmiştir. Çalışmada rastgele titreşim analizlerinden elde edilen bağlantı uçlarında oluşan 1σ , 2σ , 3σ maksimum gerilme ve hasar miktarı ise cevap fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Şekil 3.43'de görüldüğü gibi üç tip elektronik komponentin (transistör, diyot ve entegre devre) lokasyonlarının değişken olduğu altı farklı bölge tanımlanmıştır. Şekil 3.43'de her bölgeye ait lokasyonun aralığı verilmiştir. Bu bölgelerdeki her bir komponent için deneysel tasarım gerçekleştirilerek cevap yüzeyleri elde edilmiştir. Sonuç olarak bu bölgelere yerleştirilen her bir bileşenin X ve Y konumlarına bağlı olarak bağlantı lehim uçlarındaki yorulma hasarlarının cevap yüzeyleri ve denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 3.43. PCB'nin tasarım alanı

3.4.3. Deneysel Tasarım Metodları

Deneysel tasarımda, tasarımı etkileyen değişkenlerin cevap fonksiyonları ile olan ilişkisini anlamlandırma ve inceleme amacıyla çeşitli metotlar kullanılır. Bunlardan bazıları “Taguchi”, “Latin Hiperküp”, “Tam Faktöriyel”, “Monte Carlo”, ve “Merkezi Bileşik Tasarım” metotlarıdır.

Taguchi tasarımı, çalışma ortamında daha tutarlı bir şekilde çalışan bir ürün veya süreç seçimine izin veren tasarlanmış bir deneydir. Taguchi tarafından önerilen deneysel tasarım, süreci etkileyen parametreleri ve bunların değişmesi gereken seviyeleri düzenlemek için ortogonal dizilerin kullanır. Faktöriyel tasarım gibi tüm olası kombinasyonları test etmek yerine, Taguchi yöntemi kombinasyon çiftlerini test eder. Bu, minimum deneme miktarı ile ürün kalitesini en çok hangi faktörlerin etkilediğini belirlemek için gerekli verilerin toplanmasını sağlar, böylece zamandan ve kaynaklardan tasarruf sağlar. Taguchi yöntemi, orta düzeyde değişken sayısı (3 ila 50) olduğunda,

değişkenler arasında az sayıda etkileşim olduğunda ve yalnızca birkaç değişken önemli ölçüde katkıda bulunduğunda en iyi şekilde kullanılır.

Latin Hiperküp örnekleme yöntemi literatürde belirtildiği gibi tabakalı örnekleme sınıfına aittir. Tabakalı örnekleme, rastgele kota örnekleme olarak da adlandırılan, büyük bir popülasyonun benzersiz, homojen tabakalara bölündüğü ve daha sonra bu tabakalardan üyelerin bir örnek oluşturmak için rastgele seçildiği bir olasılık örnekleme yöntemidir. (Unger, 2004)

Tam faktöriyel tasarım, deneylerin her denemesinde veya tekrarında, faktörlerin seviyelerinin olası tüm kombinasyonlarını kullanarak deneysel noktalar oluşturur. Tam faktöriyel tasarımdaki deneysel tasarım noktaları, faktörlerin her birinin minimum ve maksimum değerleri tarafından tanımlanan n boyutlu tasarım uzayındaki bir hiper küpün köşeleri anlamına gelir.

Monte Carlo, istatistiksel sistemleri simüle etmenin bir yöntemidir. Bu yöntem, sistemi analitik olarak çözmeye gerek kalmadan nicelikleri geliştirmek ve yaklaşık olarak tahmin etmek için tanımlanmış bir sistemdeki rastgeleliği kullanır. Bu yöntemin ima ettiği ana kavram, hareket eden bir sistemdeki bir noktanın, sonunda sistemin hareket ettiği uzayın tüm kısımlarını tekdüze ve rastgele bir şekilde ziyaret edeceğidir. Bu ergodisite olarak bilinir (Anonim, 2021b).

Merkezi bileşik tasarım (CCD) olarak adlandırılan bir Box-Wilson merkezi bileşik tasarımı, tam bir tam faktöriyel deney tasarımı kullanmadan yanıt yüzeyi metodolojisindeki yanıt değişkenleri için ikinci dereceden bir polinom oluşturmak için sıklıkla kullanılır. İkinci dereceden bir polinomun katsayılarını belirlemek için, deneysel tasarımda her faktörün en az üç seviyesi olmalıdır. CCD'de faktöriyel noktalar, merkez noktalar ve eksenel noktalar olmak üzere üç farklı nokta vardır. Faktör noktaları, faktör seviyelerinin -1, + 1 olarak kodlandığı tam veya kesirli faktör tasarımından gelen n-boyutlu küpün köşeleridir. Merkezi nokta, tasarım alanının merkezindeki noktadır. Eksen noktaları, koordinat sisteminin eksenleri üzerinde, tasarım merkezinden α uzaklıkta merkez noktaya göre simetrik olarak yerleştirilmiştir.

Bu çalışmada, geliştirilen en iyi küçük örnekleme yöntemlerinden biri “Advanced Latin Hypercube Sampling Method” kullanılmıştır. Latin Hypercube örnekleme, problemdeki rastgele değişkenler için oldukça bağımlı bir ortak olasılık yoğunluk fonksiyonu oluşturur; bu, yalnızca az sayıda örnek kullanılarak cevap parametrelerinde oldukça yüksek doğruluk sağlar. Buna ek olarak, Latin Hypercube örnekleme, ilişkili veya ilişkisiz girdi değişkenlerini herhangi bir olasılık dağılımıyla simüle etme konusunda uzmandır (Bilbay ve ark., 2023).

Her deneysel tasarım için 100 örnek oluşturulmuş ve çözülmüştür. Çalışmada, altı farklı bölge ve üç farklı komponent tipi olduğundan 18 adet cevap yüzeyi, yani 18 adet ayrı deneysel tasarım oluşmaktadır. Deneysel tasarım modelinde örnek çözümler “Ansys Mechanical” ile çözülmüş ve sonuçlar “Ansys Optislang” tarafından toplanmıştır. Regresyonda polinom metamodeli kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçları anlamlandırmak için prognoz katsayısı (CoP), yanıt yüzeyleri gibi istatistiksel araçlar kullanılmıştır.

3.4.4. Deneysel Tasarımda Optislang Yazılımı

Optislang, bilgisayar destekli mühendislik tabanlı duyarlılık analizi, çok disiplinli optimizasyon (MDO) ve sağlamlık değerlendirmesi yapan bir yazılım platformudur. Dynardo tarafından geliştirilmiştir ve önceden tanımlanmış bir optimizasyon hedefine en çok katkıda bulunan değişkenleri belirleyerek sayısal “Sağlam Tasarım Optimizasyonu” (RDO) için bir çerçeve sağlar. Bu aynı zamanda sağlamlığın, yani tasarım değişkenlerinin dağılımına veya parametrelerin rastgele dalgalanmalarına karşı duyarlılığın değerlendirilmesini de içerir (Anonim, 2018c).

Çalışmada kullanılan “Optimal Prognoz Metamodeli” (MOP) ve “Prognoz Katsayısı” (CoP), RDO görevlerini çözmek için kullanılmış algoritmalarlardır. CoP/MoP yaklaşımı, minimum çözümleyici ile otomatik değişken azaltma ve tahmin kalitesinin doğrulanmasını sağlamıştır. Optislang, giriş parametrelerinin sınırlandırılması olmadan riskin ölçülmesine, optimizasyon potansiyellerinin belirlenmesine ve güvenlik marjlarının ayarlanmasına yardımcı olmuştur.

Sanal prototip oluşturma sürecindeki bilgisayar destekli mühendislik tabanlı optimizasyonların gerçek durum uygulamalarında, fiziksel modellerin karmaşıklığını azaltmak ve hızlı bir şekilde czlebilen sayısal modeller elde etmek her zaman mümkün değildir. Genellikle, her bir sayısal simülasyon saatler hatta günler sürer. Bu nedenle maliyetli tasarım çalışmalarının yerini alacak verimli meta modeller alternatif olmaktadır. Problem için en uygun meta modelin seçimi için otomatik bir yaklaşım sunmanın yanı sıra bağımsız bir test veri seti ile meta modelin prognoz kalitesini test edilmelidir. Bu nedenle, en iyi prognoz kalitesine sahip seçilen metamodeli, optimize edilmiş prognozun (MoP) meta-modeli olarak adlandırılır. Gelişmiş filtreleme teknikleri kullanılarak değişken uzayının otomatik olarak azaltılmasıyla birlikte, yüksek boyutlu problemler için de verimli bir yaklaşım sağlanmış olunur. Optislang yazılımında MoP oluşturulduktan sonra önemli yanıtların prognoz kalitesi araştırılabilir ve MoP optimizasyon amacıyla kullanılabilir.

