T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

DAMPERLİ KAMYONUN SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN PIEZOELEKTRİK ENERJİ HASADI İLE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Drissa Mohamed MALO

DANIŞMAN
Prof. Dr. Erol UZAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Kasım, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Drissa Mohamed Malo tarafından, **Prof. Dr. Erol Uzal** danışmanlığında hazırlanan **"DAMPERLİ KAMYONUN SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN PIEZOELEKTRİK ENERJİ HASADI İLE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **01/05/2021** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Erol UZAL İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Şule KAPKIN İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Erman ASLAN Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Lütfi Emir SAKMAN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Drissa Mohamed MALO

(İmza)

Annem/Babam/Hocam/ Aileme ithaf ediyorum.

BÜTÇE DESTEKLERİ

Damperli Kamyonun Süspansiyon Sisteminin Pıezoelektrik Enerji Hasadı İle Matematiksel Modellemesi

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın temeli, başlangıçta, çevre ortamından enerji toplamak için yenilikçi yöntemler geliştirmeye olan tutkumdan kaynaklandı. CO2'ye en çok katkıda bulunanlardan biri olarak bilinen otomotiv endüstrisinde, hem çevre hem de halk sağlığı için zararlı olan kirletici fosil yakıtların kullanımının azaltılması ihtiyacı giderek artmaktadır. Piezoelektrik transdüksiyon, yüksek güç yoğunluğu ve erişilebilirliği nedeniyle en çok kullanılan enerji toplama yöntemlerinden biridir. Günlük hayatımızda mevcut olan enerji toplama mekanizmalarının çoğu piezoelektrik etkiyi kullanır. Piezoelektrik dönüştürücüler otomotiv endüstrisinde uzun süredir kullanılmaktadır ancak bu sektörde henüz tam potansiyellerine ulaşamamıştır. Piezoelektrik enerji hasadı, sera gazı emisyonunu azaltarak ve araçların enerji verimliliğini artırarak otomotiv endüstrisi için büyük bir potansiyele sahiptir.

Bir araçta enerji hasadı için ana kaynaklar ısı kayıpları, titreşimler ve fren enerjisidir. Süspansiyon sistemi, titreşim emme sürecine müdahale eden araçların temel destekleyici bileşenlerinden biridir. Titreşimler, özellikle maden sahalarında engebeli ve bozuk yollardan kaynaklanır. Süspansiyonlardan elde edilen enerji, yerleşik alternatöre ek olarak hizmet eder. Aslında, bu enerji aküyü şarj etmek ve lastik basıncı, araç hızı ve gerilim izleme sensörleri gibi kablosuz sensörlere güç sağlamak için kullanılabilir. Titreşimlerle boşa harcanan enerji çok fazladır, bu nedenle bu enerjiyi geri kazanmanın sürdürülebilir bir yolu kullanışlıdır ve çeşitli çevresel ve ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Arazi taşıtlarının süspansiyon sisteminin titreşime ve zorlanmaya maruz kalmasına rağmen, bu parçaların enerji hasadı sistemlerinin matematiksel modellenmesi üzerine sınırlı araştırma yapılmıştır. Bu araştırma çalışmasının amacı, genel olarak arazi araçlarının ve özel olarak damperli kamyonların lastik ve süspansiyon piezoelektrik enerji toplama sisteminden çıkış yükü ve gerilimini hesaplamak için matematiksel bir model geliştirmektir. Bu matematiksel modeller, fiziğin temel yasalarına dayanmaktadır. Bu yasalar, birkaç yıllık bilimsel deney ve gözlemlerden türetilmiştir. Bu model sayesinde süspansiyon sisteminin dinamikleri temsil edilecek ve tahmin edilecektir. Arazi araçlarının dinamiklerini analiz etmek için toplu parametre modelleri kullanılabilir.

Kasım 2022 Drissa Mohamed MALO

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ii
BEYAN iv
BÜTÇE DESTEKLERİ vi
TEŞEKKÜR vii
İÇİNDEKİLER viii
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xxi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ xxiii
ÖZET xxvi
ABSTRACT xxvii
1. GİRİŞ 1
1.1. ÖNEM 1
1.2. PROBLEM TANIMI 2
1.3. AMAÇ 3
1.4. TEZİN ANA BÖLÜMLERİ 4
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE 5
2.1. LITERATÜR TARAMASI 5
2.2. PIEZOELEKTRİK ENERJİ TOPLAMASI 9
2.2.1. Piezoelektrik Tarihi 10
2.2.2. Piezoelektrik Özellikler. 12
2.2.3. Piezoelektrik Lineer Teori 24
2.2.4. AC Modunda Toplanan Güç (Alternatif Akım Empedansı Eşleştirme -ACIM) 32
2.2.5. Piezoelektrik Lineer Teorinin Sınırlamaları 40
2.3. PIEZOELEKTRİK MALZEMELERİN İŞLENMESİ 41
2.3.1. Tek Kristaller 41
2.3.2. Polimer Filmler 43
2.3.3. Seramik 45
2.4. REZONANT PIEZOELEKTRİK TRANSFORMATÖRLER 47

2.4.1. Rosen Tipi Rezonanslı Piezoelektrik Transformatörler 48
2.4.2. Rosen Tipi Piezoelektrik Transformatörün Topolojileri 52
2.4.3. Piezoelektrik Transformatörün Çıkışına Bağlı Yük Empedansının Etkisi 55
2.4.4. Q'nun Transformatörün Rezonans Frekansı Üzerindeki Etkisi. 56
2.4.5. Ölçme Uygulamalarında Rezonans Transformatörlerinin Sınırlamaları 57
2.5. PIEZOELEKTRİK ENERJİ TOPLAMA SİSTEMİ ANA BİLEŞENLERİ 58
2.5.1. Piezoelektrik Eleman 59
2.5.2. Konuk Eden Yapı 59
2.5.3. Elektronik 59
2.6. ELEKTRONİK DEVRELERİ VE TEMELLERİ 59
2.6.1. Temel Denklemler 61
2.6.2. Yarı İletken Bileşenler 69
2.6.3. Doğru Akım Empedans Eşleşmesi (DCIM) 77
2.6.4. İndüktör Devresinde Senkronize Anahtar Toplama 85
2.6.5. Senkron Elektrik Yükü Çıkarma Devresi 93
2.7. SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ 96
2.7.1. Ana Süspansiyon Sistemi Çeşitleri 96
2.7.2. Sınır Sürtünmesi 98
2.7.3. Seviye Kontrolü ve Ayarı 99
2.7.4. Süspansiyon Sistemlerinin Yay Özellikleri 101
2.7.5. Hidro-pnömatik Süspansiyonların Sönümleme Özellikleri 106
2.7.6. Matematiksel Araba Modelleri 110
2.8. SÜSPANSİYON ENERJİ TOPLAMA 120
2.9. LASTİK BASINÇ GÖZETİM SİSTEMİ 129
2.9.1. Direkt Lastik Basıncı İzleme Sistemi 130
2.9.2. Dolaylı Lastik Basıncı İzleme Sistemi 135
2.9.3. Hibrit Lastik Basıncı İzleme Sistemi 136
3. YÖNTEM 139
3.1. SÜSPANSİYON SİSTEMİ PIEZOELEKTRİK ENERJİ HARVESTER CRICUITRY 139
3.2. MATEMATİKSEL MODELLERİN BÜNYE DENKLEMLERİ 140
3.2.1. Piezoelektrik Malzeme Hariç Matematiksel Modeller 141
3.2.2. Piezoelektrik Malzeme İçeren Matematiksel Modeller 145
4. BULGULAR 158
4.1. PIEZOELEKTRİK YIĞIN VE KAMYON PARAMETRELERİ 158

4.2. STEP GİRİŞ YANITI 160
4.2.1. ÇAM Adım Giriş Yanıtı 161
4.2.2. YAM Adım Giriş Yanıtı. 164
4.3. HARMONİK UYARMA TEPKİSİ 166
4.3.1. Yol Dalga Boyu Sınıflandırması 167
4.3.2. Bode Grafikları 167
4.3.3. ÇAM Harmonik Uyarma Tepkisi 169
4.3.4. YAM Harmonik Uyarma Tepkisi 172
4.3.5. Doğrusal olmayan QCM harmonik Uyarma 175
4.3.6. Frekans Alanı Analizi 178
4.3.7. Frekans Alanında ÇAM Süspansiyon Sisteminden Dağıtılan Güç. 187
4.3.8. Frekans Alanında YAM Süspansiyon Sisteminden Dağıtılan Güç 189
4.3.9. Frekans Alanında ÇAM Toplanan Gerilim ve Güç. 190
4.3.10. Frekans Alanında YAM Toplanan Gerilim ve Güç. 191
4.3.11. Hız Alanında ÇAM Toplanan Gerilim ve Güç. 191
4.3.12. Hız Etki Alanında YAM Toplanan Gerilim ve Güç. 193
4.4. RASGELE UYARIMLAR 194
4.4.1. ÇAM'in Rastgele Uyarma sonuçları 197
4.4.2. YAM'nin Rastgele Uyarma sonuçları 204
4.4.3. ÇAM D Sınıfı Rastgele Uyarma Kamyonun Hızına Göre Toplanan Güç Ve Gerilim. 208
4.4.4. Kamyonun Hızına Göre YAM Sınıf D Rastgele Uyarma Toplanan Güç Ve Gerilim. 210
4.5. TAM ARABA MODELİ (TAM) YAYLI DEPLASMAN 211
4.5.1. Tam Araba Modelinin Durum Uzayı İfadeleri 215
4.5.2. Tam Araba Modeli Yaylı Kütlenin Bode Büyüklük Grafiği 221
4.5.3. Tam Araba Modeli Step Girişi Yanıtı 222
4.5.4. Tam Araba Modeli Harmonik Uyarma Tepkisi 223
5. TARTIŞMA 225
5.1. YOL PARAMETRELERİNİN YAM'NİN TOPLANMIŞ GERİLİM VE GÜÇ ÜZERİNE ETKİLERİ. 225
5.2. PIEZOELEKTRİK Yığın PARAMETRELERİNİN YAM'NİN TOPLANAN GERİLİM VE GÜÇ ÜZERİNE ETKİLERİ. 226
5.2.1. Piezoelektrik Yığının Kuvvet Faktörünün Toplanan Güç Ve Gerilim Üzerindeki Etkisi 226

5.2.2. Piezoelektrik Yığının Kapasitansının Toplanan Güç Ve Gerilim Üzerindeki Etkisi. 227
5.3. KAMYON PARAMETRELERİNİN YAM'NİN TOPLANAN GERİLİM VE GÜÇ ÜZERİNE ETKİLERİ. 228
5.3.1. Süspansiyon Sönümleme Katsayıları Bsf Ve Bsr'nin Toplanan Gerilim Ve Güç Üzerindeki Etkisi. 228
5.3.2. Yaysız Sönümleme Katsayılarının buf ve bur'un Toplanan Gerilim ve Güç üzerindeki Etkisi. 229
5.3.3. Süspansiyon Rijitlik Katsayıları Ksf Ve Ksr'nin Toplanan Gerilim Ve Güç Üzerindeki Etkisi. 230
5.3.4. Yaysız (Lastik) Rijitlik Katsayıları Kuf Ve Kur'un Toplanan Gerilim Ve Güç Üzerindeki Etkisi. 231
5.3.5. Yaylı Kütle M_S'nin Toplanan Gerilim Ve Güç Üzerindeki Etkisi. 232
5.3.6. Yaysız Muf ve Mus Kütlelerinin Toplanan Gerilim ve Güç Üzerine Etkisi. 233
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 235
6.1. SONUÇ 235
6.2. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER 237
KAYNAKLAR 239
EKLER 254
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 261
ETİK KURUL İZİN YAZISI 262
KURUM İZNİ YAZILARI 263
ÖZGEÇMİŞ 264

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Farklı enerji toplama tekniklerinin güç yoğunluğu ve voltaj karşılaştırma grafiği [37]. 7

Şekil 2. 2: Piezoelektrik enerji hasadı ve ana uygulamaları [48-57]..... 9

Şekil 2.3: Doğrudan piezoelektrik etki [65]. 13

Şekil 2.4: Ters piezoelektrik etkisi. 13

Şekil 2.5: Piezo seramik kristalleri, alanlar ve alan duvarları [67]. 15

Şekil 2.6: Kurşun zirkonat titanatın kutuplama işlemi [68]. 15

Şekil 2.7: PZT'nin perovskit yapısı (birim hücre) kür sıcaklığının üstünde (a) ve altında (b) [71]. 16

Şekil 2.8: Ferroelektrik malzemelerin dielektrik histerezisi [76]..... 19

Şekil 2.9: Ferroelektrik malzemelerin gerinim (kelebek) döngüsü [77]. 20

Şekil 2.10: (a) Kutuplama sırasında gerinim (b) Gerinim histerezis döngüsü [77]. 21

Şekil 2.11: Ferroelektrik seramiklerin kutuplama işlemi sırasında üç çeşit gerilme. 22

Şekil 2.12: İnce bir piezoelektrik malzeme diskinin düzlemsel salınımları [58]. 23

Şekil 2.13: Piezoelektrik malzemelerin mekanik ve elektriksel özellikleri arasındaki ilişki [78, 79]. 24

Şekil 2.14: Piezoelektrik malzemelerde elektromekanik sabitlerin yön indeksi [71]. 25

Şekil 2.15: Piezo elemanlı 1 boyutlu kütle yaylı damper modeli. 33

Şekil 2.16: Açık devreden (R=∞) kısa devreye (R=0) doğal frekans oranı. 34

Şekil 2.17: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2}$=0.01 ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği. 36

Şekil 2.18: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2}$=0.01 için voltajın ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için normalleştirilmiş tepki grafiği. 36

Şekil 2.19: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2}$=0.01 ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için gücün normalleştirilmiş tepki grafiği. 37

Şekil 2.20: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.5}$ için yer değiştirmenin ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05'in normalleştirilmiş tepki grafiği. 38

Şekil 2.21: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.5}$ için voltajın ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için normalleştirilmiş tepki grafiği. 39

Şekil 2.22: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için gücün normalleştirilmiş tepki grafiği. 39

Şekil 2.23: PZT'nin tipik frekans yanıtı. 40

Şekil 2.24: Piezoelektrik yer değiştirme – ferroelektrik, antiferroelektrik, piezoelektrik ve elektrostriktif modlarda polarizasyon grafikleri [86]. 43

Şekil 2.25: Bir korona kutuplama aparatı [90]. 44

Şekil 2.26: Bir PVDF polimer filmin işlenmesi (a) mekanik stresin uygulanması, mekanik gerdirme (b) kontak kutuplama (c) krona kutuplama (d) elektro-eğirme işlemi [91]. 45

Şekil 2.27: Karışık oksit yöntemiyle PZT üretimi. 46

Şekil 2.28: Tipik bir piezoelektrik transformatörün yapısı. 48

Şekil 2.29: Rosen tipi piezoelektrik transformatör [93]. 49

Şekil 2.30: Rosen tipi bir piezoelektrik transformatörün temel titreşim modu – piezoelektrik gövdenin uzunlamasına ekseni boyunca mekanik stresin ve partikül yer değiştirmesinin dağılımı [93]. 50

Şekil 2.31: Piezoelektrik rezonans transformatörü sürüş prensibi. 52

Şekil 2.32: Uzatılmış dikdörtgen piezoelektrik transformatörün şeması. 52

Şekil 2.33: Dar çift kutuplu halka piezoelektrik transformatörün şeması. 53

Şekil 2.34: Kalın çift kutuplu disk piezoelektrik transformatörün şeması. 53

Şekil 2.35: Çift kutuplu disk piezoelektrik transformatörün şeması. 54

Şekil 2.36: Boru şeklindeki piezoelektrik transformatörün şeması. 54

Şekil 2.37: Bir amplifikatör tarafından tahrik edilen piezoelektrik rezonans transformatörü. 55

Şekil 2.38: Bağlı yük empedansının dönüşüm oranı üzerindeki etkisi. 55

Şekil 2.39: Mevcut Kirchhoff yasası. 62

Şekil 2.40: Gerilim Kirchhoff yasası. 62

Şekil 2.41: Bir direncin sembolü. 63

Şekil 2.42: Bir kondansatörün sembolü. 64

Şekil 2.43: Bir indüktörün sembolü. 65

Şekil 2.44: RLC devresi. 66

Şekil 2.45: 1DOF kütleli yay damper sistemi. 66

Şekil 2.46: RC devresi. 67

Şekil 2.47: Bir piezoelektrik elemanın elektriksel gösterimi. 68

Şekil 2.48: Bir diyotun şematik sembolü [101]. 70

Şekil 2.49: Bir diyotun karakteristik akım gerilimi (IV) eğrisi. 71

Şekil 2.50: Tam köprü doğrultucunun şematik gösterimi. 71

Şekil 2.51: Tam köprü doğrultucunun tipik voltaj eğrisi. 72

Şekil 2.52: Bir alan etkili transistörün değişken direnç gösterimi. 73

Şekil 2.53: Metal oksit yarı iletken alan etkili transistörün (MOSFET) sembolü. 74

Şekil 2.54: NPN BJT diyot modeli. 75

Şekil 2.55: NPN BJT şematik sembolü. 75

Şekil 2.56: PNP BJT'nin diyot modeli. 76

Şekil 2.57: PNP BJT'nin şematik sembolü. 77

Şekil 2.58: DCIM devre şematik gösterimi. 77

Şekil 2.59: Optimum dirençte yer değiştirme girişinin dalga biçimi. 78

Şekil 2.60: Optimum dirençteki akımın dalga biçimi - $\boldsymbol{\theta u}$ tam çizgide, $\boldsymbol{Ir}$ ise noktalı çizgide temsil edilir. 78

Şekil 2.61: Optimum dirençteki voltajın dalga biçimi - $\boldsymbol{Vdc}$tam satırda, $\boldsymbol{Vp}$ ise noktalı satırlarda temsil edilir. 79

Şekil 2.62: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.01}$ ve boyutsuz sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$- DCIM devresi için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği. 81

Şekil 2.63: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.01}$ için voltajın ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresinin normalleştirilmiş tepki grafiği. 81

Şekil 2.64: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.01}$ve boyutsuz sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için gücün normalleştirilmiş tepki grafiği. 82

Şekil 2.65: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği. 83

Şekil 2.66: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0}$. ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için voltajın normalleştirilmiş tepki grafiği. 83

Şekil 2.67: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için ortalama gücün normalleştirilmiş tepki grafiği. 84

Şekil 2.68: SSHI devre şeması. 86

Şekil 2.69: Yer değiştirmenin dalga biçimi. 87

Şekil 2.70: Akımın dalga biçimi. 87

Şekil 2.71: Gerilimin dalga biçimi. 88

Şekil 2.72: Düşük bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.01}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği. 90

Şekil 2.73: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.01}$ ve boyutsuz sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için voltajın normalleştirilmiş tepki grafiği. 91

Şekil 2.74: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.01}$ ve boyutsuz sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için gücün normalleştirilmiş tepki grafiği. 91

Şekil 2.75: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği. 92

Şekil 2.76: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için voltajın normalleştirilmiş tepki grafiği. 92

Şekil 2.77: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{ke2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için ortalama gücün normalleştirilmiş tepki grafiği. 93

Şekil 2.78: SECE devre şeması. 94

Şekil 2.79: Bir SECE devresinin yer değiştirme girişinin dalga biçimi. 94

Şekil 2.80: Bir SECE devresinin geriliminin dalga biçimleri. Tam çizgi $\boldsymbol{Vp}$'yi, noktalı çizgi $\boldsymbol{Vdc}$'yi temsil eder. 95

Şekil 2.81: Bir SECE devresinin akımının dalga biçimleri. Tam çizgi $\boldsymbol{I1}$'i, noktalı çizgi ise $\boldsymbol{I2}$'yi temsil eder. 95

Şekil 2.82: hidro-pnömatik ön süspansiyon yapısı. 97

Şekil 2.83: Mekanik, hidropnömatik ve pnömatik süspansiyon mekanizmalarının kuvvet-yer değiştirme eğrileri [105]. 97

Şekil 2.84: Mono süspansiyon sisteminin pistonundaki kuvvet dengesi [105]. 100

Şekil 2.85: Önceden yüklenmemiş tek etkili hidro-pnömatik süspansiyonun şeması [105]. 102