Meta modelleme, doğrusal olmayan optimizasyon ve stokastik analizde tasarım araştırması için en popüler stratejilerden biridir. Pek çok mühendislik probleminin doğal karmaşıklığından dolayı, bir vekil model uygulayarak probleme yaklaşmak ve diğer tasarım konfigürasyonlarını yumuşak bir alt alanda czmek oldukça verimlidir. Orijinal fiziksel problemin vekil bir modeli, daha fazla analiz yapmadan çeşitli olası tasarım konfigürasyonlarını gerçekleştirmek için kullanılabilir.

3.4.5. Deneysel Tasarımda Kullanılan İstatistiksel Araçlar

Çalışmada, deneysel tasarımda regresyon sonrasında elde edilen verileri anlamlandırmak ve analiz etmek amacıyla prognoz katsayısı (CoP), yanıt yüzeyleri gibi istatistiksel araçlardan yararlanılmıştır. CoP regresyon modelinin örnek noktalarına bağlıdır. CoP, bağımsız bir test veri seti kullanarak regresyon modelinin tahmin kalitesini ler. Bu katsayı 1'e ne kadar yakın olursa tahmin kalitesinin de o kadar iyi olduğu anlamına gelmektedir.

Yanıt yüzeyi tasarımı, yanıtınızı daha iyi anlamınıza ve optimize etmenize yardımcı olan bir dizi gelişmiş deney tasarımı tekniğidir. Tepki yüzeyi tasarım metodolojisi, tarama

tasarımları veya faktöriyel tasarımlar kullanarak önemli faktörleri belirledikten sonra modelleri iyileştirmek için sıklıkla kullanılır. Yanıt yüzey denklemi, yanıt yüzey eğriliğin modellenmesine izin veren ikinci dereceden terimleri ekler ve bu sayede değişikliklerin yanıtı nasıl etkilediğini modeller.

3.4.6. Elektronik Komponentlerin En Uygun Dağılımını Yapan Kullanıcı Arayüzü Oluşturulması

Çalışmada regresyon sonucunda her komponent tipi ve bölge için tasarım parametrelerine bağlı cevap fonksiyonlarının denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler, komponentlerin X ve Y konumuna bağlı olarak bağlantı uçlarındaki 3σ gerilimi hesaplamak için kullanılmıştır. Denklem 3.20 ve denklem 3.21 kullanılarak bağlantı uçlarındaki 1σ , 2σ , 3σ gerilmeler ve yorulma hasarı hesaplanmıştır. Tüm bu veriler Excel programında toplanmış ve kullanıcının istenilen lokasyonlara göre bağlantı uçların ve bu sayede PCB'nin güvenli olup olmadığını anlık olarak kontrol etmesini sağlayan bir arayüz oluşturulmuştur. Bağlantı uçlarında hasar oluşması durumunda, komponentlerin X ve Y lokasyonları tasarım değişkenleri olarak ve yorulma hasarı ise objektif olarak belirlenebilir ve Excel'deki "Evrimsel Algoritma" ile "Çözücü" özelliği kullanılarak optimizasyon yapılabilir.

Arayüzde her bölge ve komponent tipi için X ve Y lokasyonlarının girilebileceği boş kutular tasarlandı. Bu kutulara her bölge için limitler dahilinde kalacak şekilde kısıtlamalar tanımlandı. Limit dışı değer girilmesi durumunda açılır ekran belirmekte ve uyarı vermektedir. Tasarım parametrelerine bağlı olarak regresyondan elde edilen σ gerilim değerleri formülasyonla hesaplanır ve arayüz sekmesinde görüntülenir. Yorulma ömrü arka planda hesaplanır ve "Miner's Cumulative Damage Ratio" kullanılarak istenen her bileşenin hasar miktarları arayüzde görüntülenir. Hasar miktarı 1'den fazla ise kutu kırmızı renkte gösterilir ve bu durum bağlantı uçlarının, dolayısıyla PCB'nin güvenli olmadığı anlamına gelir. Hasar miktarı 1'den az ise bağlantı uçları güvende demektir ve kutu yeşil renkte gösterilir. Son olarak arayüz, elektronik komponentlerin konumunu, komponent adını ve karşılık gelen lokasyonun koordinatlarını gösteren bir görüntü ile görselleştirilir.

4. BULGULAR

4.1. FR4 Malzemesi Çekme Testi Sonucu Elastik Modüllerin Elde Edilmesi ve Sonlu Elemanlar Analizi ile Karşılaştırılması

ISO 527-4 standartına göre yapılan 10 adet FR4 test numunesinin tek eksenli çekme testinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. FR4 malzemesinin X yönündeki elastik modülü

Numune No	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)	Elastik Modülüs (MPa)
1	264	379	1,88	26042
2	214	381	1,82	31012
3	272	356	1,76	25149
4	228	380	1,87	29259
5	368	382	2,03	22075
6	361	370	1,98	20966
7	355	367	1,99	20641
8	225	372	1,86	27211
9	166	378	1,93	29180
10	208	376	1,95	25286
Ortalama				25682

Çizelge 4.2. FR4 malzemesinin Y yönündeki elastik modülü

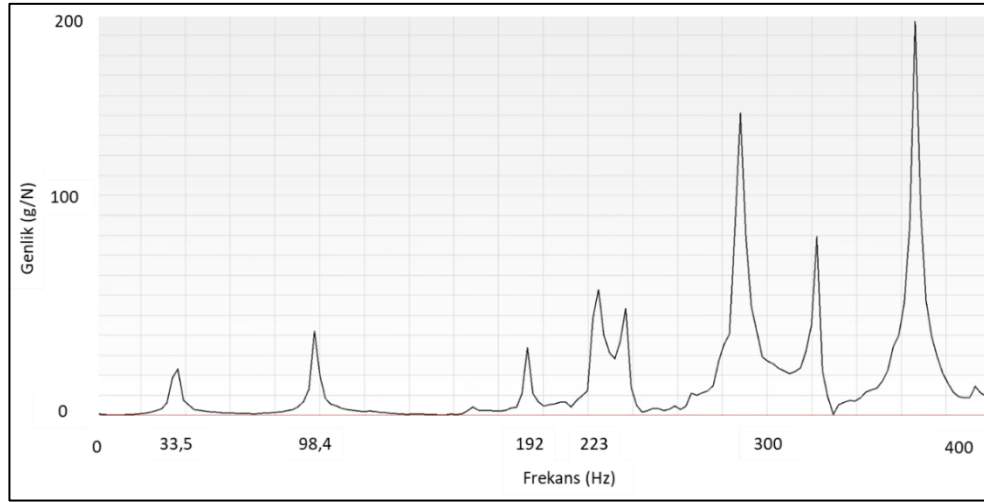
Numune No	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)	Elastik Modülüs (MPa)
1	184	291	1,89	23935
2	226	300	1,85	22385
3	210	290	1,74	24750
4	222	263	1,55	22656
5	224	290	1,82	21586
6	215	280	1,72	22638
7	191	285	1,77	24860
8	191	290	1,81	26299
9	200	288	1,77	24894
10	189	279	1,69	25508
Ortalama				23951

Şekil 4.1. Çekme numunesi sonlu elemanlar analiz (soldaki) ve test (sağda)

4.2. FR4 Plakasının Malzeme Özelliklerinin Doğrulanması

DMA testinden elde edilen FR4 plakasının frekans cevap fonksiyonu (FRF) Şekil 4.2’de görülmektedir. Şekilde FR4 plakasının doğal frekansları sırasıyla 33,5 Hz, 98,4 Hz, 192 Hz, 223 Hz olduğu bulunmuştur.

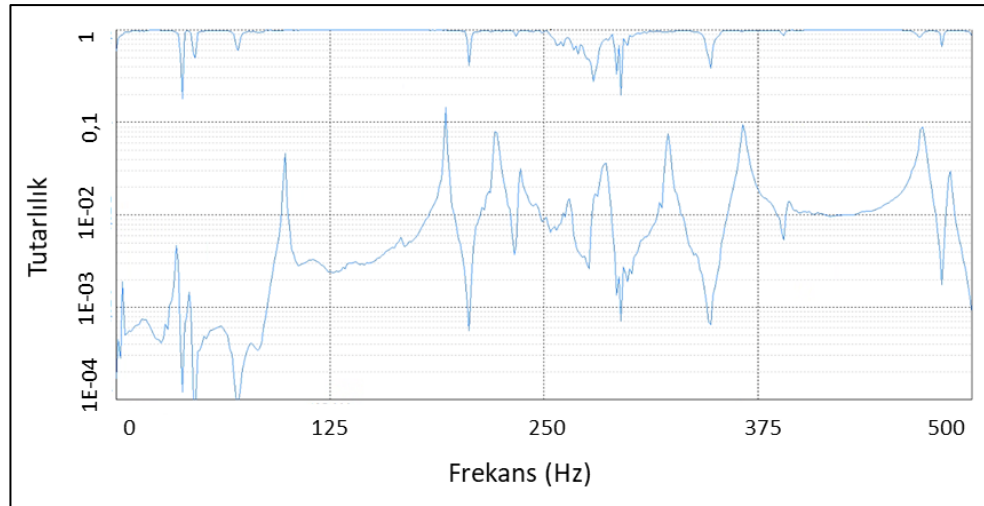
75



Şekil 4.2. FR4 plakasının DMA testinin FRF eğrisi

Çizelge 4.3. FR4 plakasının DMA testi ve SE doğal frekanslarının karşılaştırması

	Mod 1	Mod 3	Mod 6	Mod 7
DMA	33,5	98,4	192	223
SE	33,3	93,4	189,7	225,8
Sapma	0,5%	5%	1%	1%



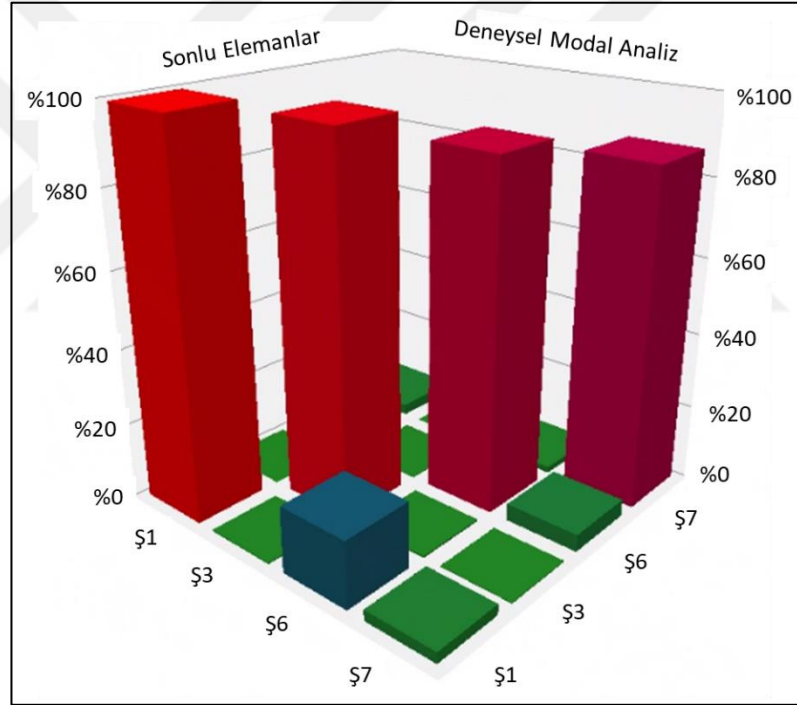
Şekil 4.3. FR4 plakasının tutarlılık eğrisi

Çekiç darbe testinin tutarlılığı, yani FRF'deki çıktı verisinin girdi verisine göre ne kadar farklı olduğu Şekil 4.3'te görülmektedir. Şekilde doğal frekans modlarında tutarlılığın 1'e oldukça yakın ve testin tutarlı olduğu görülmüştür.

DMA testi ile ve sonlu elemanlardan elde edilen doğal frekans modlarının şekilsel olarak benzerliği de incelenmiştir.

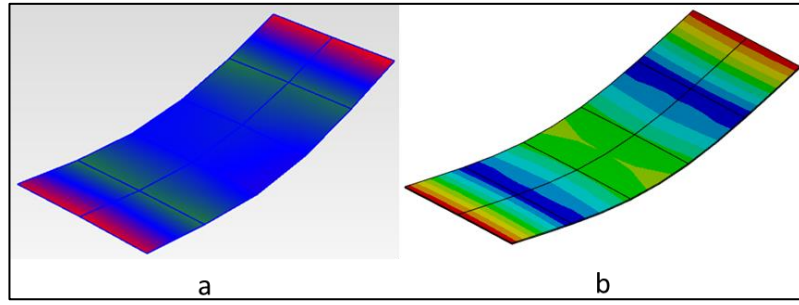
Çizelge 4.4. FR4 DMA ve SE modal güvence kriteri (MAC) karşılaştırması

		Frekans (Hz)	SE			
			Mod Şekil 1	Mod Şekil 3	Mod Şekil 6	Mod Şekil 7
			33,3	92,9	189,7	225,8
DMA	Mod Şekil 1	35,5	0,995	0,000106	0,259	0,0296
	Mod Şekil 3	98,4	0,00336	0,963	0,0019	0,000435
	Mod Şekil 6	192	0,175	0,00474	0,897	0,0165
	Mod Şekil 7	223	0,0288	0,00271	0,0452	0,867

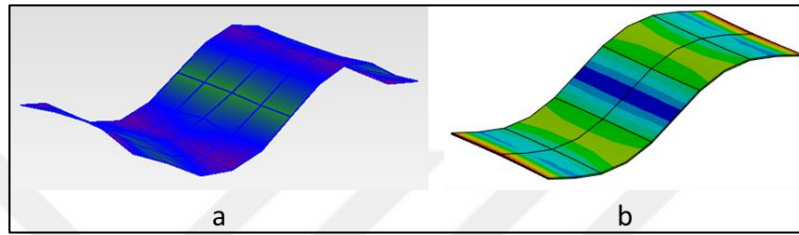


Şekil 4.4. FR4 plakası DMA ve SE modelinin MAC karşılaştırması

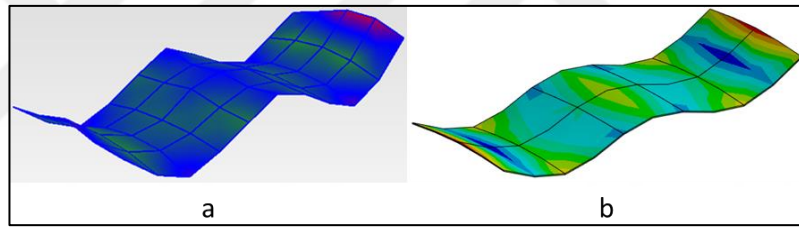
Çizelge 4.4 ve Şekil 4.4'te modal güvence kriterin karşılaştırılması verilmiştir. Çizelge 4.4 incelendiğinde DMA ve SE arasındaki Mod 1, Mod 3, Mod 6 ve Mod 7 doğal frekans şekilleri %85 üzerinde benzer olduğu görülmüştür.



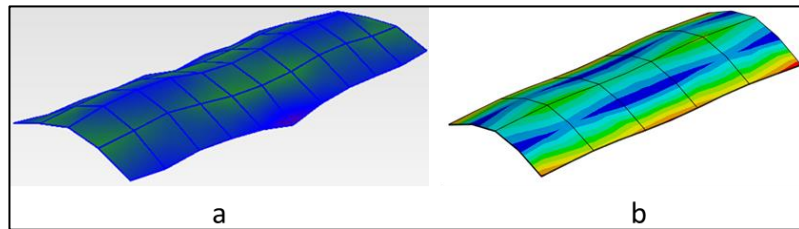
Şekil 4.5. Mod 1 şekilleri (a) DMA sonucu (b) Ansys SE sonucu



Şekil 4.6. Mod 3 şekilleri (a) DMA Sonucu (b) Ansys SE Sonucu



Şekil 4.7. Mod 6 şekilleri (a) DMA Sonucu (b) Ansys SE Sonucu



Şekil 4.8. Mod 7 şekilleri (a) DMA Sonucu (b) Ansys SE Sonucu

Deneyisel modal analiz testi ile sonlu elemanlar analizinin modal şekil karşılaştırmaları yukarıdaki şekillerde görülmektedir.

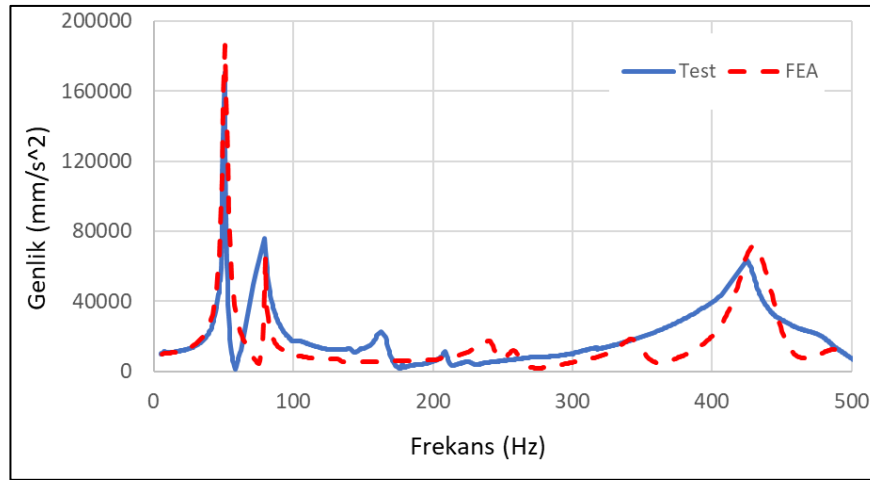
Sonuç olarak FR4 plakası deneyisel modal analiz ve sonlu elemanlar arasında Çizelge 4.3'te doğal frekans değerlerinde en fazla %5 sapma, Şekil 4.4'te ise mod şekillerin en az %85 benzer olduğu görülmüştür.