Şekil 2.86: ön yüklemesiz çift etkili hidro-pnömatik süspansiyonun şeması [105]. 102

Şekil 2.87: farklı statik yay yükleri için gaz sütunu $\boldsymbol{h0F}$ yüksekliği $\boldsymbol{FF1}$ [105]. 105

Şekil 2.88: akışkan sürtünmesi sönümleme prensibi [105].....107

Şekil 2.89: Akışkan sönümleme aktif prensibi [105].....108

Şekil 2.90: orifis sıvı direnci. 109

Şekil 2.91: Çeyrek araba modeli (iki serbestlik derecesi).....112

Şekil 2.92: Yaysız kütle olarak gerçek lastikli çeyrek araba modelinin deneysel modeli [113]. 114

Şekil 2.93: Yaysız kütle olarak hareketli plakalı çeyrek araba modelinin deneysel modeli [114]. 114

Şekil 2.94: Yarım araba modeli (dört serbestlik derecesi).....116

Şekil 2.95: Bir kirişle birbirine bağlanan iki süspansiyonlu yarım araba modelinin deneysel kurulumu [119].....117

Şekil 2.96: MRA'lar ve çelik çerçeveli yarım araba modelinin deneysel kurulumu [120]. ...118

Şekil 2.97: Tam araba modeli (yedi serbestlik derecesi). 119

Şekil 2.98: Paralel bağlı piezoelektrik malzeme ile tasarlanmış çeyrek araba modellenmiştir [126]. 121

Şekil 2.99: Paralel bağlı piezoelektrik elemanlara sahip yarım araba modeli [128].....122

Şekil 2.100: Seri bağlı piezoelektrik malzeme ile tasarlanmış çeyrek araba modellenmiştir. 124

Şekil 2.101: Bir lastiğe monte edilmiş çift kütleli piezoelektrik enerji toplama sistemi. 124

Şekil 2.102: Araba lastiği piezoelektrik enerji toplama sisteminin çeyrek araba modeli. 125

Şekil 2.103: Amortisörün içine yerleştirilmiş çok katmanlı piezoelektrik yığın [139].....127

Şekil 2.104: Yay [140] ile seri olarak bağlanmış çok katmanlı (ML PZT VEH) piezoelektrik yığınlı çeyrek araba modeli. 128

Şekil 2.105: Doğrudan bir TPMS [143].....130

Şekil 2.106: Doğrudan TPMS sensör modülü [143].....131

Şekil 2.107: Tekerleğe doğrudan TPMS sensör modülü takma [143].....131

Şekil 2.108: Ekranlı alıcı modülü [143].....132

Şekil 2.109: Aktif TPMS verici şematik diyagramı [144].....133

Şekil 2.110: Aktif TPMS alıcı şematik diyagramı [144]. 133

Şekil 2.111: Doğrudan TPMS Piezoelektrik seramik güç kaynağı şematik diyagramı [144]. 135

Şekil 2.112: lastik açısal hızı ve araç hızı [143]..... 136

Şekil 2.113: Hibrit TPMS [143]..... 137

Şekil 3.1: Piezoelektrik enerji toplayıcı şarj devresinin şeması. 139

Şekil 3.2: Çeyrek araba modeli şematik diyagramı. 142

Şekil 3.3: Yarım araba modeli şematik diyagramı. 143

Şekil 3.4: Süspansiyon yayı ve piezoelektrik yığın arasındaki seri bağlantı. 146

Şekil 3.5: Süspansiyon yayı ve piezoelektrik yığın arasındaki paralel bağlantı. 146

Şekil 3.6: Piezoelektrik yığını ve elektrik devresi seti. 147

Şekil 3.7: Piezoelektrik yığına eşdeğer elektrik devresi ve elektrik devresi seti. 149

Şekil 3.8: Piezoelektrik yığınlı çeyrek araba modeli. 149

Şekil 3.9: Piezoelektrik yığınlı yarım araba modeli. 152

Şekil 4.1: Hareket denklemlerinin transfer fonksiyonlarını kullanan ÇAM Simulink gösterimi. 161

Şekil 4.2: Piezoelektrik yığınlı YAM'nin MATLAB Simulink model gösterimi. 161

Şekil 4.3: ÇAM adım girişi. 162

Şekil 4.4: ÇAM adım girişi araba gövdesi yer değiştirme grafiği. 162

Şekil 4.5: ÇAM adım girişi toplanan voltaj grafiği (v). 163

Şekil 4.6: ÇAM adım girişi toplanan güç grafiği (w). 163

Şekil 4.7: YAM adım girişi. 164

Şekil 4.8: YAM adım girişi araba gövdesi yer değiştirme grafiği. 165

Şekil 4.9: YAM adım girişi toplanan voltaj grafiği. 165

Şekil 4.10: YAM adım girişi toplanmış güç grafiği. 166

Şekil 4.11: ÇAM'in Bode büyüklük grafiği. 168

Şekil 4.12: YAM'in Bode büyüklük grafiği. 169

Şekil 4.13: ÇAM harmonik uyarma giriş grafiği. 170

Şekil 4.14: ÇAM harmonik uyarma araba gövdesi yer değiştirme grafiği. 170

Şekil 4.15: ÇAM harmonik uyarma toplanmış voltaj grafiği. 171

Şekil 4.16: ÇAM harmonik uyarma toplanmış güç grafiği. 171

Şekil 4.17: YAM arka lastik harmonik uyarma giriş grafiği. 173

Şekil 4.18: YAM harmonik uyarma araba gövdesi yer değiştirme grafiği. 173

Şekil 4.19: YAM harmonik uyarma ön yığın toplanmış voltaj grafiği. 174

Şekil 4.20: YAM harmonik uyarma ön yığın toplanmış voltaj grafiği. 174

Şekil 4.21: Doğrusal ve doğrusal olmayan yayların kuvvet-yer değiştirme eğrisi karşılaştırması. 176

Şekil 4.22: Önerilen doğrusal olmayan modelin Bode genlik grafiği (cardody yer değiştirmesinden harmonik uyarma oranına). 176

Şekil 4.23: Önerilen doğrusal olmayan model. 177

Şekil 4.24: Doğrusal olmayan model harmonik uyarmada toplanmış voltaj grafiği. 178

Şekil 4.25: ÇAM süspansiyonundan, frekans alanında dağıtılmış güc. 188

Şekil 4.26: ÇAM süspansiyonundan, kamyon hızına göre dağıtılmış güç. 188

Şekil 4.27: Frekans alanında YAM süspansiyonundan dağıtılan güç. 189

Şekil 4.28: Kamyon hızına göre YAM süspansiyonundan dağıtılan güç. 189

Şekil 4.29: Frekans alanı grafiklerinde ÇAM'den maksimum toplanan voltaj ve güç. 190

Şekil 4.30: Frekans alanı grafiğinde YAM'den maksimum toplanan voltaj ve güç. 191

Şekil 4.31: Kamyonun hızına göre ÇAM'den toplanan maksimum voltaj ve güç. 192

Şekil 4.32: Kamyonun çalışma hızları dahilinde ÇAM'den toplanan maksimum voltaj ve güç. 192

Şekil 4.33: Kamyonun hızına göre YAM'den toplanan maksimum voltaj ve güç. 193

Şekil 4.34: Kamyonun çalışma hızları dahilinde YAM'den toplanan maksimum voltaj ve güç. 193

Şekil 4.35: Ön lastik rastgele uyarma kaynağı MATLAB SIMULINK gösterimi. 195

Şekil 4.36: Arka lastik rastgele uyarma kaynağı MATLAB SIMULINK gösterimi. 196

Şekil 4.37: ÇAM A sınıfı yol rastgele uyarma giriş grafiği. 198

Şekil 4.38: ÇAM D sınıfı yol rastgele uyarma giriş grafiği. 198

Şekil 4.39: ÇAM G sınıfı yol rastgele uyarma giriş grafiği. 199

Şekil 4.40: ÇAM G sınıfı yol rastgele uyarma giriş grafiği. 199

Şekil 4.41: ÇAM sınıf A yol rastgele uyarma toplanan gerilimi (V). 200

Şekil 4.42: ÇAM sınıf A yol rastgele uyarma toplanan güç (W). 200

Şekil 4. 43: ÇAM sınıf D yol rastgele uyarma toplanan gerilimi (V). 201

Şekil 4.44: ÇAM sınıf D yol rastgele uyarma toplanan güç (W). 201

Şekil 4.45: ÇAM sınıf G yol rastgele uyarma toplanan gerilimi (V). 202

Şekil 4.46: ÇAM sınıf G yol rastgele uyarma toplanan güç (W). 202

Şekil 4.47: ÇAM sınıf H yol rastgele uyarma toplanan gerilimi (V). 203

Şekil 4.48: ÇAM sınıf H yol rastgele uyarma toplanan güç (W). 203

Şekil 4.49: YAM A sınıfı yol rastgele uyarma toplanan gerilim (V).....204

Şekil 4.50: YAM A sınıfı yol rastgele uyarma toplanan güç (W). 205

Şekil 4.51: YAM D sınıfı yol rastgele uyarma toplanan gerilim (V).....205

Şekil 4.52: YAM D sınıfı yol rastgele uyarma toplanan güç (W). 206

Şekil 4.53: YAM G sınıfı yol rastgele uyarma toplanan gerilim (V).....206

Şekil 4.54: YAM G sınıfı yol rastgele uyarma toplanan güç (W). 207

Şekil 4.55: YAM H sınıfı yol rastgele uyarma toplanan gerilim (V).....207

Şekil 4.56: YAM H sınıfı yol rastgele uyarma toplanan güç (W). 208

Şekil 4.57: ÇAM D Sınıfı rastgele uyarma, kamyonun hızına göre toplanan güç ve voltaj. .209

Şekil 4.58: ÇAM D Sınıfı rastgele uyarma, kamyonun gerçek çalışma hızlarında toplanan güç ve voltaj [20; 65km/s].....209

Şekil 4.59: YAM D Sınıfı rastgele uyarma, kamyonun hızına göre toplanan güç ve voltaj. .210

Şekil 4.60: ÇAM D Sınıfı rastgele uyarma, kamyonun gerçek çalışma hızlarında toplanan güç ve voltaj [20; 65km/s]. 210

Şekil 4.61: Tam araba modeli şematik gösterimi. 211

Şekil 4.62: Bir transfer fonksiyonu kullanarak TAM kütle simulink gösterimini. 221

Şekil 4.63: TAM yaylı kütle Bode büyüklük grafiği. 222

Şekil 4.64: TAM step yol giriş grafiği. 222

Şekil 4.65: TAM step yol girişi yaylı kütle yer değiştirme grafiği. 223

Şekil 4.66: TAM harmonik yol uyarma grafiği. 223

Şekil 4.67: TAM harmonik yol uyarma yaylı kütle yer değiştirme tepkisi. 224

Şekil 5.1: Yol sinüs dalgası genliğinin YAM'nin toplanan gerilim ve güç üzerindeki etkisi. 225

Şekil 5.2: Piezoelektrik yığın kuvvet faktörünün toplanan voltaj ve güç üzerindeki etkileri. 226

Şekil 5.3: Piezoelektrik yığın kapasitansının toplanan voltaj ve güç üzerindeki etkileri. 227

Şekil 5.4: Süspansiyon sönümleme katsayılarının etkisi. 229

Şekil 5.5: Yaysız sönümleme katsayılarının etkileri. 230

Şekil 5.6: Süspansiyon rijitlik katsayılarının toplanan güç ve gerilim üzerindeki etkileri. 231

Şekil 5.7: Yaysız rijitlik katsayılarının toplanan güç ve voltaj üzerindeki etkileri. 232

Şekil 5.8: Yaysız kütlenin toplanan güç ve voltaj üzerindeki etkileri. 233

Şekil 5.9: Yaylı kütlenin toplanan güç ve voltaj üzerindeki etkileri. 234

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Enerji toplama yöntemleri ve güç yoğunluklarının karşılaştırılması [19, 26, 33-35]. 6

Tablo 2.2: Dönüşüm mekanizmalarının faydaları ve sınırlamaları [38].....8

Tablo 2.3: Malzemelerin çağları [59]. 10

Tablo 2.4: Birkaç malzemenin Curie noktası [72-74]. 17

Tablo 2.5: Piezoelektrik malzemenin bünye denklemleri. 29

Tablo 2.6: Piezoelektrik malzeme türleri.....47

Tablo 2.7: PXE43'ün parametreleri. 51

Tablo 2.8: Rezonanslı ve rezonanssız transformatörlerin özelliklerinin karşılaştırılması.....58

Tablo 2.9: Kuvvet-gerilim analoji tablosu.....65

Tablo 2.10: Kuvvet-akım analoji tablosu. 65

Tablo 2.11: Sürüş kalitesi kriterleri [121].....119

Tablo 2.12: Ana piezolekrik enerji toplama sistemlerinin karşılaştırılması. 128

Tablo 4.1: Piezoelektrik yığının çeyrek araba modeli özellikleri.....158

Tablo 4.2: Çeyrek araba modeli parametreleri (777F Offroad Madencilik Damperli Kamyon). 159

Tablo 4.3: Yarım araba modeli piezoelektrik yığın özellikleri.....159

Tablo 4.4: Yarım araba modeli parametreleri (777F Offroad Madencilik Damperli Kamyon). 160

Tablo 4.5: Adım girişi yanıt özeti.....166

Tablo 4.6: ÇAM doğal frekansları.....168

Tablo 4.7: YAM doğal frekansları.....169

Tablo 4.8: ÇAM harmonik uyarma sonuçları. 175

Tablo 4.9: YAM harmonik uyarma sonuçları. 175

Tablo 4.10: Uzaysal referans frekansı $n0$=0.1m^{-1} için ISO 8608 yol pürüzlülük seviyeleri [162]. 196

Tablo 4.11: ÇAM rastgele uyarma grafiği tepe değerleri. 204

Tablo 4.12: YAM rastgele uyarma grafiği tepe değerleri. 208

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

a : hızlanma genliği

A_p : Yüzey alanı

α : kuvvet faktörü

b_s : Lineer viskoz damperin (araba gövdesi) yaylı sönümleme katsayısı.

b_{sf} : Ön yaylı sönümleme katsayısı

b_{sr} : Arka yaylı sönümleme katsayısı

b_{uf} : Ön yaysız sönümleme katsayısı (ön lastik)

b_{ur} : Arka yaysız sönümleme katsayısı (arka lastik)

b_{us} : Yaysız sönümleme katsayısı

C : Coulomb

C_p : Piezoelectric capacitance,

°C : Santigrat derece

dB : Desibel

D : Dielektrik uzanımı

E : Elektrik yoğunluğu

τ : Zaman gecikmesi (L/u)

f : zaman alanı frekansı

F : Farad

$G(n_0)$: Yol pürüzlülük katsayısı [m^2/m^{-1}]

H : Manyetik alan yoğunluğu

h_p : Piezoelektrik yığının bir tabakasının kalınlığı.

Θ_s : eğim veya açısal yer değiştirme ve sıçrama

k : Kaplin Faktörü

km : kilometre

K_p : Piezoelektrik yığının kısa devre rijitliği,

K_s : Yaylı rijitlik katsayısı (araba gövdesi)

K_{sf} : Ön yaylı rijilik katsayısı

K_{sr} : Arka yaylı rijitlik katsayısı

K_{us} : Yaysız rijitlik katsayısı (lastik)

K_{uf} : Ön yaysız rijitlik katsayısı (ön lastik)

K_{ur} : Arka yaysız rijitlik katsayısı (arka lastik)

L : Dingil mesafesi (m)

M : Manyetik polarizasyon

M_s : Yaylı kütle (araba gövdesi).

M_{uf} : Ön yaysız kütle

M_{ur} : Arka yaysız kütle

M_{us} : Yaysız kütle (lastik)

n : Uzay frekansı

n_0 : Uzay referans frekansı

P : polarizasyon

Q : Elektrik şarjı (Q)

s : Kompleks değişken (frekans alanı/s alanı)

S : Şekil değistirme

t : Zaman

T : Gerilme

u : Araba hızı

V_{AI} : İnversiyondan Sonra Gerilim

V_{BI} : İnversiyondan Önce Gerilim

W : Watt

Y_p : Yaylı ve yaysız kütle arasındaki nispi yer değiştirme

Y_R : Yol uyarımı

Y_s : Yaylı kütlenin dikey yer değiştirmesi (araba gövdesi)

Y_{uf} : Ön yaysız kütlenin dikey hareketi (ön lastik)

Y_{ur} : Arka yaysız kütlenin dikey hareketi (arka lastik)

Y_{us} : Yaylanmamış kütlenin (lastik) dikey yer değiştirmesi

Kısaltmalar	**Açıklama**
AC	: Alternating Current
ACIM	: Alternating Current Impedance Matching
BJT	: Bipolar Junction Transistor
CM	: Condition Monitoring.
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor

CRT : Cathode-Ray Tube
ÇAM : Çeyrek Araba Modeli (Quarter Car Model)
DC : Direct Current
DCIM : Direct Current Impedance Matching
DOF : Degree Of Freedom
EIA : Energy Information Administration
FET : Field Effect Transistor
MEMS : Micro-Electro-Mechanical Systems
MOSFET : Metal-Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor
MPB : morphotropic phase boundary
MSA : Magnetorheological Shock Absorbers
PLZT : Lead-Lanthanum Zirconate Titanate
PSD : Power Spectral Density
PTFE : Polytetrafluoroethylene
PVC : Polyvinyl Chloride
PVDF : Polyvinylidene Difluoride
PZT : Lead zirconate Titanate
RC : Reistor Capacitor
RLC : Resistor Inductor Capacitor
RMS : Root Mean Square
SECE : Synchronous Electric Charge Extraction
TAM : Tam Araba Modeli
TPMS : Tire Pressure Monitring System.
VSS : Vehicle Suspension System
YAM : Yarım Araba Modeli (Half Car Model)
ZVS : Zero Volta Switching

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DAMPERLİ KAMYONUN SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN PIEZOELEKTRİK ENERJİ HASADI ILE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Drissa Mohamed MALO

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Erol UZAL

Süspansiyon sistemi, yolların pürüzlülüğünden kaynaklanan darbeleri absorbe ederek, sürüş kalitesi ve konforunun sağlanmasına katkıda bulunan bir aracın en önemli bileşenlerinden biridir. Enerji toplama potansiyelinin altını çizen önemli bir enerji kaybına uğrayan parçalardan oluşur. Elastik süspansiyonlar, rijit amortisörler ve bozuk yol profilleri gibi parametrelerin kombinasyonu büyük miktarda Enerji sağlayabilmektetdir. Bu araştırma çalışmasının temel amacı, damperli kamyonların süspansiyon enerji toplama mekanizmalarının potansiyelini araştırmaya olanak sağlayacak bir matematiksel model geliştirmektir. Sürüş kalitesini ve konforunu korumak adına, piezoelektrik yığın ve süspansiyon yayı arasındaki bağlantı için bir seri bağlantı kullanılır. Piezoelektrik yığını olan ve olmayan çeyrek ve yarım kamyon modelleri matematiksel olarak modellenmiş ve hareket denklemleri türetilmiştir. Bu denklemlerin Laplace dönüşümleri, hem zaman hem de frekans alanında analiz için transfer fonksiyonlarını belirlemek için elde edildi. Simülasyonlar MATLAB Simulink yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar için üç farklı girdi türü kullanılmıştır. Bunlar step girişi, harmonik ve rastgele uyarmadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, karayolu damperli kamyon süspansiyon sistemlerinden piezoelektrik enerji hasadında büyük bir potansiyel olduğunu ortaya koymuştur.

Kasım 2022 , 264 sayfa.

Anahtar kelimeler: Enerji hasadı, piezoelektrik, damperli kamyon, süspansiyon sistemi, sönümleme, matematiksel modelleme, frekans alanı

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

MATHEMATICAL MODELING OF PIEZO ELECTRICAL ENERGY HARVESTERS ON HALF DUMP TRUCK MODEL

Drissa Mohamed MALO

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Programme of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Erol UZAL

The suspension system is one of the key components of a vehicle which contributes to providing the ride quality and comfort by absorbing shocks due to the roughness of the roads. It consists of parts which undergo significant energy dissipation underlining its energy harvesting potential. The combination of parameters such as elastic suspensions, stiff dampers and rough road profiles can supply a huge amount of Energy. The main purpose of this research work is to develop a mathematical model which will allow to investigate the potential of dump trucks' suspension energy harvesting mechanisms. For the sake of conserving the ride quality and comfort, a series arrangement is used for the connection between the piezoelectric stack and the suspension spring. The quarter and half truck models with and without incorporated piezoelectric stack were mathematically modelled and their motion equations were derived. The Laplace transforms of these equations were obtained in order to identify their transfer function for analysis in both time and frequency domain. Simulations were carried out by utilizing the MATLAB Simulink software. Three different types of inputs were used for the simulations. They are the step input, the harmonic and random excitation. The results obtained from this

study revealed that there is a great potential in piezoelectric energy harvesting from off highway truck suspension systems.