4.3. Devre Kartının Fiziksel Testi ve Sonlu Elemanlar Korelasyonu

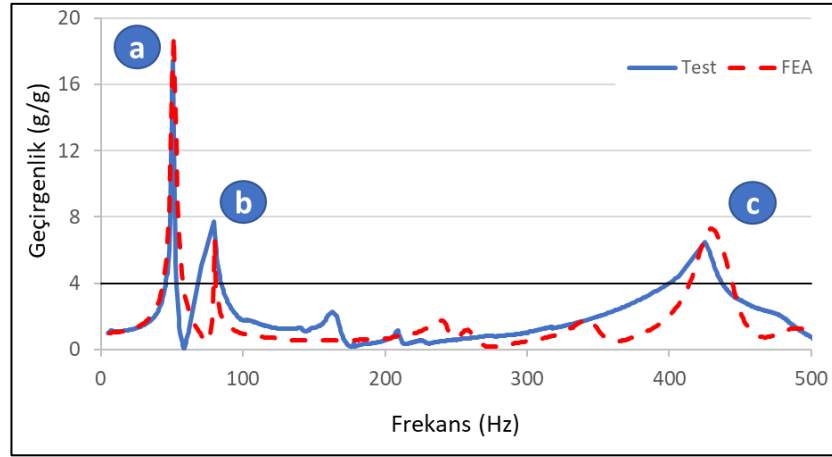
PCB'nin LED ışıklar açık halde sinüs tarama testi yapılmış, yapılan sinüs tarama testi aynı koşullar altında sanal ortamda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrulanmıştır.

4.3.1. Devre Kartı Sinüs Tarama Test ve Analiz Sonuçları

Sinüs tarama testi yapılan sarsıcıdan, girdi ve çıktı genlik değerleri hesaplatılmış ve geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde ise aynı şekilde girdi ve çıktı genlik değerleri toplanmış ve geçirgenlik hesaplanmıştır.

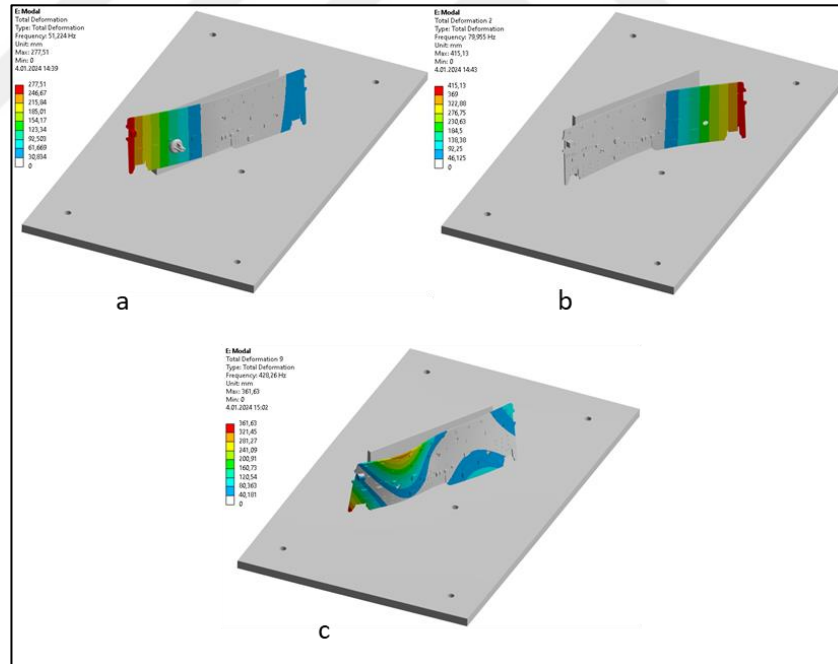


Şekil 4.9. Sinüs tarama fiziksel test ve sonlu elemanlar genlik ile frekans karşılaştırılması



Şekil 4.10. Sinüs tarama fiziksel test ve sonlu elemanlar geçirgenlik ile frekans karşılaştırılması

Sonuç olarak fiziksel test ile sonlu elemanlar sonuçlarından elde edilen genlik-frekans ve geçirgenlik-frekans eğrileri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Baskılı devre kartının doğal frekans modları ilk mod (a) ikinci mod (b) üçüncü mod (c)

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 incelendiğinde a,b ve c ile isimlendirilmiş PCB’nin doğal frekans modları olduğu görülmüştür. Geçirgenlik değerleri düşük olan diğer tepe noktaları ise

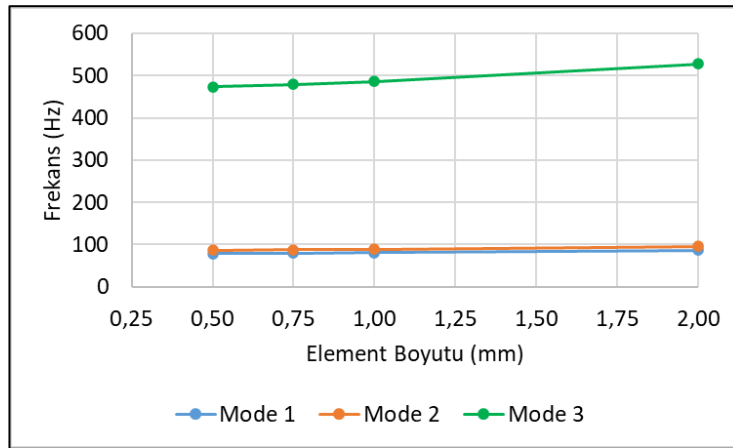
fikstür ve sarsıcıya bağlanan plakadan kaynaklanmaktadır ve bu yüzden geçirgenlik limit değeri 4 olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak sinüs tarama eğrileri incelendiğinde sonlu elemanlardan elde edilen sonucun fiziksel test ile arasında frekans bazında en fazla %4,75 sapma olduğu elde edilmiş ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bu sapma miktarının diğer literatür çalışmalarından (Gu ve ark., 2007, Gharaibeh, 2018, Verna ve ark., 2020) daha düşük olduğu görülmüş ve böylece sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanmış bir PCB modeli elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. Baskılı devre kartı modlarının frekans ve geçirgenlikleri

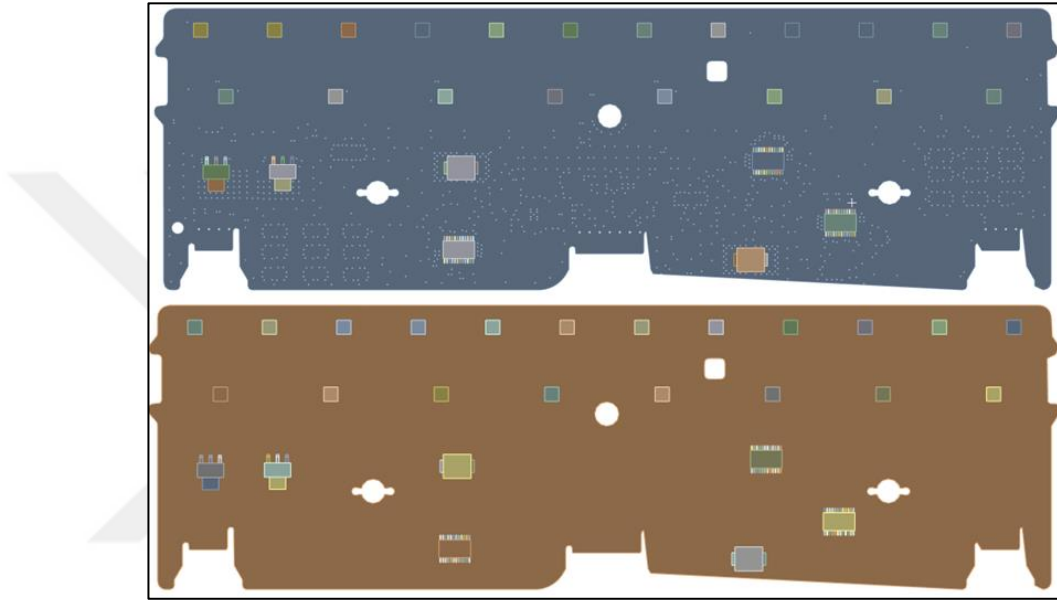
	Frekans (Hz)		% Sapma Frekans	Geçirgenlik (g/g)	
	SE	F.Test		SE	F.Test
a	51	53	3,8%	19	16
b	76,2	80	4,75%	7,75	6,1
c	437	433	0,9%	6,2	7

PCB sonlu elemanlar modelinde eleman boyutu bağımsızlığı için 0,5 mm, 0,75 mm 1 mm ve 2 mm boyutlarına sahip eleman ağları oluşturuldu. Her bir eleman boyutu için ilk dört doğal frekans modu karşılaştırılıp Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Eleman boyutundan bağımsızlık çalışması incelendiğinde 0,75 mm boyutundan daha küçük elemanlar için modal frekanslar yakınsadığı görüldüğünden modelde eleman boyutu olarak 0,75 mm kullanılmıştır.