November 2022, 264 pages.

Keywords: Energy harvesting, piezoelectricity, dump truck, suspension system, damping, mathematical modeling, frequency domain

1. GİRİŞ

1.1. ÖNEM

Sanayi ve otomotiv sektörünün hızlı büyümesi nedeniyle enerji ihtiyaçları son yüzyıllarda önemli ölçüde artmıştır. Bu durum zamanla enerji krizlerinin çoğalmasına neden olmuştur. Dünyanın mevcut enerji sistemi, esas olarak çevreyi kirleten ve rezervleri sınırlı olan fosil yakıtlara dayanmaktadır. Bu nedenle, titreşimler nedeniyle kaybedilen enerjinin geri kazanılmasına yönelik artan bir ilgi gözlemlendi. Gerçekten de, çeşitli disiplinlerden bilim adamları, elektronik cihazlara güç sağlamak için ortam ve aeroelastik titreşimlerden enerji toplamak için sürdürülebilir teknikleri araştırmaktadir. Bu yeni teknikler, ekipman uzaktan durum izleme, sağlık izleme, aydınlatma vb. için kablosuz sensörler gibi sayısız uygulamayı mümkün kıldı [1].

Otomotiv ve iş makinaları sektörü, dünyanın en önemli ekonomik sektörlerinden biridir. Bu endüstri, çevre ve halk sağlığı üzerinde kötü bir etkisi olan araç emisyonları yoluyla hava kirliliğinin artmasıyla sonuçlanan son yıllarda bir patlama yaşıyor. Rekabetçi kalmak ve satışlarını artırmaya devam etmek için, üreticilerin temiz enerji kullanmak için yenilikçi yöntemler keşfederek araç kirliliğini kontrol etme ihtiyacı artmaktadır. Bu amaçla çeşitli yenilenebilir enerji türleri kullanılmaktadır [2]. Williams ve Yates'e göre [3], elektrik enerjisi dönüşüm sistemlerine yönelik üç ana titreşim türü vardır: piezoelektrik, elektromanyetik ve elektrostatik transdüksiyonlar. Basitlikleri, geniş frekansları ve muazzam güç yoğunlukları nedeniyle, araştırmacıların piezoelektriğe olan ilgisi yıllar içinde artmaktadır. Voigt [4], Rochelle tuzu, kuvars gibi çok sayıda doğal kristalin piezoelektrik etki gösterdiğini gözlemlemiştir. Ortam titreşimlerinden enerji toplamak içinö en temiz ve en çevre dostu tekniklerden biridir.

ABD Enerji departmanı tarafından bildirildiği üzere, aracı hareket ettirmek için fosil yakıt enerjisinin yaklaşık %14'ü kullanılımaktadır. Enerjinin geri kalanı esas olarak titreşimler ve ısı yoluyla kaybolmaktadır. Mevcut atık enerji toplama teknolojilerinin değerlendirilmesinde

çeşitli araştırmalar yapılmıştır [5, 6]. Piezoelektrik enerji hasadı, sera gazı emisyonunu azaltarak ve araçların enerji verimliliğini artırarak otomotiv endüstrisi için büyük bir potansiyele sahiptir [7]. Patel [8], piezoelektrik malzemelerin elektrik üretebileceğini ve aracın yakıt tüketimini en az %5 oranında azaltabileceğini ortaya koymuştur. Bir araçtan enerji toplamak için ana kaynaklar ısı kayıpları, titreşimler ve fren enerjisidir [9]. Günümüzde kamyonlarda, şu anda tek kullanımlık ve kirletici bataryalarla çalışan çok sayıda kablosuz CM (durum izleme) sensörleri bulunmaktadır. Piezoelektrik enerji, kamyon süspansiyon sisteminden toplanabilir ve TPMS sensörleri, araç hızı ve gerilim izleme sensörleri gibi kablosuz sensörlere güç sağlamak için şarj edilebilir bataryaları şarj etmek için kullanılabilir [10].

1.2. PROBLEM TANIMI

Petrol ürünlerini tüketen tüm ulaşım araçları, yakma ve yakıt ikmali çevrimleri sırasında çevre kirliliğine neden olmaktadır [11]. 2019 yılında, Enerji Bilgi İdaresi'nin (EIA) [12] bir raporu, ABD ulaşım sektörünün toplam enerji talebinin %91'inin petrol bazlı yakıtlardan karşılandığını ortaya koydu. Ancak bu enerjinin sadece küçük bir miktarı araç tarafından hareket etmek için kullanılmaktadır [5, 6]. Süspansiyon sistemi, ağırlığı desteklediği ve yol tutarsızlıklarını emerek sürüş kalitesi ve konforu sağladığı için kamyonların en önemli bileşenlerinden biridir [13]. Bu önemine rağmen, titreşim sönümleme yoluyla enerji kaybının ana kaynaklarından biridir. Velinsky ve White [14]'e göre, harcanan enerji miktarı aracın hızı, kütlesi, yay rijitliği, sönümleme katsayıları ve yol profili gibi çeşitli parametrelere bağlıdır.

Gerçekten de, amortisör ve rijitlik katsayısının artmasıyla birlikte aracın kütlesindeki artış, referans [15]'te gözlemlendiği gibi süspansiyon sisteminde daha yüksek enerji kaybına yol açar. Ayrıca, yol durumu, amortisörler aracılığıyla kaybolan enerji miktarını etkiler. Yol profili hem makro yapısal (uzunlamasına yol profili) hem de mikro yapısal (enine yol profili) olarak analiz edilebilir [16]. İlki, 25 – 120 km/s arasındaki bir araç hızında belirtilirken, ikincisi, tümsekler nedeniyle yolcular tarafından algılanan şokları temsil etiektedir. Mikroyapısal profilin süspansiyon sistemi üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu fark edilmiş. Wei ve Taghavifa çalışmalarında [17] rastgele uyarma konfigürasyonunda 04 yol yüzeyi kategorisini vurgulamışlar. Bu sınıflandırma, güç spektral yoğunluk (PSD) fonksiyonuna göre yapılmıştır. Bu yol kategorileri engebeli pist, düz pist, düz otoyol ve çakıllı otoyoldur. Düz ve çakıllı otoyol

konfigürasyonları arasında (sırasıyla 200W ve 2000W) önemli bir güç kaybı farkı gözlemlendi. Bu büyük boşluk, düz (0.75m/s) ve çakıllı (2m/s) yollar için süspansiyon sistemi hızının değişmesiyle açıklanabilir. Aynı araştırma çalışmasına göre, harmonik uyarıma maruz kalan bir arabanın süspansiyon sistemi, güç kaybını önemli ölçüde azaltıyor. Gerçekten de, 13 km/sa ve 39 km/sa hız için ortalama 57.84 W güç kaybı rapor edildi. Abdülkerem et al. [18], 20-50 km/s hızında, düz bir yolda geleneksel amortisörler tarafından dağıtılan gücün, en az bir tümseğe sahip bir yol için 40 – 140W'a karşılık 10 – 90W aralığında olduğunu ortaya koymuştur. Sözü edilen çalışmalardan elde edilen bulgular, mekanik titreşimler yoluyla boşa harcanan enerjinin ihmal edilemeyecek kadar az olduğunu şart koşmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışmanın temel amacı, titreşimleri faydalı elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla potansiyel VSS enerji toplamasını değerlendirmektir.

1.3. AMAÇ

Her şeyden önce, bu çalışmanın temel amacı, kamyon süspansiyon sistemi (VSS) için enerji toplama mekanizmalarını değerlendirmek için analitik (çeyrek ve yarım) kamyon modelleri oluşturmaktır. Bu çalışmanın ikinci amacı, araç, yol ve piezoelektrik parametre değişimlerinin toplanan güç ve potansiyel-fark üzerindeki etkisini araştırmaktır. Son olarak bu çalışma, modeller arasında bir karşılaştırma yapmayı amaçlamaktadır.

Yukarıdaki hedeflere ulaşmak için, VSS yayları ve piezoelektrik yığınları, harcanan enerji hasadı için seri olarak bağlanacaktır. Her model için, hareket denklemleri elde edilecektir. Zaman ve frekans alanında analiz edebilmek içinö matematiksel modellerin Laplace dönüşümünü de elde edilecektir. VSS'nin enerji toplama sistemi, Simulink kullanılarak her model için temsil edilecektir. toplanan enerjinin (güç ve potansiyel farkı) fiziksel niceliklerinin analizi, frekans ve zaman alanlarında gerçekleştirilecektir. Daha sonra değişken değişiminin çıkış gücü ve gerilimini nasıl etkilediğini gözlemlemek için araç, yol ve piezoelektrik parametreleri üzerinde bir çalışma yapılacaktır. Modellerin simülasyonları harmonik ve rastgele uyarım koşulları altında gerçekleştirilecektir.

1.4. TEZİN ANA BÖLÜMLERİ

Bu çalışma 6 ana bölümden oluşmaktadır; problem tanımı, araştırma hedeflerini içeren bir giriş ile başlamaktadır. İkinci bölüm, piezoelektrik malzemelere ve parametrelerine bir giriştir. Ayrıca, genel olarak mevcut piezoelektrik enerji toplama yöntemlerinin ve özel olarak VSS tabanlı piezoelektrik enerji toplama mekanizmalarının son teknoloji bir incelemesidir. Üçüncü bölüm, yarım ve çeyrek kamyon modelleri için hareket denklemlerinin türevlerini sunmaktadir. Denklemler hem yalnızca VSS hem de VSS + piezoelektrik yığını konfigürasyonlarında türetilmiştir. Daha sonra simülasyonları gerçekleştirmek için Laplace dönüşümleri elde edilecektir. Step girişi, harmonik ve rastgele uyarılar için zaman alanı ve frekans alanı analizleri yapılır. Toplanan voltaj ve gücün sonuçları dördüncü bölümde sunulmuştur. Beşinci bölüm, yol ve araba parametrelerinin sistem performansları üzerindeki etkilerini tartışmaktadır. Araştırmanın bulguları da tartışılmaktadır. Son olarak, sonuçlar çıkarılır ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulur.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. LITERATÜR TARAMASI

Bu referanslarda [19-26] gösterildiği gibi kirletici ve kıt petrol bazlı ürünlerin kullanımını önemli ölçüde azaltmak için geçmiş on yıllarda çok sayıda enerji toplama teknikleri araştırılmıştır. Yıldız [19], Cao ve Li [26] çalışmalarında en yüksek güç yoğunluğunu sağlayan enerji hasadı yönteminin doğrudan güneş ışığında (100 mW/cm3) güneş enerjisi hasadı olduğunu bildirmişlerdir. İç ortam koşullarında güç yoğunluğu 100 μW/cm3'tür. Bununla birlikte, piezoelektrik enerji toplama tekniği, yalnızca dış mekan kullanımına uygun olan güneş enerjisinin aksine, kullanım çok yönlülüğü nedeniyle en tatmin edici olanı olmaya devam etmektedir.

Ortamdan enerji toplamak, son yıllarda artan bir ilgi gören bir fikirdir. Doğada akışkan akışı kaynaklı titreşimler, hareket halindeki nesneler ve titreşen yapılar gibi çeşitli mekanik titreşimler mevcuttur. Titreşimler yoluyla kayda değer miktarda enerji israf edilmektedir. Bu dağılma, sürtünme ve ısı kaybı gibi çeşitli şekillerde meydana gelebilir. Bu harcanan enerjiyi faydalı elektrik enerjisine dönüştürmek için mevcut üç ana yöntem vardır. Piezoelektrik, elektromanyetik ve elektrostatik toplama mekanizmalarıdır. Piezoelektrik, önemli güç yoğunluğu, geniş frekans aralığı ve enerji hasadı projelerinde uygulanması nedeniyle en çok araştırmacıyı kendine çekmiştir. Ayrıca, piezoelektrik malzemelerin mevcudiyeti ve imalat kolaylığı, bu artan ilgiyi açıklayabilecek nedenlerden biridir.

Gerçekten de, piezoelektrik transdüksiyon en avantajlı mekanik titreşime dayalı enerji toplama tekniğidir [27-29]. Priya ve Inman [29], piezoelektrik toplanan gücün diğer iki transdüksiyon yönteminin çıkış gücünü üç katına çıkardığını doğruladı. Maksimum toplanan güç yoğunluğunu belirlemek için birkaç girişimde bulunuldu. Depsesse et al. [30], bir elektrostatik dönüştürücü aracılığıyla 584 μW/cm^3'lük bir güç yoğunluğunu elde edebilmişler. Saha et al. [31] araştırmalarında bir elektromanyetik jeneratör tasarlamışlar ve bundan elde edilebilecek maksimum güç yoğunluğunun 4375 μW/cm^3 olduğunu belirlemişlerdir. Jeon et al. [32], ince bir piezoelektrik filmden maksimum 37000 μW/cm3 güç yoğunluğunun elde edilebileceğini belirledi. Tablo 2.1'de gösterildiği gibi, sonuçlar açıkça göstermektedir ki piezoelektrik

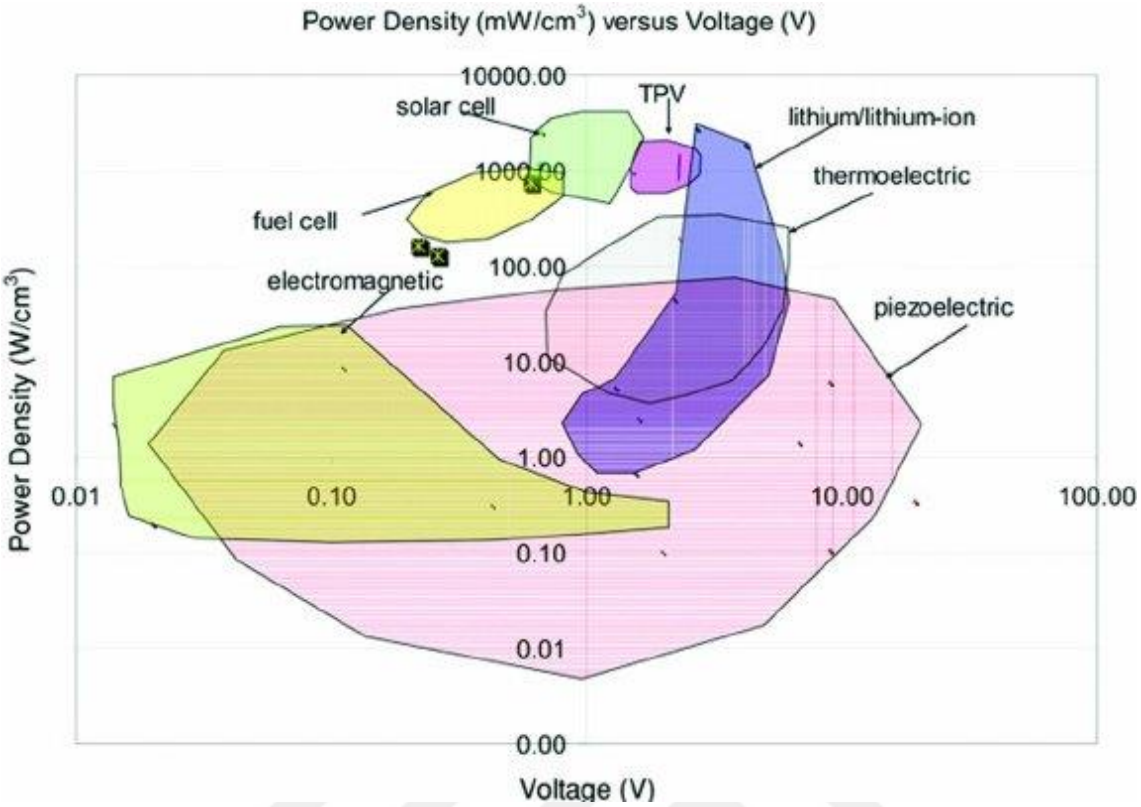
transdüksiyon en yüksek güç yoğunluğuna sahip en verimli mekanik titreşime dayalı enerji toplama yöntemidir.

Tablo 2.1: Enerji toplama yöntemleri ve güç yoğunluklarının karşılaştırılması [19, 26, 33-35].

Enerji kaynağı	Toplanan güç yoğunluğu
Güneş	100 mW/cm^3 (dış mekan) 100 μW/cm^3 (iç mekan)
Titreşimler	37 mW/cm^3 (piezoelektrik transdüksiyon) 4.3 mW/cm^3 (elektromanyetik transdüksiyon) 0.584 mW/cm^3 (elektrostatik transdüksiyon)
Rüzgâr	177 mW/cm^2
Termoelektrik	60 W/cm2
Sıcaklık gradyanı	15 μW/cm^3 at 10° C gradyan
Ortam Radyo Frekansı	1 μW/cm^2
Akustik ses	0.003 μW/cm^3 at 75 dB 0.96 μW/cm^3 at 100 dB

Gonzalez et al. çalışmalarında [36] piezoelektrik transdüksiyonun elektromanyetik tabanlı jeneratörlerden daha geniş bir frekans aralığı sağladığından bahsedilmiştir. Aslında, piezoelektrik malzemeler, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi diğer enerji toplama teknikleri ile karşılaştırıldığında voltaja karşı en büyük güç yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca, piezoelektrik enerji toplama yöntemi, diğer tekniklere göre faydalı gerilime dönüştürülecek daha az son işlem aşaması gerektiren daha yüksek bir voltaj çıkışı sunar. Aslında, piezoelektrik transdüksiyon, enerji dönüştürme işlemini başlatmak için harici bir polarizasyon kaynağı (genellikle değişken kapasitörler) gerektiren elektrostatik transdüksiyonun aksine, doğrudan ve herhangi bir ek voltaj enjeksiyonu olmadan kullanılabilen önemli miktarda enerji üretmektedir.

Bu avantajlara ek olarak, piezoelektrik malzemeler, mevcut alandan bağımsız olarak çeşitli uygulamalarda uygulanabimektedir. Bu malzemeler, ince filmlerden kalın filmlere ve temelden karmaşık şekillere uzanan çeşitli formlarda mevcuttur. Buna karşılık, elektromanyetik dönüştürücüler, elektromıknatıslar için çok sayıda düzlemsel bobin dönüşüne sahip olma gerekliliği ve kalıcı mıknatısların (manyetik alanı iç yapıları tarafından oluşturulan malzemeler) standart altı özelliklerinden dolayı genellikle hacimlidir [1].



Şekil 2.1: Farklı enerji toplama tekniklerinin güç yoğunluğu ve voltaj karşılaştırma grafiği [37].

Aljadiri et al. araştırma çalışmalarında [38] farklı titreşime dayalı enerji toplama tekniklerinin yararları ve sınırlamalarından bahsettiler. Elektromanyetik transdüserler, herhangi bir ekstra voltaj girişi olmadan çalışma yeteneğine sahiptir ve herhangi bir mekanik kısıtlamaya tabi değildir. Ayrıca, yüksek çıkış akımı sağlayabilirler. Buna karşılık, düşük voltaj çıkışı sunarlar ve mikro yapısal uygulamalarda kullanıldıklarında düşük performans gösterirler. Buna ek olarak, Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) üretim prosedürleri ile entegre edilmeleri zordur. Karşılaştırıldığında, elektrostatik dönüştürücüler MEMS üretim prosedürleriyle kolayca entegre edilebilir ve yüksek voltaj çıkışı sağlayabilir. Bununla birlikte, mekanik kısıtlamaların varlığı, harici voltaj girişi ihtiyacı ve düşük çıkış akımı gibi dezavantajlar sergilerler. Piezoelektrik jeneratörlerin basit olmaları, herhangi bir harici voltaj girişi olmadan çalışabilmeleri, geniş frekans aralığı ve çeşitli uygulamalarda kullanım kolaylığı gibi en fazla avantajı sunduğu Tablo 2.2'de fark edilebilir.