Şekil 4.12. PCB eleman boyutundan bağımsızlığı

PCB üzerindeki mikron boyutundaki deliklerin kartın doğal frekansları üzerindeki etkisini inceleyen ek bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13'te görüldüğü gibi tek değişkenin deliklerin mevcut olduğu ve olmadığı iki farklı model oluşturulmuş ve modal SE analizi yapılmıştır. İki modelin ilk 6 doğal frekansları karşılaştırılmış ve arada en fazla %0,2 fark görülmüştür. Deliklerin varlığının sistemin dinamik özellikleri üzerindeki etkisi %0,2 olarak belirlendiği için, bu çalışmada deliklerin etkisi ihmal edilmiştir.

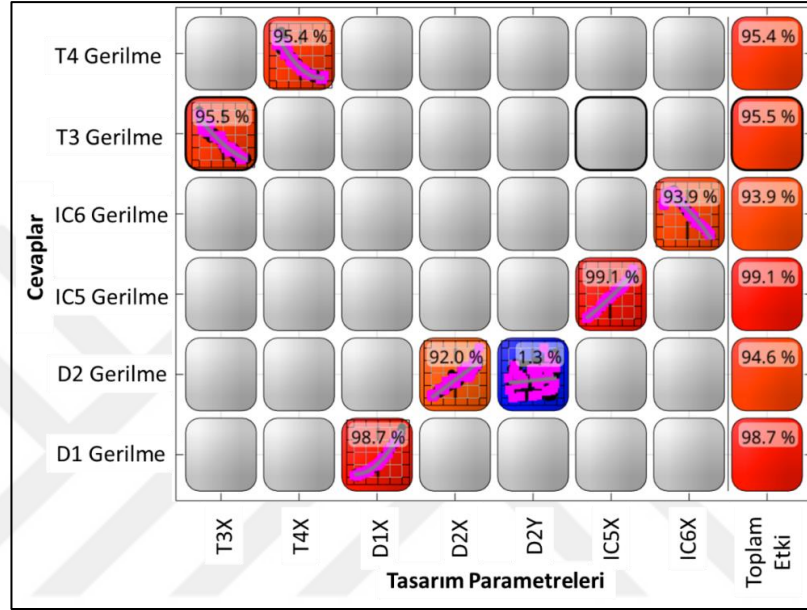


Şekil 4.13. PCB deliklerin mevcut olduğu (üstteki) ve olmadığı (alttaki) versiyonları

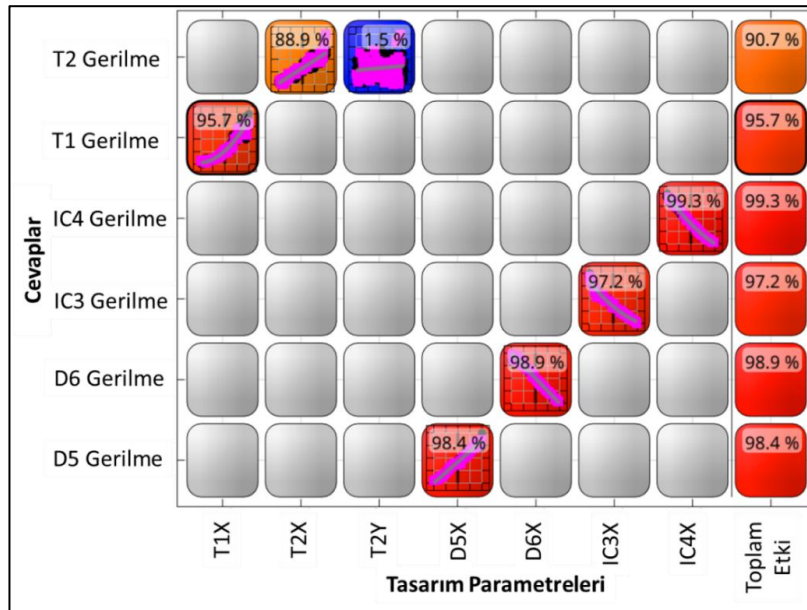
4.4. Devre Kartının Deneysel Tasarım Sonucu

Deneysel tasarıma göre elektronik bileşenlerin lokasyon değişiminin tüm PCB'nin doğal frekansını etkilemediği gözlemlenmiştir. Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da sadece aynı tip bileşenlerde cevaplar ile tasarım parametreleri arasında etkileşim olduğu görülmektedir. Toplam etki olarak vurgulanan kırmızı kutular aynı zamanda regresyon modelinin doğruluk oranı olan Prognostic Katsayısı'nı (CoP) da göstermektedir. Çalışmada yapılan regresyonun doğruluğu ikinci bölgedeki transistör için %90,7, diğerleri için ise %95'in üzerinde bulunmuştur. Her elektronik bileşen tipi için altı farklı bölgede cevap yüzeyleri elde edilmiştir. Her bir bileşen için farklı bölgelerdeki iki boyutlu cevap yüzeyleri kutuların içerisinde gösterilmektedir.

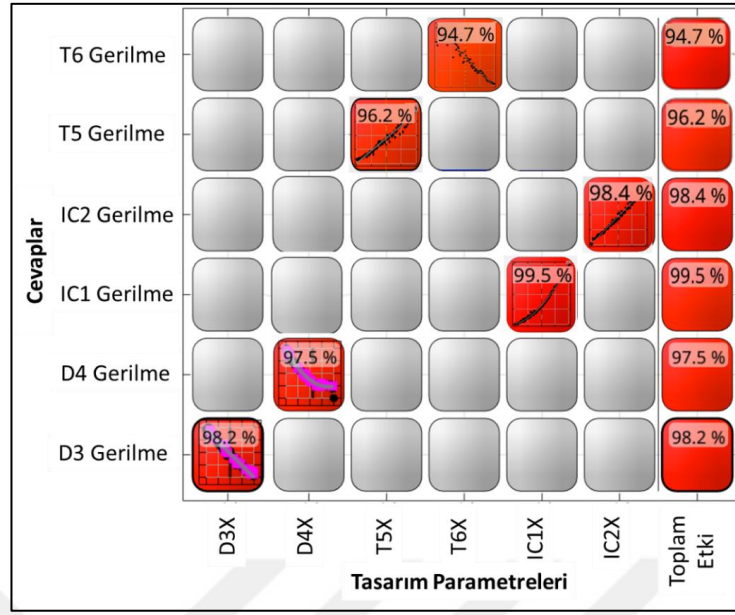
Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da cevaplar sekmesinde ilk harfler komponent tipini (D-Diyot, IC-Entegre Devre, T-Transistör), ikinci rakamlar ise Şekil 3.43'e göre bulunduğu bölgeyi göstermektedir. Tasarım parametreleri sekmesinde ise ilk harfler komponent tipini, ikinci rakamlar bulunduğu bölgeyi, üçüncü harfler ise lokasyonların hangi eksenlerine ait olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.14. Cevaplar ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiler-1