Piezoelektrik transdüksiyon yoluyla toplanan enerji, kablosuz sensörler, aydınlatma ve pil şarjı gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir [1]. Azalan maliyetleri, artan hassasiyetleri ve radyo frekans teknolojisindeki gelişmeler sayesinde sensörlerin tarımda kullanımı son yıllarda popüler hale gelmiştir [39]. Örneğin, sensörler seralara, tarım makinelerine, tarlalara veya çiftlik hayvanlarına kurulabilir. Tarımsal gıdada kablosuz sensörlerin kullanılması, çiftçilerin üretkenliğini artıran zorlu ortamlarda veri toplamaya ve durum izlemeye olanak tanır. Ipema ve diğerleri [40], Nadimi ve diğerleri [41] inekleri izlemek ve hayvan varlığı, mera süresi ve vücut ısısı ölçümleri gibi verileri toplamak için kablosuz teknolojiyi kullandı. Endüstriyel otomasyonu desteklemek ve sürekli artan talebi karşılamak için endüstriyel sektörde uzaktan kablosuz sensörlerin kullanımı geliştirilmiştir.

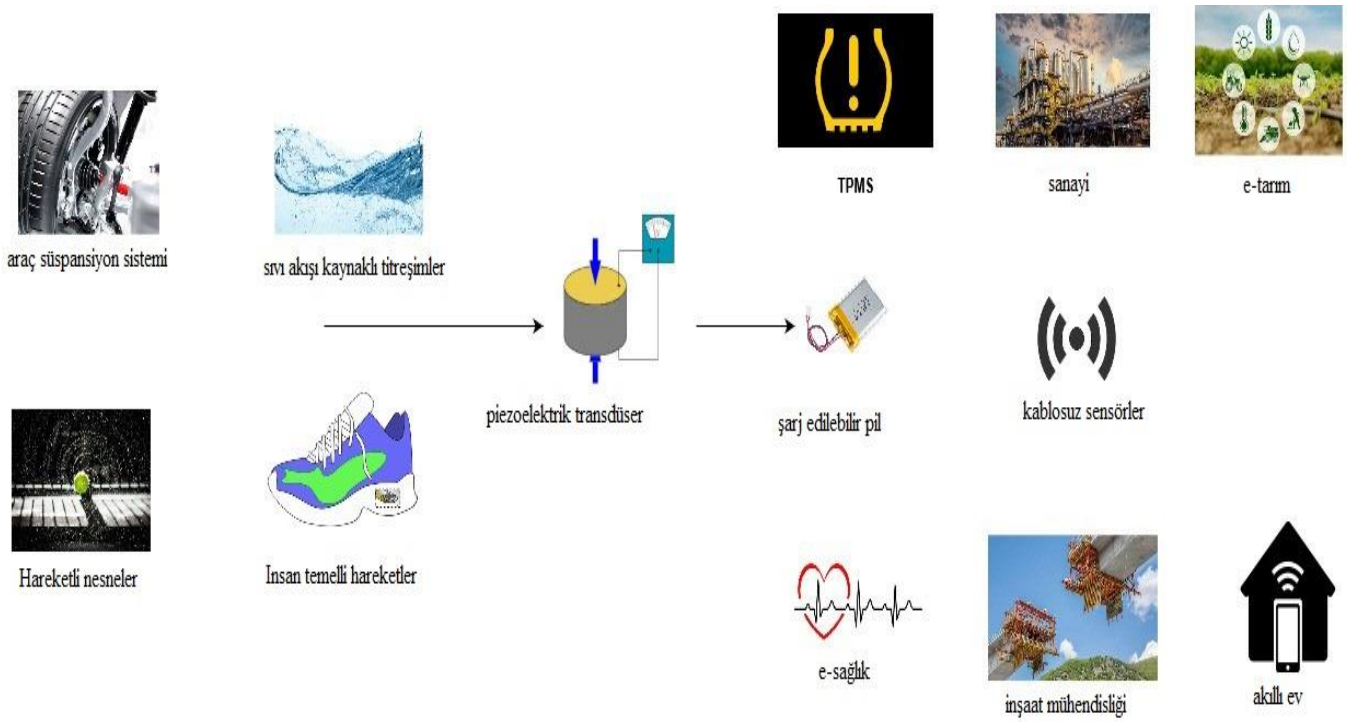
Tablo 2.2: Dönüşüm mekanizmalarının faydaları ve sınırlamaları [38].

Transdüksiyon türü	**Piezoelektrik**	**elektromanyetik**	**Elektrostatik**
MEMS uyumluluğu	Uyumlu	uyumlu değil	Uyumlu
Frekans aralığı	geniş	Dar	Dar
Mekanik kısıtlamalar	gerekli değil	gerekli değil	gerekli
Harici voltaj	gerekli değil	gerekli değil	gerekli
çıkış akımı	düşük	Yüksek	düşük

Chen et al. kablosuz sensörler ve aktüatör ağları ile kontrol sistemlerinin entegrasyonu üzerine bir araştırma çalışması [42] gerçekleştirdi. Yenilikçi, işbirlikçi ve dağıtılmış bir tahmin yaklaşımı önerildi. Sonuçlar, kontrol hedeflerine ulaşıldığını gösterdi. Christin et al. endüstriyel uygulamalarda kablosuz sensör kullanımının kabul edilmesinin karşılaştığı zorluklar üzerine bir anket [43] gerçekleştirdi. Değerlendirmenin sonuçları, açık konuların belirlenmesini ve tartışılmasını sağladı. Sensörlerin yaygınlaşması, tıp sektörüne uzaktan hasta izleme alanında bir devrim sağladı.

Ko et al. çalışmalarında [44] kablosuz sensör ağlarının sağlık sektöründeki ana uygulamalarını gözden geçirdiler. Kişisel verilerin gizliliği ve güvenliği ile ilgili temel zorluklar tartışıldı. Ayrıca, bu zorlukların kaynak eksikliği nedeniyle daha da kötüleştiğinin altını çizdiler. Mevcut araştırma çalışmalarının zorluklarının yanı sıra fizyolojik ve davranışsal izleme için prototip sistemleri tanımlandı. Ayrıca, sensörlerin kullanımı askeri ve sivil uygulamalarda bir patlama yaşadı.

Garcia-Hernández et al. [45] kablosuz sensör ağları ve uygulamaları üzerine bir araştırma yapmıştır. Düşük maliyetleri ve esneklikleri, uzaktan algılama için yenilikçi ve yeni uygulama alanlarının bulunmasına olanak tanır. Köprülerden kalan kablolar, köprülerin yapısal bütünlüğü için hayati öneme sahiptir ve bu referansta bildirildiği gibi sensörler olarak poliviniliden diflorür (PVDF) filmleri kullanılarak gerilimleri izlendi [46]. Chalard ve ark. araştırma çalışmalarında [47] kablosuz sensör cihazlarının zorluklarını ve teşvik edici uygulamalarını araştırdı. Şekil 2.2. Piezoelektrik enerji hasadı ve ana uygulamalarını gösterir.



Şekil 2. 2: Piezoelektrik enerji hasadı ve ana uygulamaları [48-57].

2.2. PIEZOELEKTRİK ENERJİ TOPLAMASI

Malzemeler, insanlık tarihinde ve medeniyetlerde çok önemli bir rol oynamıştır [58]. Tarihin önemli dönemlerine bu dönemlerin baskın malzemelerinin isimlerinin verilmesinin nedeni budur. Örneğin, Taş Devri, keskin uçlu silahlar ve aletler yapmak için taşın yaygın olarak

kullanılmasıyla karakterize edilen tarih öncesi bir dönemdir. Bronz ve Demir Çağları da sırasıyla bronz ve demirin yaygın olarak kullanıldığı dönemlerdir. İçinde bulunduğumuz çağ Sentetik Malzeme Çağı olarak bilinir ve plastiklerin, alaşımların, kompozitlerin ve olağanüstü özelliklere ve performansa sahip diğer malzemelerin yapıldığı dönemdir. Akıllı Malzemeler Çağı, biyoteknoloji ve nanoteknoloji gibi mühendislik disiplinlerinin ilerlemeleriyle de ayırt edilebilir. Akıllı malzemeler hem sensörlerin hem de aktüatörlerin rolünü oynar. Çevrelerindeki parametre değişikliklerini algılama, harekete geçirme ve bunlara yanıt verme konusunda tamamen yeteneklidirler. Optik fiber seramikler, polimerler vb. gibi çeşitli malzemeler bu özelliklere sahiptir.

Tablo 2.3: Malzemelerin çağları [59].

çağ	**Dönem**
Taş Devri	MÖ 2500000 - MÖ 3200
Bronz Çağı	MÖ 3200 - MÖ1200
Demir Çağı	MÖ 1200 - MS 100
Cam Çağı	1300'ler – şimdiye kadar
ortaçağ	5. - 15. yüzyıl
Çelik Çağı	1800'ler - şimdiye kadar
Alüminyum Çağı	1800'ler - şimdiye kadar
Plastik	1907 - şimdiye kadar

Mini elektroniklerin sürekli küçülen boyutu, çalışması için hiçbir harici enerji girdisine ihtiyaç duymayan otonom cihazlar geliştirmek için yeni teknikler üzerine araştırma çalışmalarını güçlendirdi [37]. Piezoelektrik enerji toplama yöntemi, en uygun ve karlı titreşim tabanlı mekanikten elektrik enerjisine toplama tekniği olduğu için büyük ilgi görmüştür. Bu, muazzam güç yoğunluğu ve çeşitli uygulamalarda uygulama kolaylığı ile açıklanabilmektedir.

Bu bölüm, piezoelektrik özelliklerinin bir girişini takip eden piezoelektrik geçmişinin bir incelemesi ile başlar. Son olarak terminoloji ve lineer piezoelektrik matematik teorisi sunulmuş.

2.2.1. Piezoelektrik Tarihi

Piezoelektrik terimi, Yunanca baskı anlamına gelen “piezein” ifadesinden türetilmiştir. Piezoelektrik kavramı, 1880'de Jacques ve Pierre Currie tarafından tek kristallerin yüzey

yüklerinin ölçümü üzerine deneysel araştırmalar yoluyla keşfedildi [60]. Kuvars, turmalin ve sodyum potasyum tartarat gibi bazı doğal malzemelerin piezoelektrik özellikler gösterdiği bulunmuştur [61]. Gerçekten de insanoğlu yıllarca bilinçsizce piezoelektrik kullandı (taş devrinde ateş üretmek için kullanılan bir tür kuvars olan çakmaktaşı). Buna ek olarak, çakmaktaşı çok iyi bir kesme özelliği gösterir ve alet ve keskin silah yapımında kullanılırdı. Aslında, çakmaktaşının "daha hafif" özelliği, alet ve silah üretim sürecinde tesadüfen keşfedildi [59]. Bu etkiyi sergilemelerini sağlayan kristallerin asimetrisidir. Kristallere bir sıkıştırma veya çekme gerilimi uygulandığında, pozitif ve negatif yüklerin ayrışması meydana gelir ve bu da kristallerin kutuplaşmasına yol açar [62]. Bu malzemeler, mekanik deformasyona maruz kaldıklarında yük oluşturma yeteneğine sahiptir. Çıkış akımının yoğunluğu ve yönü, mekanik stres veya gerinmenin yönüne ve büyüklüğüne bağlıdır. Bu malzemelere stres uygulanmadığında, negatif ve pozitif yük polarizasyonu nedeniyle kristaller nötr yüklere sahiptir. Bu durumda kristaller dipol momenti verir. Ancak bu malzemelere stres uygulaması

Doğrudan ve ters piezoelektrik etkiler olmak üzere iki piezoelektrik etki vardır. Doğrudan etki, basıncın piezo elektrik malzemeleri aracılığıyla elektrik üretmesidir; mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu, jeneratörler ve sensörler tarafından kullanılan etkidir. Potansiyel-farklılığın malzemelerin genişlik ve uzunluk varyasyonlarına neden olması durumunda, bunun tersi piezoelektrik etkidir; elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu, piezoelektrik aktüatörlerin konfigürasyonudur. Ters piezoelektrik etki, 1881'de Lippman tarafından termodinamiğin temel ilkeleri kullanılarak matematiksel olarak çıkarıldı.

Piezoelektrik malzemelerin ilk uygulamalarından biri 20. yüzyılda askeri sektörde olmuştur. Birinci Dünya Savaşı sırasında, Langevin ve araştırma ekibi 1917'de denizaltı tespiti için bir kompozit ultrasonik dönüştürücü geliştirdi. Bu dönüştürücü, iki çelik levha arasına yerleştirilmiş kuvars kristallerinden oluşuyordu. Set su geçirmez bir kasaya monte edildi. 50 kHz'lik bir rezonans frekansına ulaşabildiler. Savaşın bitiminden sonra önceden yaylı yüksek frekanslı bir sesin dönüş yankısını zamanlayarak derinlik ölçme hedeflerine ulaşabildiler. Bu buluş, ultrasonik dönüştürücülerin ve sistemlerin geliştirilmesinde bir dönüm noktasını temsil eder. Polikristal piezoelektrik malzemelerin keşfi, bu cihazların performanslarını iyileştirmeye izin verdi.

İkinci Dünya Savaşı sırasında Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Sovyet ve Sosyalist Cumhuriyetler Birliği gibi süper güçler, aktüatör malzemelerinin iyileştirilmesine yönelik araştırma çalışmalarını finanse etti. Metalik oksit tozlarının sinterlenmesiyle elde edilen bazı yapay polikristal malzemelerin (seramik ferroelektrikler), baryum titanat gibi yaygın kesme kristallerinden 100 kat daha fazla dielektrik sabitleri gösterdiği bulunmuştur. Bununla birlikte, kristallerin rastgele dağılımı, makroskopik piezoelektrik etki göstermesine izin vermedi. 1946'da Cady [63], bu tür polikristal malzemelerin, bir elektrik alanına maruz kalma olan kutuplama yoluyla makroskopik piezoelektrik malzemeleri elde edebileceğini belirtti. Olağanüstü performansa sahip piezoelektrik malzemelerin bu yenilikçi üretim tekniği, piezoelektrik cihazları geliştirmeye yönelik araştırma çabalarını yönlendirdi.

Kurşun zirkonat titanatın (PZT) keşfi 1954 yılında Jaffe ve diğerleri tarafından yapılmıştır. [64]. Bu malzeme, geliştirilmiş piezoelektrik özellikler gösterir. PZT'nin en önemli avantajlarından biri, faz diyagramını karakterize eden morfotropik faz sınırıdır (MPB). PZT'nin bu özelliği, birkaç uygulamada kullanılmasına izin veren özelliğidir. Özelliklerini geliştirmek için Basic PZT ile yeni katkı maddeleri karıştırılmıştır.

1969'da, tek eksenli olarak çekilmiş poliviniliden diflorürün (PVDF) kutuplanması, etkileyici piezoelektrik ve piroelektrik özellikler elde etmesine izin verdi. Polivinil klorür (PVC) ve Naylon gibi diğer plastik malzemelerin piezoelektrik etkiler göstermesine rağmen, PVDF kadar iyi performans göstermediği de keşfedildi.

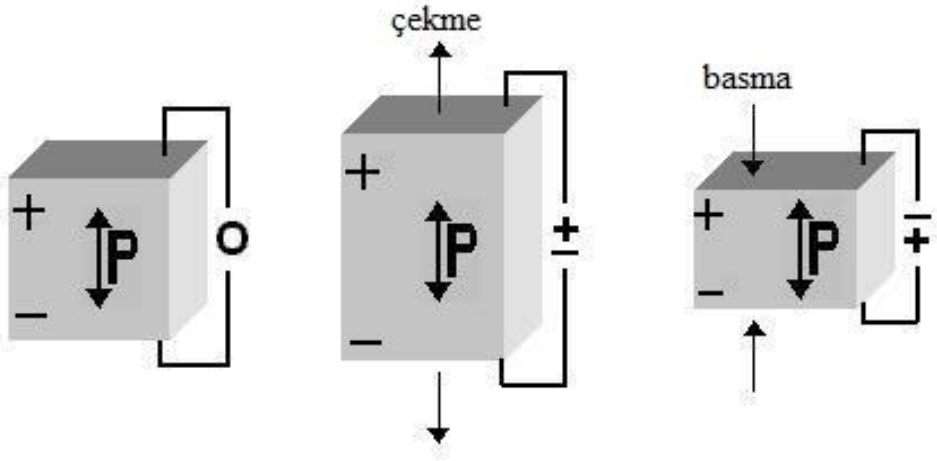
2.2.2. Piezoelektrik Özellikler.

Piezoelektrik malzemelerdeki elektromekanik bağlantı, mekanik (gerilme: S, stres: T, vb.) ve elektrik (elektrik yer değiştirme / akı, elektrik alanı: E, polarizasyon: P) değişkenleri arasındaki mevcut ilişkidir.

2.2.2.1. Doğrudan ve Dolaylı Piezoelektrik Etkiler

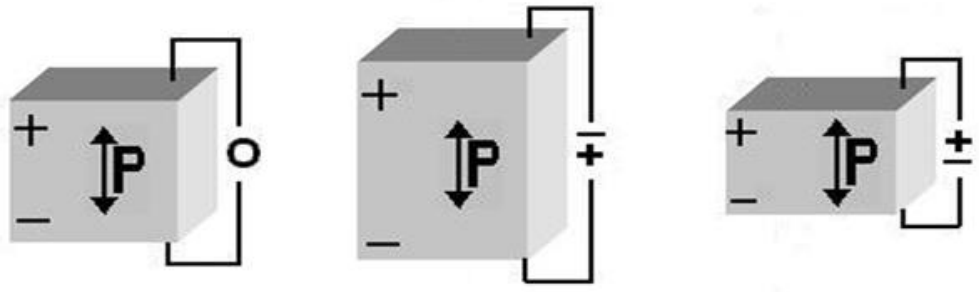
Piezoelektrik transdüksiyon, mekanik enerjinin (basınç, titreşimler) elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Piezoelektrik malzemeler kuvvetlere maruz kaldığında, yüzey yükü indüksiyonu nedeniyle elektrik alanı oluşturulur. Bu indüksiyonun nedeni dielektrik yer değiştirmedir. İki elektrot (üst ve alt) arasındaki potansiyel farkı, elektrik voltajı olarak bilinir. İki elektrot arasında bağlantı yapılması durumunda her iki yüzeyin (elektrotların) yükleri

arasında elektrik akımı oluşturan bir denge kurulur. Bu elektrik akımı nesline doğrudan piezoelektrik etki denir.



Şekil 2.3: Doğrudan piezoelektrik etki [65].

Tersine, bir piezoelektrik malzemenin bir elektrik alanına maruz kalması, malzeme yapısında gerilmenin ortaya çıkmasına neden olur. Bu bozulma kristal boyutlarının değişmesine neden olur [65]. Uygulanan elektrik alanının yönünün tersine çevrilmesi, sergilenen gerinmenin yönünün değişmesine neden olacaktır. Ters piezoelektrik olarak adlandırılır ve hem dinamik (mekanik kısıtlamaların yokluğunda serbest yer değiştirme, bir miktar gerinim sergilenir) hem de statik (mekanik kısıtlamalar/blokajlar olduğunda, gerinim yerine bir kuvvet görünür) kullanılabilir.



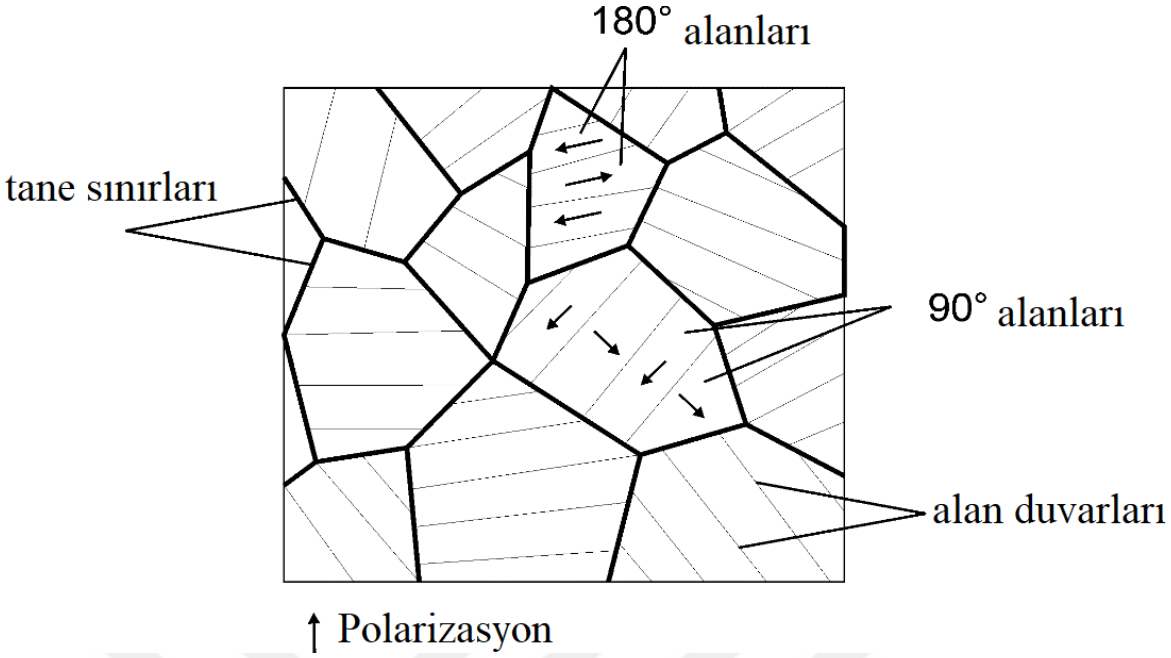
Şekil 2.4: Ters piezoelektrik etkisi.

Piezoelektrik etkinin kaynağı, mekanik gerilim nedeniyle elektrik dipolleri oluşturan hücrelerin asimetrisidir. Elektrik dipollerinin oluşumu, mekanik bozulma (doğrudan etki) nedeniyle kristalin yüzeyinde net bir polarizasyona neden olur. Polarizasyon ve uygulanan mekanik stres arasındaki ilişki yarı doğrusaldır. Ayrıca, sıkıştırma ve çekme kuvvetleri/gerilmeleri, zıt polarizasyona sahip voltajlar ve elektrik alanları üretir. Bu ilişki karşılıklıdır ve bir piezoelektrik kristalin bir elektrik alanına maruz kalması durumunda, yönleri ve büyüklükleri uygulanan elektrik alanının polaritesine ve yoğunluğuna bağlı olan mekanik gerilimlere/gerilmelere maruz kalacağı anlamına gelir (ters etki). Bu, kristalin uzunluğunun artmasına ve azalmasına neden olacaktır [66].

Çeşitli doğal ve sentetik tek kristal malzemeler piezoelektrik özelliklere sahiptir ve kristal yapı ile karakterize edilirler. Kristaller birbirlerine iyonik bağlarla bağlanır. Kuvars, harici mekanik gerilim/gerilme veya elektrik alanının iptal edilmesinden sonra yapısında hiçbir polarizasyon kalmaması bakımından benzersizdir. Kuvarstan farklı olarak, baryum titanat, Rochelle tuzu, topaz, turmalin vb. gibi diğer tek kristalli piezoelektrik malzemeler, harici mekanik veya elektrik alanın kaldırılmasından sonra bir miktar kalıntı polarizasyon sergiler. Histerez, bir sistemin mevcut durumunun, geçmişine ve önceki tedavilere ve geçtiği durumlara bağlı olduğu zamandır. Bu tek kristal malzemeler, kalan polarizasyon ters bir elektrik alanı kullanılarak tersine çevrildiğinde bir histerezis alanına maruz kalır. Bu durumda ferroelektrik olurlar.

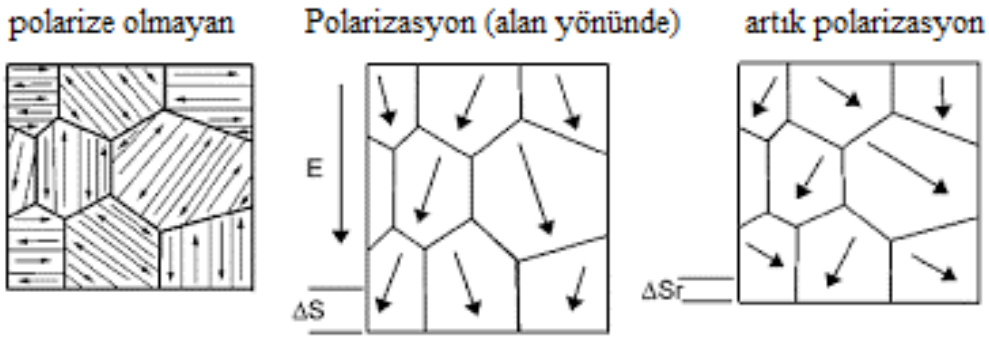
2.2.2.2. Kristallerin Ferroelektrik Etki Alanları ve Poling

Ferroelektrik kristallerde bir dizi tek tip polarizasyon bölgesi vardır. Bu bölgeler ferroelektrikler veya Weiss alanlarıdır. Bir alanın özelliği, tüm elektrik dipollerinin aynı yönü göstermesidir. Aynı kristalde çok sayıda alan bulunabilir ve bunlar alan duvarları ile ayrılır. Alanların polarizasyon vektörleri birbirine dik açıda (90°) veya antiparaleldir (180°), sırasıyla 90° ve 180° alan duvarları oluşturur (Şekil 2.5). Bir kristaldeki tüm ferroelektrik alanlar, kutuplama işlemi (yüksek bir elektrik alanına maruz kalma) yoluyla tek bir alana birleştirilebilir.



Şekil 2.5: Piezo seramik kristalleri, alanlar ve alan duvarları [67].

Kutuplamadan önce, PZT gibi ferroelektrik seramikler, ferroelektrik alanların rastgele yönelimleri nedeniyle herhangi bir piezoelektrik özelliğe sahip değildir. Kutuplama, Weiss alanlarını uygulanan elektrik alanıyla aynı yönde yönlendirmek veya yönlendirmek için yüksek bir elektrik alanının uygulandığı bir işlemdir. Kutuplama işlemi boyunca, kristallerin alanları işaret etmeye zorlanır. Bununla birlikte, kristalin veya tanenin geometrisi elektrik alanı ile aynı yönde hizalanmadıkça (Şekil 2.6'da gösterildiği gibi) polarizasyon vektörleri alan yönüne tam olarak paralel olamaz. Alan, kristallerde bir miktar gerginliğe (ΔS) neden olur. Elektrik alanının kaldırılmasından veya iptalinden sonra, kristallerde (ΔSr) bir miktar kalıntı polarizasyon ve gerinim vardır. Alanlarda polarizasyon yönünü tersine çevirmek için çok güçlü bir elektrik alanı uygulanabilir. Bu işleme anahtarlama denir.



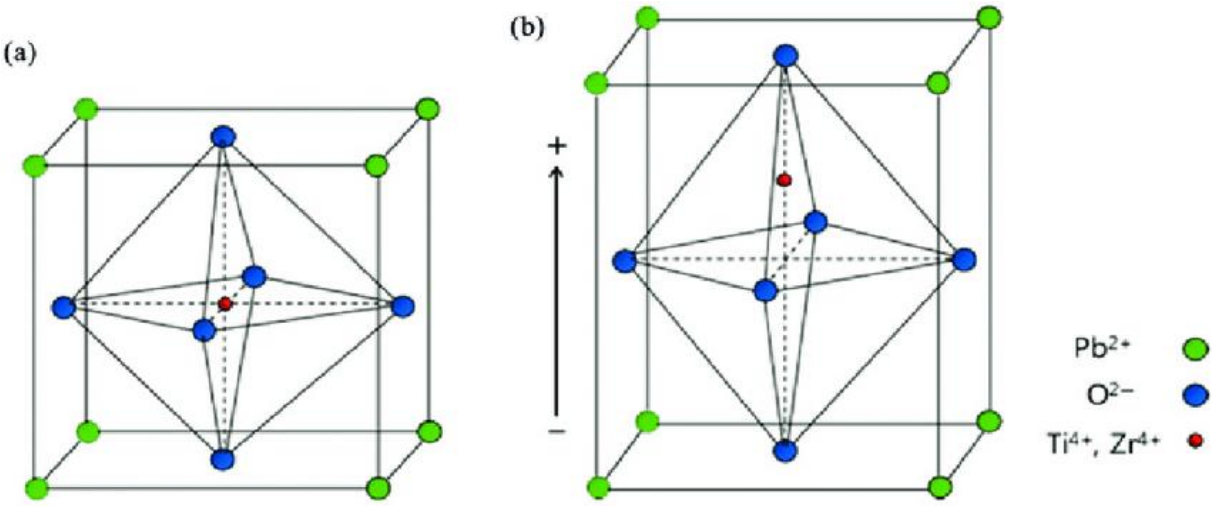
Şekil 2.6: Kurşun zirkonat titanatın kutuplama işlemi [68].

2.2.2.3. Curie Sıcaklığı

Ferroelektrikler, piezoelektrik özellikleri sayesinde algılama sektöründe çok talep görmektedir [69]. Curie sıcaklığı, üzerinde ferroelektrik malzemelerin piezoelektrik özelliklerini kaybettiği noktadır. Bu ferroelektrikler, bu fenomen nedeniyle düşük sıcaklık uygulamalarıyla (< 800°C) sınırlıdır. Ferroelektriklerin farklı curie noktalarına sahip olduğuna dikkat edilmelidir. Her materyalin kendine ait bir curie noktası vardır. Ferroelektrik (Curie noktasının altında) ve ferroelektrik olmayan fazlar vardır. Faz geçişi Curie noktasında yapılır. Birkaç ferroelektrik faz varsa, bir ferroelektrik fazdan diğerine geçiş, geçiş sıcaklığı denilen bir sıcaklıkta yapılır.

Perovskit terimi, perovskite [70] olarak adlandırılan mineralinkine yakın bir kristal yapıya sahip herhangi bir malzemeyi belirtir. Ağırlıklı olarak kalsiyum titanat oksitten ($CaTiO_3$) oluşan bu mineral, ilk olarak 1839'da Rusya'da Alman mineralog Gustavus Rose tarafından keşfedildi. Daha sonra malzemeye Rus mineralog Perovski'nin adı verildi.

Şekil 2.8 (a)'da gösterildiği gibi, PZT birim hücresi, te Curie noktasının üzerinde simetrik bir kübik yapıya sahiptir. Şekil 2.8 (b), Pb^{2+} ile Curie sıcaklığının altındaki PZT'nin dörtgen hücre birimi yapısını gösterirken, Ti^{4+} / Zr^{4+} O^{2-} iyonlarına göre hareket etmiştir [71].



Şekil 2.7: PZT'nin perovskit yapısı (birim hücre) kür sıcaklığının üstünde (a) ve altında (b) [71].

Tablo 2.4: Birkaç malzemenin Curie noktası [72-74].

Malzemeler	**Curie noktası**
Ba $(Co, Zr)_{0.4}$ $Fe_{11.6}$ O_{19}	426
Ba $(Co, Zr)_{1.2}Fe_{10.8}O_{19}$	330
Ba $(Co, Zr)_{2.0}Fe_{10.0}O_{19}$	219
$BaFe_{12}O_{19}$	453
Ba $(Ni, Zr)_{0.4}$ $Fe_{11.6}$ O_{19}	434
Ba $(Co, Zr)_{1.2}Fe_{10.8}O_{19}$	374
Ba $(Co, Zr)_{2.0}Fe_{10.0}O_{19}$	315
$Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST)	0'dan 120'ye kadar doğrusal
$BaTiO_3$	125(tane boyutuna göre değişken)
α-Fe	770
ε'-$Fe_{2.2}C$ (hcp)	450
χ-Fe_5C_2 (monoklinik)	257
Θ-Fe_3C	212
Ga(Mn)As	-100
$K_xNa_{1-x}NbO_3$ (KNM) (perovskit)	410
$Li_2Ge_7O_{15}$ (lityum heptagermanat, LGO)	20
25% Mn-HfO_2	300
Mn-ZrO_2	390
$NaNbO_3$ (sodyum niyobat)	63
$NH_4H_2PO_4$	-125
$PbZrO_3$ (Kurşun Zirkonat, PZ)	233
$PbTiO_3$	490
$ZnTiO_3$	5.0
$Zn(Zr_{0.01}Ti_{0.99})O_3$	11.5
$Zn(Zr_{0.05}Ti_{0.95})O_3$	13.0
$Zn(Zr_{0.10}Ti_{0.90})O_3$	13.5
$Zr_{1-x}Mn_xO_{2-y}$	–400'den 600'e

2.2.2.4. Ferroelektrik Malzemelerin Dielektrik Histerezis Çevrimi

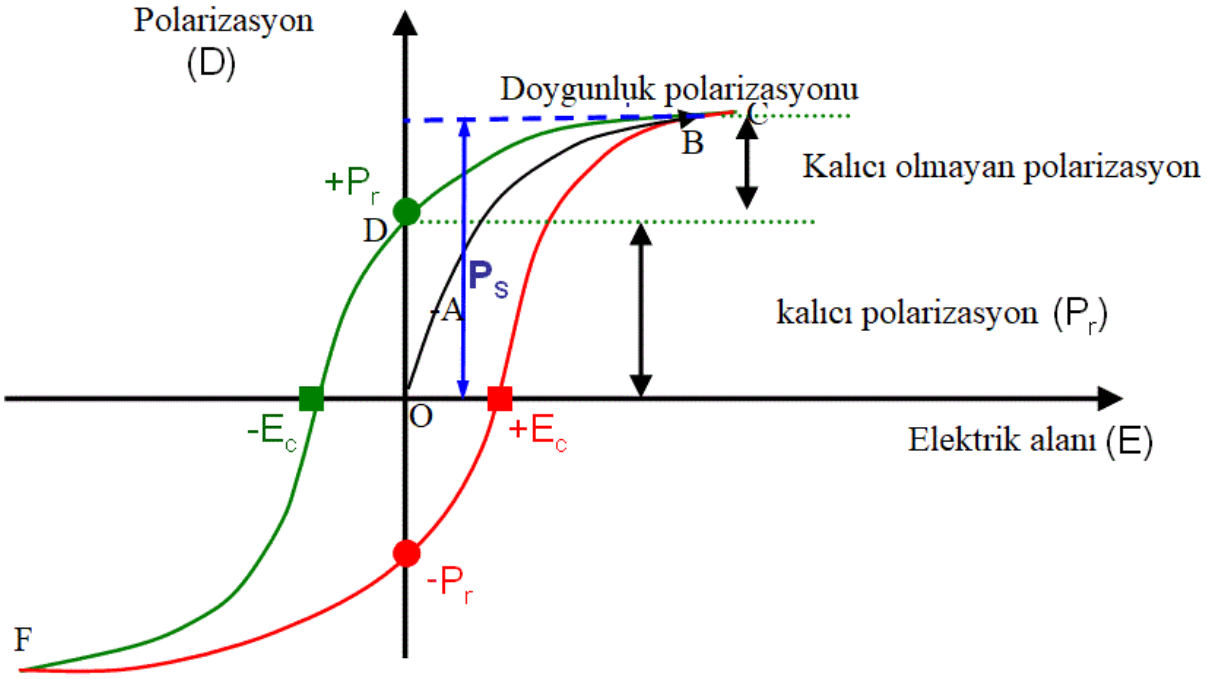
Ferroelektriklerin dielektrik histerezis fenomeni, elektrik polarizasyonu (P) gibi değişen fiziksel niceliklerin etkisi ile bu değişimin etkisi (bu durumda, polarize edici elektrik alanındaki değişiklik) arasındaki gecikmeyi temsil eder. Başka bir deyişle, sistemin tepkisi, yalnızca dış değişimin mevcut yoğunluğuna veya büyüklüğüne değil, aynı zamanda sistemin geçmişine de bağlıdır. Bu fenomen ilk olarak Vasalek tarafından 1921'de araştırma çalışmasında bildirilmiştir [75]. Bu tür histerezisin manyetik olana oldukça benzer olduğunu gözlemledi. Manyetizasyon veya manyetik polarizasyon (M), manyetik alan yoğunluğu (H), manyetik alan yoğunluğu (B), polarizasyon (P), elektrik alanı / yoğunluğu (E) ve dielektrik yer değiştirme veya elektrik akı yoğunluğu ile değiştirilebilir. (D), sırasıyla. Kristalin x eksenine paralel yönündeki elektrik yer değiştirmesinin D'nin sadece mevcut elektrik alanına (E) değil, aynı zamanda önceki değerlerine de bağlı olduğunu buldu [76].

Polarizasyon (P) ile dielektrik yer değiştirme veya elektrik akı yoğunluğu (D) arasında doğrusal bir ilişki vardır ve denklem (2.1)'de gösterildiği gibi doğrusaldır.

$$D_i = P_i + \varepsilon_0 . E_i \quad (2.1)$$

Burada i, 3 eksenden (x, y, z) herhangi birini temsil eder; ε_0, 8.854 x 10^{-12} F/m (Farad/metre) boş alanın geçirgenliğini temsil eder.

Ferroelektriklerdeki polarizasyon, bu malzemelerin alan değiştirmesine karşı direnç nedeniyle histeriktir. P ve D, E'nin lineer olmayan fonksiyonları olarak kabul edilebilir. Ayrıca, malzemenin önceki geçmişine göre değişebilirler. P fonksiyonunun her bir değişkeni, E fonksiyonunun bir veya iki değişkeni ile ilişkilidir; bu, polarizasyonun (P), uygulanan elektrik alanının (E) çift değerli bir fonksiyonu olduğu anlamına gelir. Dolayısıyla polarizasyon (P), uygulanan elektrik alanı (E) ile tam olarak tersine çevrilemez. Ferroelektrik malzemelerin dielektrik histerezis eğrisi Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Kırmızı renk eğrisi, elektrik alanı arttığında ferroelektrik malzemenin davranışını temsil eder ve yeşil, bir döngü (döngü) oluşturan alanın iptaline kadar elektrik alanı azaldığındadır. Ps kendiliğinden/doygunluk polarizasyonunu ve Pr kalıntı polarizasyonu temsil eder.



Şekil 2.8: Ferroelektrik malzemelerin dielektrik histerezisi [76].

PZT gibi başlangıçta polarize olmayan bazı ferroelektrik malzemelerin, kür sıcaklığının biraz altındaki bir sıcaklıkta yüksek ve büyüyen bir elektrik alanına maruz bırakılması, elektrik dipollerinin uygulanan elektrik alanın yönü ile artan bir hizalanmasına yol açacaktır. Bu durumda polarizasyon eğrisi (dielektrik histerezis döngüsü) Şekil 2.9'daki döngüye benzer.

Uygulanan elektrik alanın yeterince yüksek olmaması (OA) durumunda, malzeme davranışlarında herhangi bir değişiklik olmadığı anlamına gelen kristal alan değişimi yoktur; normal dielektrik özelliklerini (paraelektrik) koruyacaktır. Bu durumda, polarizasyon P ile uygulanan elektrik alanı E arasında düz çizgi benzeri bir eğri (OA) ile sonuçlanan doğrusal bir ilişki vardır.

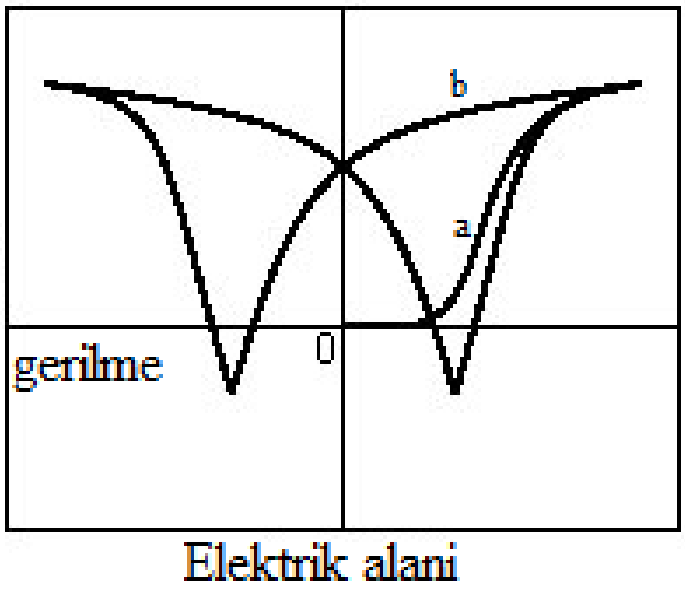
Uygulanan elektrik alanı E arttıkça (AB), negatif polarizasyona sahip birkaç alan kademeli olarak pozitif polarizasyona (uygulanan elektrik alanının yönü) dönüşmeye başlayacaktır. Sonuç olarak, uygulanan elektrik alanı E artırılırsa, AB segmentinde polarizasyon P'de keskin bir artış olur.