Şekil 4.15. Cevaplar ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiler-2

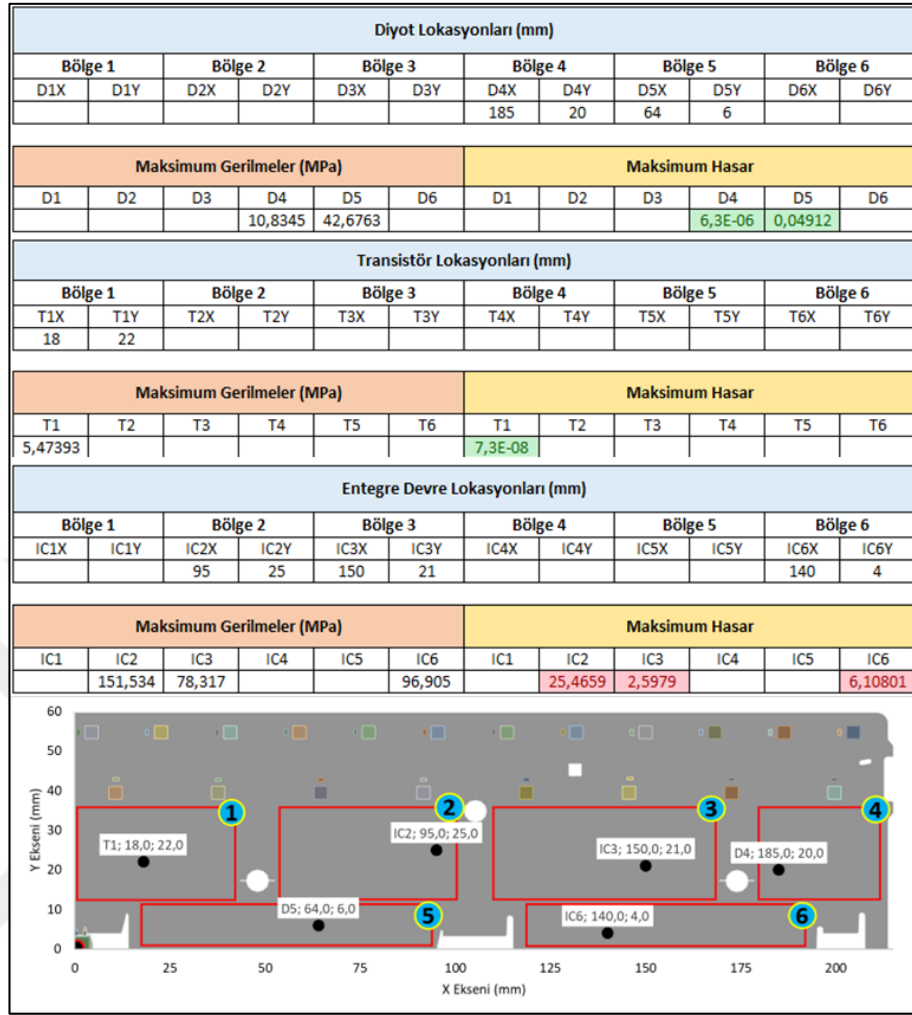


Şekil 4.16. Cevaplar ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiler-3

4.5. Devre Kartı Tasarım Arayüzü ve Korelasyonu

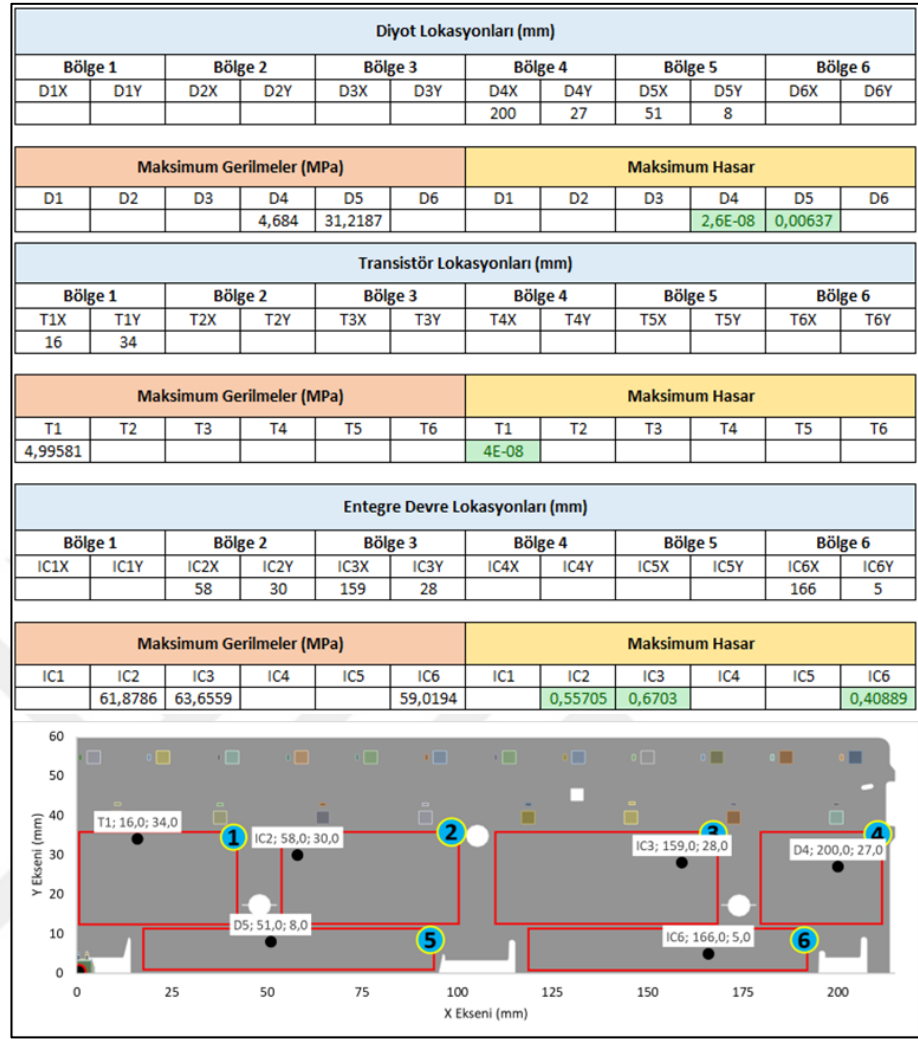
Şekil 4.17'de rastgele lokasyonlar seçilerek örnek olarak PCB tasarımı oluşturulmuştur.

Bu örnek tasarıma göre ikinci,üçüncü ve altıncı bölgedeki entegre devre yorulma senaryosunu geçememekte ve PCB'deki bağlantı uçlarında hasar oluşmaktadır. Burada kullanıcı, hasarlı entegre devrenin lokasyonunu güvenli hale gelene kadar limit aralıklar dahilinde manuel olarak değiştirebilir. Diğer bir seçenek ise maksimum hasarı hedef olarak, X ve Y eksenlerindeki lokasyonu ise tasarım parametresi olarak tanımlayarak Excel'in "Çözücü" optimizasyon algoritmasını kullanmaktır. Diğer bölgelerdeki tüm komponentler için en iyi lokasyonlar, her bir komponentin lokasyonlarına yönelik kısıtlamalar tanımlanarak da bulunabilir.



Şekil 4.17. Arayüzdeki PCB baz tasarım örneği

Örnekte, hasarın en aza indirilmesi amacıyla IC2 minimum hasar hedef olarak seçilmiş ve elektronik komponentlerin X ve Y konumları tasarım parametreleri olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon için evrimsel algoritma kullanılmıştır. Limit aralık değerleri tüm tasarım parametreleri için kısıtlamalar olarak tanımlanmış ve PCB'nin güvenli bölgede kalmasını sağlamak amacıyla tüm komponentlerin maksimum hasarları için 0 ile 1 arasındaki kısıtlamalar tanımlanmıştır. Optimizasyon sonucunda verilen amaca göre en iyi tasarım parametreleri elde edilmiş ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Arayüzdeki optimum PCB tasarım örneği

Kullanıcı arayüzü, PCB'nin hasara uğradığı örnekte elektronik komponent lokasyonlarını optimize etmiş ve bunun sonucunda, hedef olan yorulma hasarı IC2 için 25,46'dan 0,55'e, kısıt olarak tanımlanan IC3 için 2,59'dan 0,67'ye, IC6 için 6,1'den 0,4'e düşürerek PCB'yi güvenli hale getirmiştir. Ayrıca kullanıcı, test ve sonlu elemanlar analiz verileriyle doğrulanmış en iyi PCB tasarımlarından birini elde etmiştir.

Tahmin edilen optimum tasarım, sonlu eleman analizinde ayriyetten çözüldü ve 'de her bir bağlantı uçların maksimum gerilmeleri karşılaştırıldı. Tahmin edilen sonuç ile ayriyetten çözdürülmüş sonlu elemanlar analiz sonucu arasında maksimum %9'luk bir sapma olduğu gözlenmiş ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Tahmin edilmiş ve SE ile çözdürülmüş maksimum gerilme karşılaştırması

	D4	D5	T1	IC2	IC3	IC6
Tahmin Edilmiş Maksimum Gerilme (MPa)	4,68	31,21	5	61,87	63,65	59
Sonlu Elemanlar ile Çözdürülmüş Gerilme (MPa)	4,35	32,19	4,85	68	62,24	55,4
% Sapma	7%	3%	3%	9%	2%	6%

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Sonuç olarak, bu çalışmada PCB'nin dinamik ve termal karakteristiklerini doğru bir şekilde temsil eden bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve deneysel testlerle doğrulanmıştır. Geliştirilen model, tasarım sürecinde güvenilir analizler yapmaya olanak tanırken, aynı zamanda optimizasyon ve deneysel tasarım çalışmalarına da zemin hazırlamaktadır. Çalışmanın en önemli çıktılarından biri, PCB tasarım sürecini hızlandıran ve mühendislerin karar alma sürecini kolaylaştıran kullanıcı arayüzünün geliştirilmesidir. Bu arayüz, PCB üzerindeki farklı elektronik komponent yerleşimlerini analiz ederek PCB'nin güvenilirliğini hesaplamaya yardımcı olmakta ve tasarım sürecinde hata payını en aza indirmektedir. Böylece mühendisler, üretim öncesinde en uygun komponent dağılımını belirleyerek hem maliyet hem de zaman açısından daha verimli bir tasarım süreci elde edebilmektedir.