Polarizasyon, kalıcı olmayan polarizasyonun ötesine geçerse (BC bölümü, kendiliğinden polarizasyon Ps'nin üstünde), doyma polarizasyonu bölümündedir. Bu, tüm alanların pozitif yönde (uygulanan elektrik alanının yönü) hizalandığı anlamına gelir. Bu doygunluk durumunda, kristal yalnızca benzersiz bir polarizasyon yönüne sahip tek bir alandan oluşur. Bu

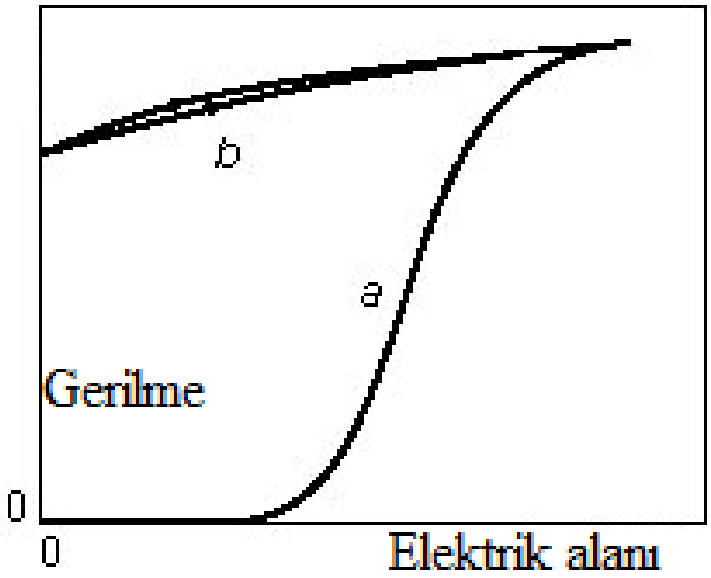
durum, Şekil 2.9'da (BC) gösterilen dielektrik histerezis eğrisinin doyma polarizasyon bölümü ile temsil edilmektedir.

Uygulanan elektrik alan iptal edilene kadar azaldıkça polarizasyon (P) da azalır. Ancak, kalan polarizasyon noktası + Pr'de (D noktası) durur; sıfıra geri dönmez. Alanlar pozitif yönde hizalı kalacaktır. Kalan polarizasyonu ortadan kaldırmak ve polarizasyonu P 0'a getirmek için, zıt yönlü (negatif) ve değeri zorlayıcı alan kuvvetine (bu durumda -Ec) ulaşan bir elektrik alanı uygulamak gerekir. Elektrik alanı negatif yönde artmaya devam ederse, elektrik dipolleri döngü tamamlanana kadar (F noktası) tersine dönmeye başlayacaktır.

Ferroelektrik malzemelerin bağıl deformasyon (kelebek) döngüsü Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Uygulanan elektrik alanının değişimine göre gerinim değişimini gösterir. Bu döngü, polarizasyon P durumunda sergilenen histerezis etkisini gösterir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9: Ferroelektrik malzemelerin gerinim (kelebek) döngüsü [77].



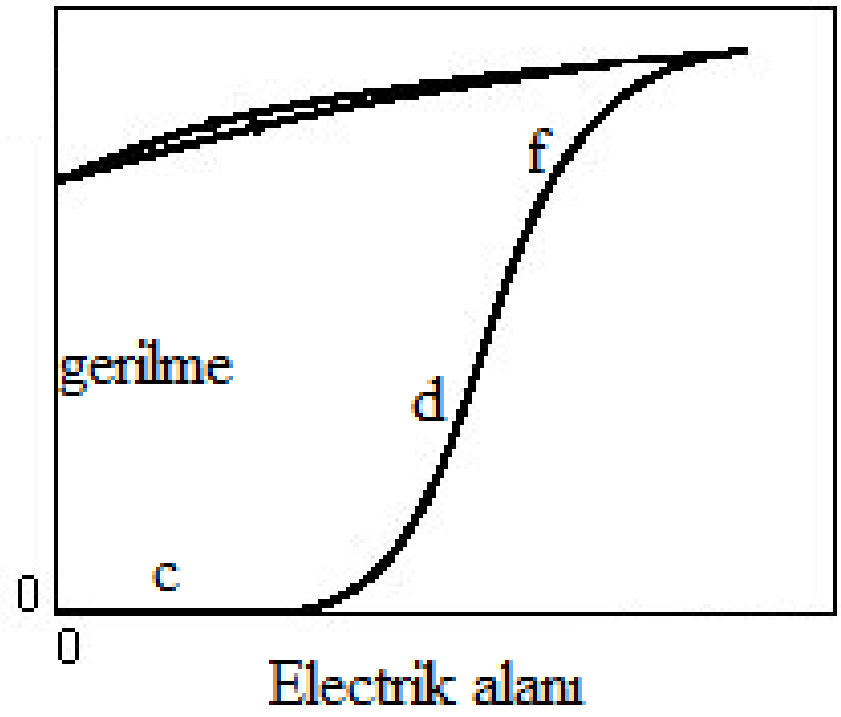
Şekil 2.10: (a) Kutuplama sırasında gerinim (b) Gerinim histerezis döngüsü [77].

Bir ferroelektrik malzemenin kutuplama işlemi sırasında (Şekil 2.11'deki "a" eğrisi), üç ana gerinim türü vardır:

- "Bakire" gerilme (c), uygulanan elektrik alan kuvveti düşük olduğunda meydana gelir [77]. Bu aşama, uygulanan elektrik alanı arttıkça gerilmenin olmaması ile karakterize edilir. Bu adım sırasında, Şekil 2.12'de gösterildiği gibi herhangi bir zorlama gerektirmeyen sadece 180° alan değiştirme gerçekleştirilir.

- Hizalanmış bölge içindeki piezoelektrik etki gerinimi (d), kutuplama sırasında meydana gelen ikinci tür şekil değiştirmedir. Bu tür gerinim, üçüncü tür gerinimden farklı olarak yarı-doğrusaldır.

- Üçüncü tür gerinim (e)'de, gerilim ile uygulanan elektrik alan arasında ikinci dereceden bir ilişki vardır. Bu aşamanın sonunda bir elektrostriksiyon olayı vardır. Uygulanan bir elektrik alanına maruz kaldıktan sonra kristal kafesin iyon yer değiştirmesi nedeniyle tüm dielektrik malzemelerin sahip olduğu bir özelliktir.



Şekil 2.11: Ferroelektrik seramiklerin kutuplama işlemi sırasında üç çeşit gerilme.

2.2.2.5. Kuplaj Faktörü k

Piezoelektrik malzemelerde mekanik ve elektrik alanı birleştirmek mümkündür. Bu malzemelerle, bir miktar mekanik enerji elde etmek için bir elektrik enerjisi girişi kullanılabilir veya bunun tersi de mümkündür. Bu nedenle, bu dönüşüm için elektromekanik olarak bir kuplaj katsayısı gereklidir. Bu katsayı, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülebilme etkinliğinin veya tam tersinin değerlendirilmesine izin verir. Genellikle piezoelektrik malzemenin rezonans frekansının altındaki frekanslarda belirlenir.

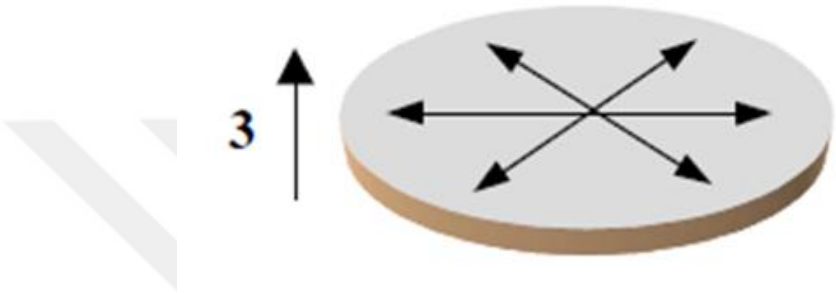
$$k_{eff}^2 = \frac{Dönüştürülen\ Enerji}{Giriş\ Enerjisi} \tag{2.2}$$

$$k_{eff}^2 = \begin{cases} \frac{Elektrik\ enerjisi}{Mekanik\ enerji}\ (doğrudan\ piezoelektrik\ etki) \\ \frac{Mekanik\ enerji}{Elektrik\ enerjisi}\ (dolaylı\ piezoelektrik\ etki) \end{cases} \tag{2.3}$$

k_{eff}'in bir analizi, modern piezoelektrik malzemelerin düşük frekanslarda alınan enerjinin %50'sini dönüştürebildiğini ortaya çıkardı. Tablolarda verilen k_{eff}^2 değerleri, malzemenin ideal (gerçekçi olmayan) örneğinin titreşim modlarından elde edilen teorik değerlerdir. Pratik dönüştürücülerin gerçek bağlantı katsayıları genellikle ideal olanlardan daha düşüktür.

k, tüm yönlerde enerji dönüşümünü tanımlar ve bazen bu bağlantı katsayısının uygulandığı yönü gösteren alt simgeler eşlik eder. Örneğin, k_{33}, uzunlamasına bir alanın etkisi altında çok uzun bir piezoelektrik çubuğun boyuna titreşimleri için bağlantı faktörüdür. k_{15}, bir piezoelektrik malzemenin kesme modu titreşimlerini temsil ederken k_{13}, enine bir elektrik alanının etkisi altında çok uzun bir piezoelektrik çubuğun uzunlamasına titreşimleri için bağlantı faktörüdür.

k_p, düzlemsel bağlantı faktörü olarak etiketlenir. İnce bir diskin düzlemsel bağlantısı, 3 1 yönündeki elektrik alanı (disk eksenine paralel) ile 1 ve 2 yönlerindeki radyal mekanik titreşimler arasındaki bağlantıdır. Radyal bağlantı olarak da bilinir [58].



Şekil 2.12: İnce bir piezoelektrik malzeme diskinin düzlemsel salınımları [58].

k_t, kalınlık birleştirme faktörü olarak bilinir. İnce, düzlemsel bir nesnenin 3 yönündeki bir elektrik alanı ile 3 yönündeki mekanik titreşimler arasındaki bağlantıyı temsil eder. Başka bir deyişle, bu düzlemsel nesne için k_{33} 'ün ifadesidir. Düzlemsel bir nesnenin kalınlık modunun rezonans frekansı, enine modundan çok daha yüksektir.

Ayrıca, k_{eff} birleştirme faktörü, enerji yoğunluklarının bir bölümü olarak ifade edilebilir:

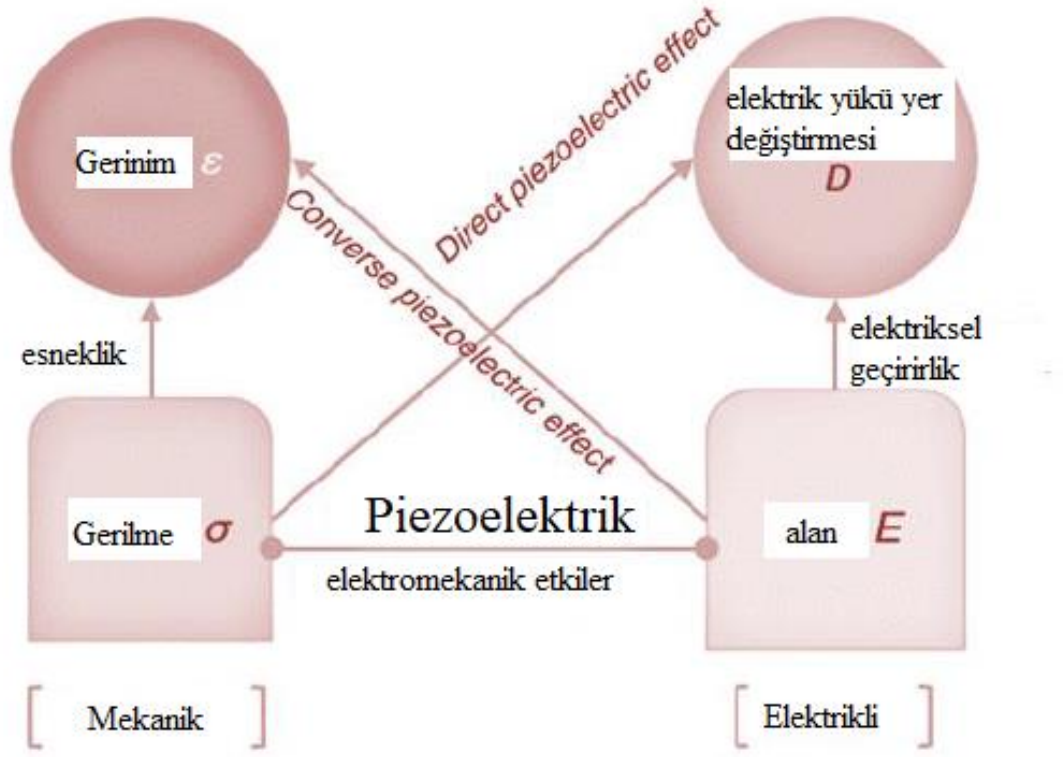
$$k_{eff} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon^T E^2 - \frac{1}{2}\varepsilon^S E^2}{\frac{1}{2}\varepsilon^T E^2} \tag{2.4}$$

Burada, $\frac{1}{2}\varepsilon^T E^2$ serbestçe deforme olan piezoelektrik gövde için depolanan toplam enerji yoğunluğunu temsil eder (T=0, kısıtlama yok). $\frac{1}{2}\varepsilon^S E^2$, nesne (piezoelektrik gövde) kısıtlandığında (S=0) depolanan toplam enerji yoğunluğunu temsil eder. Bölümün payı, bu iki yoğunluk arasındaki farktır ve dönüştürülmüş mekanik enerjiyi temsil eder.

Bazen dönüştürülen enerjiyi çıkarmak ve dönüştürülmemiş enerjiyi geri kazanmak da mümkündür. Kuplaj faktörü k ne kadar yüksek olursa, transdüksiyon o kadar verimli olur. Bununla birlikte, k^2'nin, yararlı dönüştürülen gücün giriş gücüne oranı olduğu için sistemin verimliliğinin bir ölçüsü olarak düşünülmemesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Piezoelektrik

malzemelerde dönüştürülmemiş enerji mutlaka kaybolmaz. Örneğin, dönüştürülmemiş enerji piezoelektrik malzemede ısı olarak depolanabilir ve çeşitli tekniklerle geri kazanılabilir.

Gerçek verimlilik, yararlı enerjinin dönüştürücü tarafından harcanan enerjiye oranıdır. Genel olarak, iyi ayarlanmış ve rezonans bölgesinde çalışan uygun şekilde ayarlanmış bir dönüştürücü, %90'ın üzerinde verimliliğe ulaşabilir. Rezonans bölgesinden uzak olması durumunda verim çok düşük olabilmektedir.



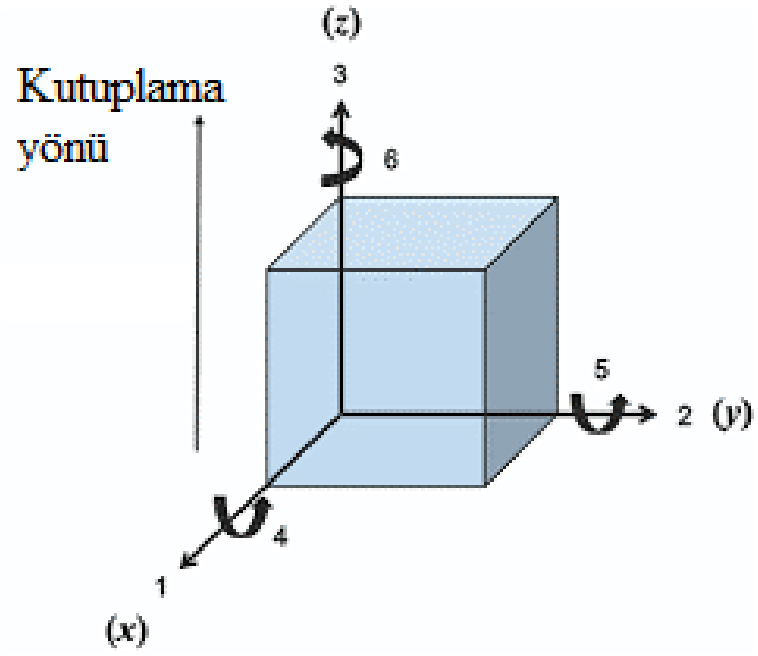
Şekil 2.13: Piezoelektrik malzemelerin mekanik ve elektriksel özellikleri arasındaki ilişki [78, 79].

2.2.3. Piezoelektrik Lineer Teori

Daha önce belirtildiği gibi, ferroelektrik malzemeler, uygulanan dış etkiler ile bu malzemelerin bu dış değişikliklere tepkisi arasında bir gecikme olgusu sergiler. Örneğin, polarize edici elektrik alanındaki değişim ile polarizasyon arasında bir gecikme vardır. Ferroelektrik malzemelerin özellikleri, malzemenin geçmişine bağlı olarak değişir. Bu malzemelerin davranışlarını temsil eden ferroelektriklerin dielektrik histerezis döngüsü Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Bununla birlikte, ferroelektriklerin kullanımı, yaklaşık olarak C ve D arasındaki eğrinin bir parçası olarak kabul edilebilecek döngünün doğrusal bölümündeki uygulamalarla sınırlıdır (Şekil 2.9).

Bu bölüm, piezoelektrikliğin lineer teorisine bir girişle başlamaktadır. Bu lineer teori, lineer aralıkta piezoelektrik malzemelerin davranışlarını tanımlar. Teori tüm piezoelektrik malzemeler için geçerli olmasına rağmen, kuvars gibi ferroelektrik olmayan malzemeler için çok kesindir. Ferroelektrik malzemeler söz konusu olduğunda, piezoelektrik doğrusal teorisinin sınırlamalarını göz önünde bulundurmak gerekir. Piezoelektrik lineer teorinin depolarizasyon, rezonans ve histerezis gibi lineer olmayan karakteristikler için geçerli olmadığına dikkat edilmelidir.

Piezoelektrik malzeme sabitlerinin standart değerleri bu araştırma çalışması boyunca kullanılmaktadır [80]. Aynı standarda göre piezoelektrik malzemelerin elasto-piezo-dielektrik katsayılarını belirlemek için (X, Y, Z) ve (1, 2, 3) koordinat sistemleri kullanılmaktadır. Bu dik eksenler arasında polarizasyon yönü Z ekseni ile temsil edilir. (X, Y) polarizasyon yönüne dik olan plandır. Koordinat sisteminin ortogonal eksenleri (X,Y,Z veya 1,2,3) etrafındaki dönüşü 4,5 ve 6 olarak etiketlenmiştir. Bunlar, gösterildiği gibi koordinat sisteminde tanımlanan planlara teğet olan mekanik kayma gerilmeleridir. Şekil 2.15'te. Malzemenin X, Y ve Z eksenleri boyunca ana özellikleri sırasıyla 1, 2 ve 3 indeks kullanılarak belirlenir. Örneğin, piezoelektrik yük sabiti d_{31} durumunda, birinci indeks 3, elektrotların 3/Z eksenine dik olduğu anlamına gelirken, ikinci indeks 1, stres veya gerilmenin 1/X ekseni boyunca uygulandığını gösterir [71] .



Şekil 2.14: Piezoelektrik malzemelerde elektromekanik sabitlerin yön indeksi [71].

2.2.3.1. Piezoelektrik Temel Denklemleri

Tek bir kristalde gözlemlenen doğrudan piezoelektrik (sensör etkisi), bir matris ile gösterilebilir. Bu matris, piezoelektrik malzemeye harici bir mekanik gerilim/gerilme uygulandığında kristal tarafından geliştirilen polarizasyonu temsil eder. Uygulanan dış elektrik alanının (E=0)'a eşit olması durumunda, üretilen polarizasyon elektrotlarda bulunan serbest yük q'ya eşittir. Bu, malzemenin doğrudan piezoelektrik etkisindeki davranışının özel bir durumudur. İlişki, denklem 2.5 ile verilir.

$$P_i = q_i = d_{ij} \,.\, T_i \tag{2.5}$$

P_i, i eksenine dik olan yüzeyde üretilen lineer polarizasyon, qi ise i eksenine normal olan yüzeyde geliştirilen lineer serbest yüktür, dij elektrotları i eksenine dik olan piezoelektrik yük sabitidir. ve gerilimi j ekseni boyunca uygulanan. Denklem 2.5'in matris ifadesi:

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Denklem 2.5 ve denklem 2.6'da gösterildiği gibi, uygulanan elektrik alanının sıfıra eşit olduğu varsayımı nedeniyle polarizasyon vektörü elektrotlardaki serbest yüke eşittir (E=0, piezoelektrik kısa devre). Her yön için piezoelektrik katsayısı polarizasyonun yoğunluğunu belirler. Bu ilişki tek kristaller için geçerlidir.

Ferroelektrik durumunda, polarizasyon kendiliğinden polarizasyondaki (Ps)i değişim ile değiştirilir. Ps, çapraz yönde ihmal edilebilir olduğundan, yalnızca kutuplama yönünde kabul edilir. Lineer aralığı hesaba katarak, ferroelektrik malzemeler için ifade şudur:

$$(P_{TOTAL})_i = (P_S)_i + d_{ij} \,.\, T_j \tag{2.7}$$

Ters piezoelektrik etki (aktüatör etkisi), bir piezoelektrik malzemede harici bir Elektrik alanına maruz kaldığında oluşturulan gerilimi belirtir. Malzemenin herhangi bir mekanik kısıtlamaya maruz kalmaması durumunda (serbest yer değiştirme; Tij = 0), tersi etki şu bağıntı ile temsil edilebilir:

$$S_i = d_{ij}^{\Theta,\, T\cdot}\, E_j \tag{2.8}$$

Si, i eksenine dik olan yüzeyde indüklenen lineer gerinim olduğunda, dijΘ, T, j yönünde bir elektrik alanı uygulandığında i-yönündeki deformasyonun yoğunluğunu gösteren yük

piezoelektrik katsayısıdır. Yük piezoelektrik sabiti için kullanılan birim m/v'dir. Ters piezoelektrik etkideki yük piezoelektrik sabiti, piezoelektrik etkininkilerle aynıdır. Denklem 2.8'in matris ifadesi:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {d_{11}}^{\theta,T} & {d_{12}}^{\theta,T} & {d_{13}}^{\theta,T} \\ {d_{21}}^{\theta,T} & {d_{22}}^{\theta,T} & {d_{23}}^{\theta,T} \\ {d_{31}}^{\theta,T} & {d_{32}}^{\theta,T} & {d_{33}}^{\theta,T} \\ {d_{41}}^{\theta,T} & {d_{42}}^{\theta,T} & {d_{43}}^{\theta,T} \\ {d_{51}}^{\theta,T} & {d_{52}}^{\theta,T} & {d_{53}}^{\theta,T} \\ {d_{61}}^{\theta,T} & {d_{62}}^{\theta,T} & {d_{63}}^{\theta,T} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \tag{2.9}$$

2.2.3.2. Bünye Denklemleri

Doğrusal bir dielektrik, belirli sıcaklık koşullarında aynı anda hem mekanik strese hem de elektrik alanına maruz kalabilir. Bu sonuçları birleştirmek için malzemelerin elektriksel ve mekanik özelliklerini gözlemlemek mümkündür.

- **Piezoelektrik malzemelerin mekanik davranışı**

S mekanik gerilimi, T mekanik gerilimine, E elektrik alanına ve termal değişime Δθ maruz kalan bir piezoelektrik malzemenin mekanik doğrusal davranışlarını gösterir. Bu ilişki aynı zamanda Hook yasası yaklaşımı olarak da bilinir. Gerilimin matris ifadesi şu şekildedir:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {d_{11}}^{\theta,T} & {d_{12}}^{\theta,T} & {d_{13}}^{\theta,T} \\ {d_{21}}^{\theta,T} & {d_{22}}^{\theta,T} & {d_{23}}^{\theta,T} \\ {d_{31}}^{\theta,T} & {d_{32}}^{\theta,T} & {d_{33}}^{\theta,T} \\ {d_{41}}^{\theta,T} & {d_{42}}^{\theta,T} & {d_{43}}^{\theta,T} \\ {d_{51}}^{\theta,T} & {d_{52}}^{\theta,T} & {d_{53}}^{\theta,T} \\ {d_{61}}^{\theta,T} & {d_{62}}^{\theta,T} & {d_{63}}^{\theta,T} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} {S_{11}}^{E,\theta} & {S_{12}}^{E,\theta} & {S_{13}}^{E,\theta} & {S_{14}}^{E,\theta} & {S_{15}}^{E,\theta} & {S_{16}}^{E,\theta} \\ {S_{21}}^{E,\theta} & {S_{22}}^{E,\theta} & {S_{23}}^{E,\theta} & {S_{24}}^{E,\theta} & {S_{25}}^{E,\theta} & {S_{26}}^{E,\theta} \\ {S_{31}}^{E,\theta} & {S_{32}}^{E,\theta} & {S_{33}}^{E,\theta} & {S_{34}}^{E,\theta} & {S_{35}}^{E,\theta} & {S_{36}}^{E,\theta} \\ {S_{41}}^{E,\theta} & {S_{42}}^{E,\theta} & {S_{43}}^{E,\theta} & {S_{44}}^{E,\theta} & {S_{45}}^{E,\theta} & {S_{46}}^{E,\theta} \\ {S_{51}}^{E,\theta} & {S_{52}}^{E,\theta} & {S_{53}}^{E,\theta} & {S_{54}}^{E,\theta} & {S_{55}}^{E,\theta} & {S_{56}}^{E,\theta} \\ {S_{61}}^{E,\theta} & {S_{62}}^{E,\theta} & {S_{63}}^{E,\theta} & {S_{64}}^{E,\theta} & {S_{65}}^{E,\theta} & {S_{66}}^{E,\theta} \end{bmatrix} . \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} {\alpha_1}^{E,T} \\ {\alpha_2}^{E,T} \\ {\alpha_3}^{E,T} \\ {\alpha_4}^{E,T} \\ {\alpha_5}^{E,T} \\ {\alpha_6}^{E,T} \end{Bmatrix} . \Delta T \tag{2.10}$$

Burada α, termal genleşme katsayısıdır. Termal katsayının ifadesi:

$${\alpha_i}^{E,T} = \left[\frac{\partial S_i}{\partial \theta}\right]_{E,T=sabit} = \left[\frac{1}{^\circ K}\right] \tag{2.11}$$

- **Piezoelektrik malzemelerin elektriksel davranışları**

Bir piezoelektrik malzemeye bir elektrik alanı uygulandığında, elektriksel, mekanik ve termal deformasyon nedeniyle kristallerde üretilen doğrusal polarizasyon P ile tanımlanabilen bir elektrik tepkisi vardır. Elektrik tepkisinin ifadesi:

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} {d_{11}}^{E,\theta} & {d_{12}}^{E,\theta} & {d_{13}}^{E,\theta} & {d_{14}}^{E,\theta} & {d_{15}}^{E,\theta} & {d_{16}}^{E,\theta} \\ {d_{21}}^{E,\theta} & {d_{22}}^{E,\theta} & {d_{23}}^{E,\theta} & {d_{24}}^{E,\theta} & {d_{25}}^{E,\theta} & {d_{26}}^{E,\theta} \\ {d_{31}}^{E,\theta} & {d_{23}}^{E,\theta} & {d_{33}}^{E,\theta} & {d_{34}}^{E,\theta} & {d_{35}}^{E,\theta} & {d_{36}}^{E,\theta} \end{bmatrix} . \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} {\varepsilon_{11}}^{T,\theta} & {\varepsilon_{12}}^{T,\theta} & {\varepsilon_{13}}^{T,\theta} \\ {\varepsilon_{21}}^{T,\theta} & {\varepsilon_{22}}^{T,\theta} & {\varepsilon_{23}}^{T,\theta} \\ {\varepsilon_{31}}^{T,\theta} & {\varepsilon_{32}}^{T,\theta} & {\varepsilon_{33}}^{T,\theta} \end{bmatrix} . \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} {p_1}^{T,E} \\ {p_2}^{T,E} \\ {p_3}^{T,E} \end{Bmatrix} . \Delta\theta \qquad (2.12)$$

Burada p, piroelektrik katsayısıdır. Onun ifadesi:

$$P_i^{T,E} = \left[\frac{\partial D_i}{\partial \theta}\right]_{T,E=const} = \left[\frac{C}{^{\circ}Km^2}\right] \qquad (2.13)$$

- **Elektromekanik (kuplaj) davranış**

Piezoelektrik katsayıları dij, hem mekanik hem de elektrik tepkisi için aynıdır. Bu nedenle, piezoelektrik aktivite sırasında elektromekanik bir etkileşim meydana gelir. Böylece, denklem 2.14'te gösterildiği gibi, hem mekanik hem de elektrik tepkisini tek bir ifadede birleştirmek mümkündür.

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^{E,T} & S_{12}^{E,T} & S_{13}^{E,T} & S_{14}^{E,T} & S_{15}^{E,T} & S_{16}^{E,T} & d_{11}^{T,\theta} & d_{12}^{T,\theta} & d_{13}^{T,\theta} \\ S_{21}^{E,T} & S_{22}^{E,T} & S_{23}^{E,T} & S_{24}^{E,T} & S_{25}^{E,T} & S_{26}^{E,T} & d_{21}^{T,\theta} & d_{22}^{T,\theta} & d_{23}^{T,\theta} \\ S_{31}^{E,T} & S_{32}^{E,T} & S_{33}^{E,T} & S_{34}^{E,T} & S_{35}^{E,T} & S_{36}^{E,T} & d_{31}^{T,\theta} & d_{32}^{T,\theta} & d_{33}^{T,\theta} \\ S_{41}^{E,T} & S_{42}^{E,T} & S_{43}^{E,T} & S_{44}^{E,T} & S_{45}^{E,T} & S_{46}^{E,T} & d_{41}^{T,\theta} & d_{42}^{T,\theta} & d_{43}^{T,\theta} \\ S_{51}^{E,T} & S_{52}^{E,T} & S_{53}^{E,T} & S_{54}^{E,T} & S_{55}^{E,T} & S_{56}^{E,T} & d_{51}^{T,\theta} & d_{52}^{T,\theta} & d_{53}^{T,\theta} \\ S_{61}^{E,T} & S_{62}^{E,T} & S_{63}^{E,T} & S_{64}^{E,T} & S_{65}^{E,T} & S_{66}^{E,T} & d_{61}^{T,\theta} & d_{62}^{T,\theta} & d_{63}^{T,\theta} \\ d_{11}^{E,T} & d_{12}^{E,T} & d_{13}^{E,T} & d_{14}^{E,T} & d_{15}^{E,T} & d_{16}^{E,T} & \varepsilon_{11}^{T,\theta} & \varepsilon_{12}^{T,\theta} & \varepsilon_{13}^{T,\theta} \\ d_{21}^{E,T} & d_{22}^{E,T} & d_{23}^{E,T} & d_{24}^{E,T} & d_{25}^{E,T} & d_{26}^{E,T} & \varepsilon_{21}^{T,\theta} & \varepsilon_{22}^{T,\theta} & \varepsilon_{23}^{T,\theta} \\ d_{31}^{E,T} & d_{32}^{E,T} & d_{33}^{E,T} & d_{34}^{E,T} & d_{35}^{E,T} & d_{36}^{E,T} & \varepsilon_{31}^{T,\theta} & \varepsilon_{32}^{T,\theta} & \varepsilon_{33}^{T,\theta} \end{bmatrix} . \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \qquad (2.14)$$

Denklem 2.14, elasto-piezo-dielektrik matrisidir. Aynı zamanda d-formu kurucu denklemi olarak da bilinir. Kompakt formu:

$$\begin{Bmatrix} [S] \\ [D] \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [S^E] & [d] \\ [d] & [\varepsilon^T] \end{bmatrix} . \begin{Bmatrix} [T] \\ [E] \end{Bmatrix} \qquad (2.15)$$

D-form matrisi, kapsamlı bir piezoelektrik ilişki türüdür. d-formundaki bağımsız değişkenler [T] ve [E] matrisleridir.

Bir piezoelektrik malzeme için ikinci kurucu denklem, yoğun bir piezoelektrik ilişki türü olan h-from matrisidir:

$$\begin{Bmatrix}[T]\\[E]\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}[C^D] & [-h]\\[-h] & [\beta^S]\end{bmatrix}.\begin{Bmatrix}[S]\\[D]\end{Bmatrix} \tag{2.16}$$

h-formundaki bağımsız değişkenler [S] ve [D] matrisleridir.

Bir piezoelektrik malzeme için üçüncü kurucu denklem, karışık bir piezoelektrik ilişki türü olan g-form matrisidir:

$$\begin{Bmatrix}[S]\\[E]\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}[S^D] & [g]\\[-g] & [\beta^T]\end{bmatrix}.\begin{Bmatrix}[T]\\[D]\end{Bmatrix} \tag{2.17}$$

g formundaki bağımsız değişkenler [T] ve [D] matrisleridir.

Bir piezoelektrik malzeme için dördüncü kurucu denklem, karışık bir piezoelektrik ilişki türü olan e-form matrisidir:

$$\begin{Bmatrix}[T]\\[D]\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}[C^E] & [-e]\\[e] & [\varepsilon^S]\end{bmatrix}.\begin{Bmatrix}[S]\\[E]\end{Bmatrix} \tag{2.18}$$

E-formdaki bağımsız değişkenler [S] ve [E] matrisleridir.

Elektrik tensörleri [D] ve [E] vektörlerdir (birinci dereceden tensörler); Mekanik tensörler [S] ve [T] 3x3 matrislerdir (ikinci dereceden tensörler); Dielektrik katsayıları [ε] ve [β] 3x3 matrislerdir (ikinci dereceden tensörler); Piezoelektrik katsayıları [d], [g], [e] ve [h] 6x3 matrislerdir (üçüncü dereceden tensörler); [S] ve [C] elastik katsayıları 6x6 matrislerdir (dördüncü dereceden tensörler).

Tablo 2.5: Piezoelektrik malzemenin bünye denklemleri.

Bünye denklemlerin formu	Bağımsız değişkenler	İfade
d-formu	[T], [E]	$\begin{Bmatrix}[S]\\[D]\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}[S^E] & [d]\\[d] & [\varepsilon^T]\end{bmatrix}.\begin{Bmatrix}[T]\\[E]\end{Bmatrix}$
h-formu	[S], [D]	$\begin{Bmatrix}[T]\\[E]\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}[C^D] & [-h]\\[-h] & [\beta^S]\end{bmatrix}.\begin{Bmatrix}[S]\\[D]\end{Bmatrix}$
g-formu	[T], [D]	$\begin{Bmatrix}[S]\\[E]\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}[S^D] & [g]\\[-g] & [\beta^T]\end{bmatrix}.\begin{Bmatrix}[T]\\[D]\end{Bmatrix}$
h-formu	[S], [E]	$\begin{Bmatrix}[T]\\[D]\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}[C^E] & [-e]\\[e] & [\varepsilon^S]\end{bmatrix}.\begin{Bmatrix}[S]\\[E]\end{Bmatrix}$

Malzeme piezoelektrik değilse, piezoelektrik katsayıları d_{ij} 0'a eşit olduğundan elektromekanik bağlantı yoktur.

Isıl etki, yukarıda belirtilen bünye denklemlerinde dikkate alınmamıştır. Malzemenin piroelektrik olup olmadığına dikkat edilmelidir.

2.2.3.3. Elasto-Piezo-Dielektrik Katsayıları

• Piezoelektrik katsayıları

Piezoelektrik katsayısı d_{ij}, piezoelektrik gerinim katsayısı olarak etiketlenir. Hem doğrudan hem de ters piezoelektrik etkiler için aynı kalması nedeniyle, onu tanımlamak için iki eşdeğer ifade kullanılabilir.

$$d_{ij}^{\theta} = \begin{cases} = \left[\frac{\partial S_j}{\partial E_i}\right]_{D,\theta=sabit} = \frac{m}{v}\ (Doğrudan\ etki - sensör) \\ = \left[\frac{\partial D_i}{\partial T_j}\right]_{S,\theta=sabit} = \frac{C}{N}\ (dolaylı\ etki - aktüatör) \end{cases} \quad (2.19)$$

Piezoelektrik malzemeler genellikle anizotropiktir ve bu nedenle piezoelektrik, geçirgenlik ve elastikiyet katsayıları gibi sabitleri uygulanan gerilim/elektrik alanın hem yönü ile hem de bunlara dik yönlerle ilgili olan tensörlerdir. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen katsayılar genellikle iki ilişkili niceliğin yönünü gösteren iki alt simge indeksi ile birlikte gelir (örneğin, geçirgenlik için yer değiştirme ve elektrik alanı, esneklik için gerilim ve gerinim). Sabit tutulan miktar, bir üst simge indeksi kullanılarak belirtilir.

Piezoelektrik katsayılara (genellikle elektrik ve mekanik büyüklüklere atıfta bulunur) iki (02) alt simge indeksi eşlik eder. İlk alt simge indeksi, elektriksel niceliğin (elektrik alanı veya yer değiştirme) yönünü gösterir ve ikinci alt simge indeksi, mekanik miktarı (gerilme veya gerinim) temsil eder. Üç ana piezoelektrik malzeme tipinin d-matrisi aşağıda verilmiştir:

Tek kristal kuvarsın (Mono-kristal α kuvars) d-matrisi:

$$d_{kuvars} = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$d_{11} = 2.3 \cdot 10^{-12}$ C/N $d_{14} = -0.7 \cdot 10^{-1}$

Polikristal ferroelektriklerin d matrisi (BaTiO3, PZT, PLZT…)

$$d_{PZT} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Eksen 3 kutuplama yönü olarak kabul edilir :

Piezoelektrik polimerlerin (PVDF) d matrisi:

$$d_{PVDF} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Piezoelektrik voltaj katsayısının ifadesi:

$$h_{ij}^{\theta} = \begin{cases} = \left[\frac{\partial E_i}{\partial S_j}\right]_{D,\theta=sabit} = \frac{V}{m} \ (Doğrudan\ etki - \ sensör) \\ = \left[\frac{\partial T_j}{\partial D_i}\right]_{S,\theta=sabit} = \frac{N}{C} \ (dolaylı\ etki \ - \ aktüatör) \end{cases} \quad (2.24)$$

Piezoelektrik e katsayısı :

$$e_{ij}^{\theta} = \begin{cases} = \left[\frac{\partial D_i}{\partial S_j}\right]_{E,\theta=sabit} = \frac{C}{m^2} \ (Doğrudan\ etki - \ sensör) \\ = \left[\frac{\partial T_j}{\partial E_i}\right]_{S,\theta=sabit} = \frac{N/m}{V} \ (dolaylı\ etki \ - \ aktüatör) \end{cases} \quad (2.25)$$

- **Esneklik katsayıları**

Mekanik gerilim ve gerinim arasındaki ilişkiyi ifade etmek için iki elastik katsayı kullanılır. Bu katsayılar rijitlik (C) ve uyumluluktur (S).

Elastik rijitlik C, bir piezoelektrik malzemenin kristallerinin uygulanan bir dış gerilime veya zorlanmaya tepkisini gösterir. Başka bir deyişle, malzemenin dışarıdan uygulanan bir kuvvete (gerilme) yanıt olarak gerinimlere karşı ne kadar direnebileceğini gösterir [81]. Bu miktar, elektrik alan sabiti veya elektrik yükü sabiti koşulları altında ölçülebilir.

Elastik rijitlik katsayısı şu şekilde tanımlanabilir:

$$C_{ij}^{E,\theta} = \left[\frac{\partial T_j}{\partial S_i}\right]_{E,\theta=sabit} = \frac{N}{m^2} \ (E = sabit\ veya\ sıfır - \ kısa\ devrede\ rijitlik) \quad (2.26)$$

$$C_{ij}^{D,\theta} = \left[\frac{\partial T_j}{\partial S_i}\right]_{D,\theta=sabit} = \frac{N}{m^2} \ (D = sabit\ veya\ sıfır \ - \ açık\ devrede\ rijitlik) \quad (2.27)$$

Burada, ilk alt simge i, gerinmenin yönünü, ikincisi ise gerilimin yönünü gösterir. Örneğin, C_{32}^{D}, elektrik yükü sabiti koşulları altında 3 yönünde bir gerinim ile eksen 2 etrafındaki normal bir gerilim için katılıktır.