Çalışmada, PCB'nin tüm bileşenleriyle birlikte SE modeli oluşturulmuştur. Çeşitli SE analizlerinde kullanılmak üzere PCB'nin çekirdek kısmında yer alan FR-4 numunesinin tek eksenli çekme testi yapılmış ve anizotropik malzeme özellikleri elde edilmiştir. Elde edilen malzeme özelliklerini doğrulamak amacıyla DMA metodu kullanılarak FR-4 plakanın dinamik karakteristik özellikleri bulunmuştur. SE analizinden elde edilen modal analiz sonuçlarıyla DMA sonuçları doğal frekans ve mod şekilleri açısından karşılaştırılmıştır. SE ile DMA sonuçları arasında frekans bakımından en fazla %5 fark, mod şekilleri arasında en az %86 benzerlik olduğu görülmüştür. Bu sayede PCB'ye rijitliğini veren FR-4 çekirdek malzemesi oldukça iyi bir oranda doğrulanmıştır.

PCB üzerinde yer alan LED komponentler çalışma sırasında oluşan sıcaklık dağılımını SE modeline dahil etmek amacıyla termal kamera ile görüntü alınmış ve SE modeline entegre edilmiştir. PCB'nin dinamik karakteristik özelliğini doğrulamak amacıyla aynı sınır şartlarında sinüs tarama testi ve sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sarsıcı kullanılarak yapılan sinüs tarama testinden ivmeölçer yardımıyla PCB üzerindeki genlikler okunmuş ve geçirgenlik-frekans eğrisi elde edilmiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan sinüs tarama analizi sonucunda geçirgenlik-frekans eğrisi elde edilmiştir. Geçirgenlik-frekans eğrisi bakımından fiziksel test ve sonlu elemanlar sonucu

karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak test ile SE analiz arasında frekans açısından en fazla %4,75 fark olduğu elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bu farkın oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bu sayede dinamik karakteristik bakımından oldukça iyi bir korelasyon sahip PCB sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir.

PCB üzerinde yer alan elektronik komponentleri en uygun şekilde dağıtmak amacıyla korele edilmiş PCB modeli ve deneysel tasarım metodu kullanılmıştır. Tasarım parametresi olarak komponentlerin X ve Y lokasyonları, cevap olarak ise komponentlerin bağlantı uçlarındaki rastgele titreşim analizi sonrasındaki gerilme ve hasar miktarı belirlenmiştir. Regresyon sonucunda her bir cevap için denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak komponentlerin lokasyonlarına bağlı PCB'nin güvenliliğini hesaplayan bir kullanıcı arayüzü oluşturulmuştur. Arayüz kullanılarak örnek bir PCB tasarımı oluşturulmuş ve Excel'in optimizasyon modülü kullanılarak en iyi tasarım değişkenlerine sahip bir PCB tasarımı elde edilmiştir. Tasarım değişkenlerine göre tahmin edilen hasar miktarı gerçek sonlu elemanlar analiz çözümüyle karşılaştırılmış ve en fazla %9 sapma olduğu görülmüştür.

Kullanıcı arayüzü, konsept tasarım sırasında kullanıcıya zaman kazandırdığı ve üretim sonrasındaki test aşamasındaki hataları önlediği için oldukça önemlidir. Marelli Mako firmasındaki aktif olarak kullanılan bu arayüz, çalışmalara hem zaman hem de maliyet açısından daha verimli hale gelmesini sağlamakta ve ayrıca PCB konsept tasarımının mekanik yönünü iyileştirmede oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma, PCB tasarımında sonlu elemanlar analizinin ve deneysel doğrulama süreçlerinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Çalışmanın geliştirilmesi için aşağıdaki alanlarda yeni çalışmalar yapılabilir:

- FR-4 malzemesi yerine farklı kompozit malzemeler veya esnek PCB'ler üzerinde benzer analizler yapılabilir.
- Çok katmanlı PCB'lerde malzeme özelliklerinin farklı katmanlar arasında nasıl değiştiği incelenerek modelin daha karmaşık yapılara uyarlanması sağlanabilir.

- Çalışmada termal analiz için termal kamera kullanılmıştır, ancak gerçek zamanlı sıcaklık ve mekanik gerilme ölçümleri entegre sensörler ile yapılabilir. PCB üzerine yerleştirilecek gömülü sensörler ile anlık veriler toplanarak dinamik analizlerin doğruluk oranı artırılabilir.
- Farklı montaj teknikleri ve lehimleme yöntemlerinin PCB'nin titreşim performansına etkileri incelenebilir.
- Mevcut kullanıcı arayüzü, tasarımcıların PCB'nin güvenilirliğini değerlendirmelerine yardımcı olmaktadır. Ancak bu arayüz, CAD yazılımları (SolidWorks, ANSYS, CATIA vb.) ile entegre edilerek daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap edebilir.
- Web tabanlı veya bulut destekli bir sistem haline getirilerek ekiplerin eş zamanlı çalışmasını sağlayan bir platforma dönüştürülebilir.
- Yapay zeka destekli bir öneri sistemi ile mühendislerin tasarım sırasında gerçek zamanlı öneriler alması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Akbari, S., Lövberg, A., Tegehall, P. E., Brinkfeldt, K., & Andersson, D. (2019). Effect of PCB cracks on thermal cycling reliability of passive microelectronic components with single-grained solder joints. *Microelectronics Reliability*, 93, 61-71.
- Alexandridis, A., Paizis, E., Chondrodima, E., & Stogiannos, M. (2017). A particle swarm optimization approach in printed circuit board thermal design. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 24(2), 143-155.
- Amalu, E. H., & Ekere, N. N. (2012). High temperature reliability of lead-free solder joints in a flip chip assembly. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2), 471-483.
- Andrea, S., Marco, R., Terry, A., Francesca, C., Jessica, C., Debora, G., Stefano, T. (2008). Global sensitivity analysis: *The Primer*. Chichester: John Wiley & Sons, The Atrium, Chichester, England.
- Anonim, 2012. What Is Random Vibration Testing? <https://vibrationresearch.com/resources/what-is-random-vibration-testing/> - (Erişim Tarihi: 17.08.2023)
- Anonim, 2013. Integrated Circuits. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/integrated-circuits/> - (Erişim Tarihi: 22.02.2023)
- Anonim, 2014. What is a diode? Electrical, 101 Learning. <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/electrical/what-is-a-diode> - (Erişim Tarihi: 20.02.2023)
- Anonim, 2018a. Composition of PCB. <https://www.theengineeringprojects.com/2018/03/introduction-to-pcb.html> - (Erişim Tarihi: 24.02.2023)
- Anonim, 2018b. What is FR-4 PCB material? <https://www.seeedstudio.com/blog/2017/09/20/fr4-pcb-material/> - (Erişim Tarihi: 24.02.2023)
- Anonim, 2018c. optiSLang. https://fr.mathworks.com/products/connections/product_detail/optislang.html - (Erişim Tarihi: 10.04.2023)
- Anonim, 2019. Sönümlü Serbest Titreşimler Deney Föyü. https://mustafaeroglu.sakarya.edu.tr/sites/mustafaeroglu.sakarya.edu.tr/file/sonu_mlu_serbest_titresimler_deney_FOY_2019.pdf - (Erişim Tarihi 10.05.2023).
- Anonim, 2020. What is a Frequency Response Function (FRF)? <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-frequency-response-function-frf> - (Erişim Tarihi: 15.05.2023)
- Anonim, 2021a. What is Resistor?. <https://www.nextpcb.com/blog/what-is-resistor> - (Erişim Tarihi: 20.02.2023)
- Anonim, 2021b. Monte Carlo Method Explained. <https://towardsdatascience.com/monte-carlo-method-explained-8635edf2cf58> - (Erişim Tarihi: 06.04.2023)
- Anonim, 2022a. Piezoelektrik İvmeölçer Nedir? <https://rmc.com.tr/piezoelektrik-ivmeolcer-nedir/> - (Erişim Tarihi: 15.06.2023)
- Anonim, 2022b. Using OptiSLang to Determine PCB Effective Material Properties. <https://www.inas.ro/en/testimonials/using-optislang-to-determine-pcb-effective-material-properties-continental-automotive-romania>. (Erişim Tarihi: 03.01.2023)

- Anonim, 2022c. Sherlock 2022 R1 Sherlock User's Guide. Bonded Model. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/sherlock_ug/sherlock_ug_13_fea-models.html?q=layered%20elements (Erişim Tarihi: 11.08.2023).
- Anonim, 2022d. Sherlock 2022 R1 Sherlock User's Guide. Layered Elements Model. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/sherlock_ug/sherlock_ug_ch_14_FEA-02_PCB_Modeling.html (Erişim Tarihi: 11.08.2023).
- Aoues, Y., Makhloufi, A., Pougnet, P., & El Hami, A. (2012). Probabilistic assessment of thermal fatigue of solder joints in mechatronic packaging. *Proceedings of the 1st International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling*, Maresias, Brazil.
- Arabi, F., Gracia, A., Delétage, J. Y., & Frémont, H. (2018). Vibration test and simulation of printed circuit board. *19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems* (pp. 1-7).
- Bilbay F.B., Arslan E., Ediz B., Çakır M.C. (2023). Investigation of the effect and optimization of material properties on the printed circuit board. *Composites and Advanced Materials*, 32. <https://doi.org/10.1177/26349833231209336>.
- Burmitskiy, A. V., Lebedev, A. P., Levitskiy, A. A., & Moskovskiy, M. S. (2013). Printed Circuit Board vibration analysis using simplified finite element models. *2013 International Siberian Conference on Control and Communications*, pp. 101-104. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2013.6693570>.
- Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*, John Wiley & Sons, New York, United States. Vol. 7, pp. 703-706.
- Chaudhari, M., Chowdhury, A. S. M. R. R., Rahangdale, U., Misrak, A., Rajmane, P., Doiphode, A., & Agonafer, D. (2019). Reliability assessment of bga solder joints- Megtron 6 vs FR4 printed circuit boards. *Proceedings of SMTA International*. Rosemont, IL, USA: SMTA, 136-141.
- Che, F. X., & Pang, J. H. (2015). Study on reliability of PQFP assembly with lead free solder joints under random vibration test. *Microelectronics Reliability*, 55(12), 2769-2776. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.09.010>.
- Chen, Z., Zhang, Z., Dong, F., Liu, S., & Liu, L. (2021). A hybrid finite element modeling: artificial neural network approach for predicting solder joint fatigue life in wafer-level chip scale packages. *Journal of Electronic Packaging*, 143(1), 011001.
- Ewins D.J., (2000). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., 2nd Edition, ISBN 0-86380-218-4
- Fathzadeh, M., Saberi, M., Ajri, M., & A. Shirazi, F. (2021). Vibration Simulation and Fatigue Life Estimation of a Printed Circuit Board Using Validated Model. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, 7(1), 29-42.
- Gao, T. (2021). Modal Analysis and Structure Optimization of Composite Circuit Board. *7th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC)* (pp. 358-363).

- Gao, Y., Wang, F., Ding, S., Yang, B., Liu, L., & Salmani, M. (2021). Device architecture optimization of solder ball joints fatigue lifetime under random vibration frequencies. *Soldering & Surface Mount Technology*, 33(1), 1-7. <https://doi.org/10.1108/SSMT-05-2020-0020>.
- Garcia, A., Sorribes-Palmer, F., & Alonso, G. (2018). Application of Steinberg vibration fatigue model for structural verification of space instruments. *AIP Conference Proceedings*, 1992 (1), pp. 100003. <https://doi.org/10.1063/1.5019088>.
- Gharaibeh, M. (2018). Finite element model updating of board-level electronic packages by factorial analysis and modal measurements. *Microelectronics International*.
- Gu, J., Barker, D., & Pecht, M. (2007). Prognostics implementation of electronics under vibration loading. *Microelectronics reliability*, 47(12), 1849-1856.
- Han, C. (2014). Location-dependent Reliability of Solder Interconnection on Printed Circuit Board in Random Vibration Environment. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 38(1), pp. 45-50. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.1.045>.
- Harlow, D. G. (2023). Statistically Modeling the Fatigue Life of Copper and Aluminum Wires Using Archival Data. *Metals*, 13(8), 1419. <https://doi.org/10.3390/met13081419>.
- Hu, G., Kim, Y. G., & Judy, L. (2011). Micromechanical analysis of copper trace in printed circuit boards. *Microelectronics Reliability*, 51(2), 416-424.
- Huang, C. Y., & Ying, K. C. (2017). Applying strain gauges to measuring thermal warpage of printed circuit boards. *Measurement*, 110, 239-248.
- Jayaraman, S., Trikha, M., Kamesh, D., & Ravindra, M. (2016). Response spectrum analysis of printed circuit boards subjected to shock loads. *Procedia Engineering*, 144, 1469-1476.
- Kalyani, U. H., & Wylie, M. (2020). Modal finite element analysis of PCBs and the role of material anisotropy. *Vibroengineering Procedia*, Vol. 32, pp. 75-80. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21446>.
- Lalanne, C. (2014). Random Vibration.. New York: John Wiley & Sons, London, England. Vol. 3, pp. 79-125.
- Maia F., W. C., Brizoux, M., & Grivon, A. (2010). Optimization of PCB build-up layer configuration for electronic assemblies with active embedded components in the board. *11th International Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ESIME.2010.5464607>.
- McLeish, J. G., & Haeberle, R. (2014). Moving Automotive Electronics from Reliability/Durability Testing to Virtual Validation Modeling Using a Physics of Failure CAE App. *SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, 7(2014-01-0233), 369-376.
- Most, T., Will, J. (2009). Metamodel of Optimal Prognosis-an automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection. *Weimar Optimization and Stochastic Days 5.0*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2194.4007>
- Nowak, T., Schacht, R., Walter, H., Wunderle, B., Ras, M. A. (2011). Experimental and numerical reinvestigation for lifetime-estimation of plated through holes in printed circuit boards. *17th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)* (pp. 1-6).

- Ramos, L. F. (2007). Damage identification on masonry structures based on vibrations signatures. Doktora Tezi, University of Minho, Civil Engineering, Portugal.
- Ren, G., Li, B., Li, D., & Jiao, Y. (2015). Modal analysis of the printed circuit board based on finite element method. *International Conference on Computer Science and Electronic Technology*, pp. 150-154. <https://doi.org/10.2991/iccset-14.2015.32>.
- Roy, N., Violin, M., & Cavro, E. (2018). Sine sweep effect on specimen modal parameters characterization. *Advances in aircraft and spacecraft science*, 5(2), pp. 187-204. <https://doi.org/10.12989/aas.2018.5.2.187>.
- Samavatian, V., Masoumian, A., Mafi, M., Lakzaei, M., & Ghaderi, D. (2018). Influence of directional random vibration on the fatigue life of solder joints in a power module. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 9(2), pp. 262-268. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2838148>.
- Santosh M. (2008). Analyzing Random Vibration Fatigue. ANSYS Advantage, Volume 2, Issue 3.
- Schwarz, B. J., Richardson, M. H. (1999). Experimental modal analysis. Vibrant Technology Inc., Jamestown, California, (pp. 12).
- Serebreni, M., Hernandez, N., Blattau, N., & Hillman, C. (2018). Enhancing Printed Circuit Board Layout Using Thermo-Mechanical Analysis. *IPC Apex Expo 2018*, Bannockburn, Scotland.
- Somashekar, V. N., Harikrishnan, S., Ahmed, P. A., & Kamesh, D. (2016). Vibration response prediction of the printed circuit boards using experimentally validated finite element model. *Procedia Engineering*, 144, 576-583. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.05.044>.
- Thompson, W. T. (1996). Theory of Vibrations, Nelson Thornes Ltd, 1996, ISBN 0-412-78390-8
- Ținca, I. E., Ailinei, I. I., Silaghi, A. M., Bleoju, C. (2021). Evaluation of Finite Element Modelling Techniques of Printed Circuit Boards under Dynamic and Static Loading and Validation with Experimental Data. *27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging*, pp. 101-104. <https://doi.org/10.1109/SIITME53254.2021.9663724>.
- Unger, J., & Roos, D. (2004). Investigation and benchmarks of algorithms for reliability analysis. 1st Weimar Optimization and Stochastic Days, Weimar, Germany.
- Verma, S. K. V. K., Saravanan, S., & Sathiyaseelan, V. P. A. K. (2020). Dynamic Response Characteristics and Fatigue Life Prediction of Printed Circuit Boards for Random Vibration Environments (Vol. 20, p. 920–929)
- Yang, Z. T., Peng, B., & Gao, L. (2018). Research on the thermal fatigue life of CQFN packaging. In 2018 *19th International Conference on Electronic Packaging Technology* (ICEPT) (pp. 662-666).
- Yokoyama, T. (2023). Experimental identification of high damping ratios in single-degree-of-freedom systems. *Archive of Applied Mechanics*, 1-14.
- Zhang, W., Li, Y., & Qian, R. (2016). Optimization Design of Printed Circuit Board Structure Based on Modal Analysis. *4th International Conference on Electrical & Electronics Engineering and Computer Science*, pp. 1118-1123. <https://doi.org/10.2991/iceeecs-16.2016.214>.

- Xia, G., Qin, F., Gao, C., An, T., & Zhu, W. (2013). Reliability design of multirow quad flat nonlead packages based on numerical design of experiment method. *Journal of Electronic Packaging*, 135(4), 041007.
- Xu, F., Li, C. R., Jiang, T. M., & Zhang, D. P. (2016). Fatigue life prediction for PBGA under random vibration using updated finite element models. *Experimental Techniques*, 40(5), 1421-1435. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0141-6>.