Bir malzemenin elastik uyumu S, uygulanan stres birimi başına üretilen gerinim miktarını temsil eder. Bu miktarın ölçümü, sabit bir elektrik alanında veya elektrik yükünde yapılabilir.

Elastik uyum katsayısının ifadesi:

$$S_{ij}^{E,\theta} = \left[\frac{\partial S_i}{\partial T_j}\right]_{E,\theta=sabit} = \frac{m^2}{N} \ (E = sabit\ veya\ sıfır \ - \ kısa\ devrede\ uyumluluk) \quad (2.28)$$

$$S_{ij}^{D,\theta} = \left[\frac{\partial S_i}{\partial T_j}\right]_{E,\theta=sabit} = \frac{m^2}{N} \ (D = sabit\ veya\ sıfır \ - \ açık\ devrede\ uyumluluk) \quad (2.29)$$

Burada, ilk alt simge i, gerinmenin yönünü, ikincisi ise gerilimin yönünü gösterir. Örneğin, S_{12}^{E}, elektrik alan sabiti koşulları altında yön 1'deki bir gerinim ile eksen 2 etrafındaki normal bir gerilimin uyumudur.

• Dielektrik katsayıları

Dielektrik sabiti, elektrik alan birimi başına dielektrik yer değiştirmeyi temsil eder. Mutlak geçirgenlik olarak da bilinir. Birinci alt simge indeksi, dielektrik yer değiştirmenin yönünü gösterirken, ikinci alt simge indeksi, elektrik alanının yönü hakkında bilgi verir. Bu fiziksel niceliğin ölçümü, 2.30 ve 2.31 denklemlerinde gösterildiği gibi blokaj kuvvetinde (S=0) veya serbest yer değiştirmede (T=0) yapılabilir.

$$\varepsilon_{ij}^{S,\theta} = \left[\frac{\partial D_i}{\partial E_j}\right]_{S,\theta=sabit} = \frac{F}{m}\ (D = \ sabit\ veya\ 0'da\ geçirgenlik;\ blokaj\ kuvveti) \qquad (2.30)$$

$$\varepsilon_{ij}^{T,\theta} = \left[\frac{\partial D_i}{\partial E_j}\right]_{T,\theta=sabit} = \frac{F}{m}\ (T = \ sabit\ veya\ 0'da\ geçirgenlik; serbest\ yer\ değiştirme) \qquad (2.31)$$

Göreceli geçirgenlik $\varepsilon/\varepsilon_0$ değeri 8.85 x 10^{-12} F/m'dir.

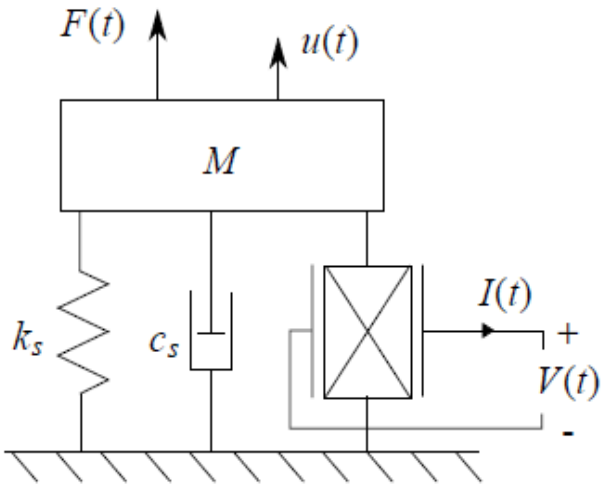
Geçirimsizlik olarak adlandırılan başka bir dielektrik katsayısı β tanımlanabilir:

$$\beta_{ij}^{S,\theta} = \left[\frac{\partial E_j}{\partial D_i}\right]_{S,\theta=const} = \frac{m}{F}\ (D = \ sabit\ veya\ 0'da\ geçirimsizlik;\ blokaj\ kuvveti) \qquad (2.32)$$

$$\beta_{ij}^{T,\theta} = \left[\frac{\partial E_j}{\partial D_i}\right]_{T,\theta=const} = \frac{m}{F}\ (T = \ sabit\ veya\ 0'da\ geçirimsizlik; serbest\ yer\ değiştirme) \qquad (2.33)$$

2.2.4. AC Modunda Toplanan Güç (Alternatif Akım Empedansı Eşleştirme -ACIM)

Paralel ve mekanik rijitliğe sahip bir piezoelektrik elemanlı 1B kütle yaylı damper modelini ele alalım. Kütle, harmonik bir kuvvet tarafından uyarılır ve elektromekanik kuplajın dinamik sistemler üzerindeki etkisi üzerine bir araştırma yapılacaktır.



Şekil 2.15: Piezo elemanlı 1 boyutlu kütle yaylı damper modeli.

Burada k_s mekanik rijitlik, C_s sistemin viskoz sönümlemesi ve M sistemin kütlesidir. Bu değerlendirme için sadece kümelenmiş parametre Θ'yi ele alalım. Ayrıca, piezo elemanın elektrotları arasında bir direnç R bulunur.

Bu sistem için hareket denklemlerinin ifadeleri:

$$M\ddot{u} + C_s\dot{u} + \theta V_p = F(t) \tag{2.34}$$

$$\theta\dot{u} - C_p\dot{V_p} = {V_p}/{R} \tag{2.35}$$

İkinci denklem 2.35, V_p voltajını u cinsinden bulmak için kullanılabilir. Karmaşık bir harmonik uyarma ve tepki ile değiştirerek:

$$F(t) = F_0 e^{i\omega t}\ ; \qquad V_p(t) = V_{p0} e^{i\omega t}; \qquad u(t) = u_0 e^{i\omega t} \tag{2.36}$$

Burada F_0, V_{p0} ve u_0, $a + ib$ şeklinde ifade edilebilen karmaşık genliklerdir.

Elektriksel alanda yukarıda belirtilen ifadeler yerine kullanılarak V_{p0} şu şekilde yazılabilir:

$$V_{p0} = u_o \frac{\theta\omega R(C_p\omega R+i)}{(C_p\omega R)^2+1} \tag{2.37}$$

Mekanik etki alanı için denklem 2.37'deki voltajı değiştirerek. Yer değiştirme fonksiyonu için de bir varsayım yapılmıştır. Daha sonra gerçek ve sanal terimleri gruplamak için ifade yeniden yazılır:

$$-M\omega^2 + k_s + \frac{(\theta\omega R)^2 C_p}{(C_p\omega R)^2+1} + i\omega\left(C_s + \frac{\theta^2\omega R}{(C_p\omega R)^2+1}\right) = \frac{F_0}{u_0} \tag{2.38}$$

Kütle, sönüm ve rijitlik terimleri denklem (2.38)'de kolaylıkla tanımlanabilir. Gerçek piezoelektrik terimin frekansa bağlı olduğuna dikkat etmek önemlidir. Bu nedenle, iki aşırı özel durum için gözlemler yapılacaktır R=∞; R=0.

R=∞ için ifade açık devre denklemine çevrilir. Sönüm terimi tamamen ortadan kalkarken rijitlik terimi ${\theta^2}/{C_p}$ olur.

R=0 için ifade, θ ile tüm bağlaşım terimlerinin ortadan kalktığı açık devre denklemine dönüştürülür. Kalan ifade, bir kütle-yay-sönümleyici sistemi için ikinci dereceden denklem olarak bilinir.

$$\omega_{n,OC} = \sqrt{\frac{k_S + \frac{\theta^2}{C_p}}{M}}; \qquad \omega_{n,SC} = \sqrt{\frac{k_S}{M}}; \tag{2.39}$$

Burada, $\omega_{n,OC}$ açık devre rezonans frekansıdır ve $\omega_{n,SC}$ kısa devre rezonans frekansıdır.

2.39 denkleminden, piezoelektrik kuplajın kütle-yay-sönümleyici dinamik sistemler üzerindeki etkisi açıktır. Rijitlik değişiminin sistemin doğal frekansının değişmesine neden olduğu fark edilebilir. Denklem 2.39 şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$\frac{\omega_{n,OC}}{\omega_{n,SC}} = \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{C_p k_s}} = \sqrt{1 + k_{33}^2} = \sqrt{1 + k_e^2} \quad (2.40)$$

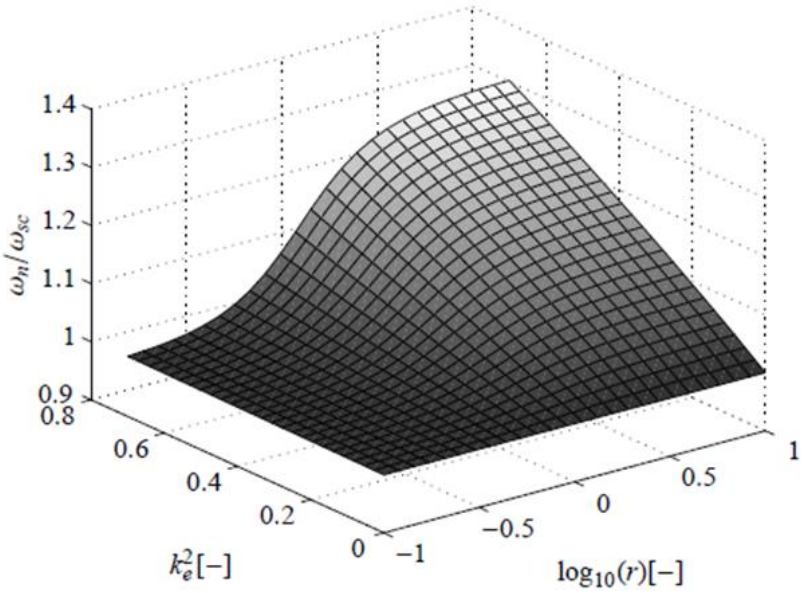
R, denklem 2.35'te bir değişken olarak kullanılır. 0 ile ∞ arasındaki değişimi sırasında ω_n, ξ, Ω ve r ifadeleriyle değiştirilerek incelenir:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_s}{M}}, \xi = \frac{C_s}{2M\omega_n}, \Omega = \frac{\omega}{\omega_n}, r = C_p \omega_n R \quad (2.41)$$

ω_n kısa devre doğal frekansı olduğunda, ξ boyutsuz sönümleme oranıdır, Ω normalleştirilmiş uyarı frekansıdır ve r normalleştirilmiş dirençtir. Bu nedenle, normalleştirilmiş hareket denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$\left(1 - \Omega^2 + \frac{k_e^2 r^2 \Omega^2}{(r\Omega)^2+1}\right) + i\Omega\left(2\xi + \frac{k_e^2 r}{(r\Omega)^2+1}\right) = \frac{F_0}{u_0} \quad (2.42)$$

İlk olarak, bu denklemin sadece reel kısmı incelenecektir. Sönümsüz doğal frekansları hesaplayabilmek için reel kısım 0'a eşitlenecektir. Dolayısıyla, Ω cinsinden dördüncü dereceden bir denklemin çift kuvvetlerle çözümü bulunmalıdır. Şekil 2.17, k_e^2 ve $\log_{10}(r)$)'ye karşı bir grafikte çözüm kümesini göstermektedir.



Şekil 2.16: Açık devreden (R=∞) kısa devreye (R=0) doğal frekans oranı.

Bu durumda, k_e^2 bağlantı katsayısı 0 ile 0,7 aralığındadır. Gerçekten de, 33 düğümlü seramik işlemi için bağlantı katsayısının kaydedilen en yüksek değeri 0,7'dir.

Yüksekten düşüğe ve farklı uyarma frekanslarında yer değiştirme, voltaj ve güç gibi fiziksel niceliklerin davranışını incelemek de önemlidir. Denklem 2.37 ve 2.38'in kombinasyonu, uyarım fonksiyonunda gerilim ifadesinin çizilmesine izin verir. Ardından, voltajın akımın karmaşık eşleniği ile çarpılmasıyla güç elde edilebilir [82].

Bununla birlikte, dirençli bir yükte ortalama harcanan güç, bir sinüzoidal voltaj sinyali için dirençle bölünen voltaj kök ortalama karesinin (RMS) değeridir. Bundan, aşağıdaki ifade çizilebilir:

$$P = \frac{V_0 \overline{V_0}}{2R} \tag{2.43}$$

Normalleştirilmiş voltajın, normalleştirilmiş gücün ve normalleştirilmiş yer değiştirmenin ifadesini bulmak da mümkündür.

$$V'_0 = \frac{V_0}{F_0/\theta} = \frac{k_e^2 r\Omega(\mathrm{r}\Omega+\mathrm{i})}{(r\Omega)^2+1}\, u'_0 \tag{2.44}$$

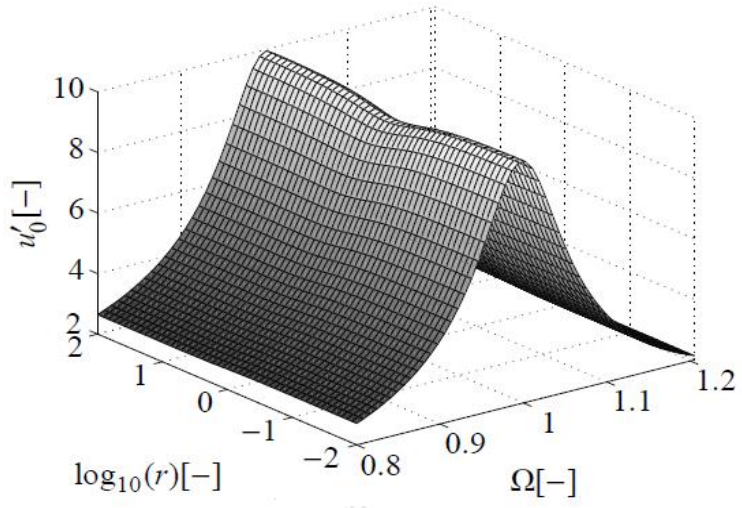
$$P'_{avg} = \frac{P_{avg} M \omega_{sc}}{F_0^2} = \frac{1}{k_e^2} \cdot \frac{|V'_0|^2}{2r} = \frac{r\Omega^2 k_e^2}{2((r\Omega)^2+1)} \cdot |u'_0|^2 \tag{2.45}$$

$$u'_0 = \frac{u_0}{F_0/k_s} = \frac{1}{\left(1-\Omega^2+\frac{k_e^2 r^2 \Omega^2}{(r\Omega)^2+1}\right)+i\Omega(2\xi+\frac{k_e^2 r}{(r\Omega)^2+1})} \tag{2.46}$$

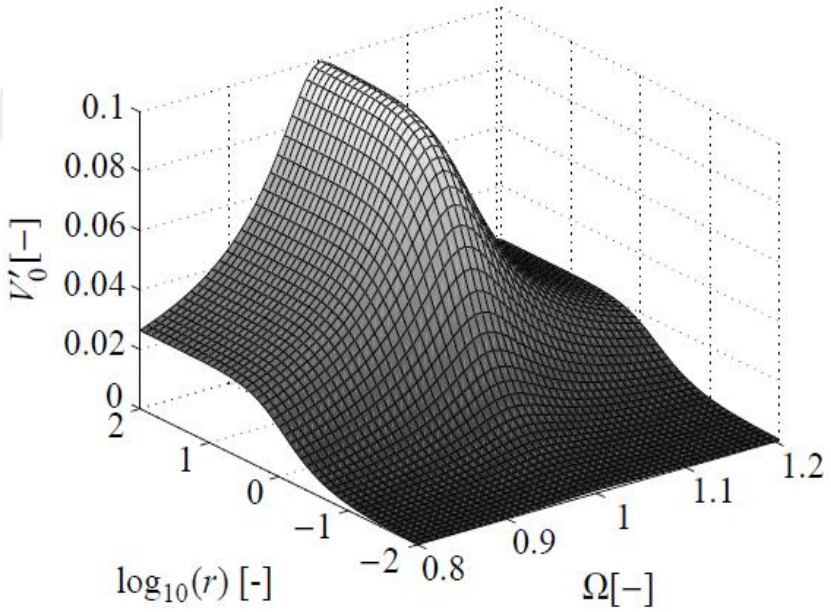
2.2.4.1. Düşük Bir Kuplajın Mekanik Etki Alanına Etkisi

Bağlantının düşük olması durumunda ($k_e^2 < 0.01$) bağlantının mekanik etki alanı üzerindeki etkileri ihmal edilebilir. Bu, toplanan enerjinin sönümleme yoluyla dağılanın sadece bir kısmını temsil ettiği ve elektromekanik kuplajın kendisinin düşük olduğu ($k_e^2 < 0.01$) [83] anlamına gelir.

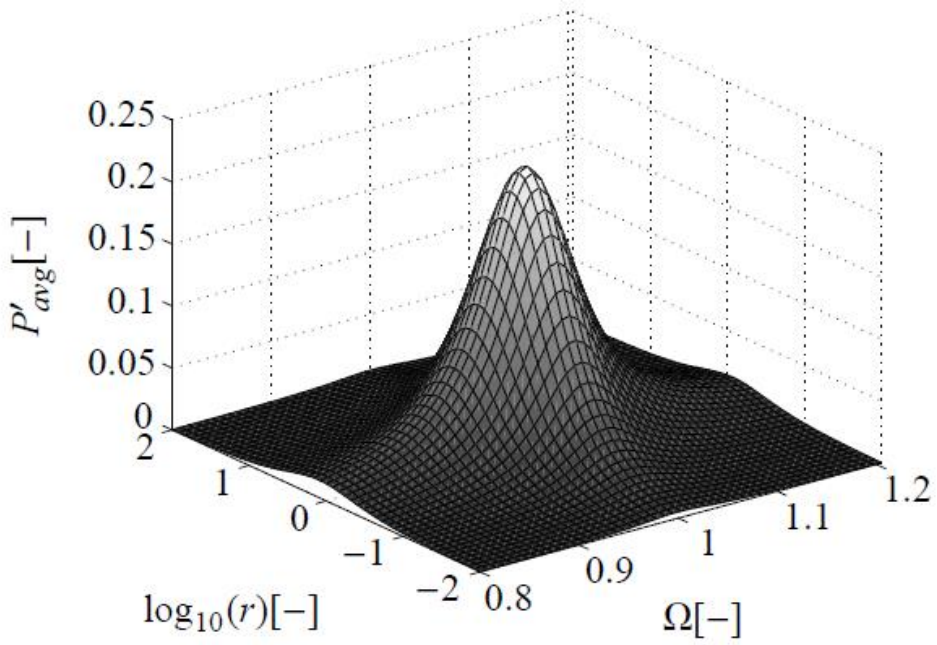
Kuplaj faktörü $k_e^2 = 0.01$ ve boyutsuz sönüm oranı $\xi = 0.05$ 'in bu değerleri için yer değiştirme, voltaj ve gücün normalleştirilmiş tepki grafikleri Şekil 2.18'den Şekil 2.20'ye [82] gösterilmektedir.



Şekil 2.17: Bir kuplaj faktörü k_e^2=0.01 ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği.



Şekil 2.18: Bir kuplaj faktörü k_e^2=0.01 için voltajın ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için normalleştirilmiş tepki grafiği.



Şekil 2.19: Bir kuplaj faktörü k_e^2=0.01 ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için gücün normalleştirilmiş tepki grafiği.

Şekil 2.18'de mekanik alanda Ω=1'de rezonans tepe noktası olduğu görülmektedir. Şekil 2.19, düşük direnç (r≪1) için voltajın boş olduğunu, yüksek direnç (r≫1) için ise elektrik alanında Ω=1'de bir voltaj rezonansı olduğunu gösterir. Son olarak, güç fonksiyonunun r ve Ω'a türevi kullanılarak Şekil 2.20'de Ω=1 ve r=1'de tek bir güç tepe noktası gözlemlenebilir. Düşük bir bağlantı için optimum direnç hesaplanabilir:

$$r_{opt} = \frac{1}{\Omega}; R_{opt} = \frac{1}{C_p \omega} \quad (2.47)$$

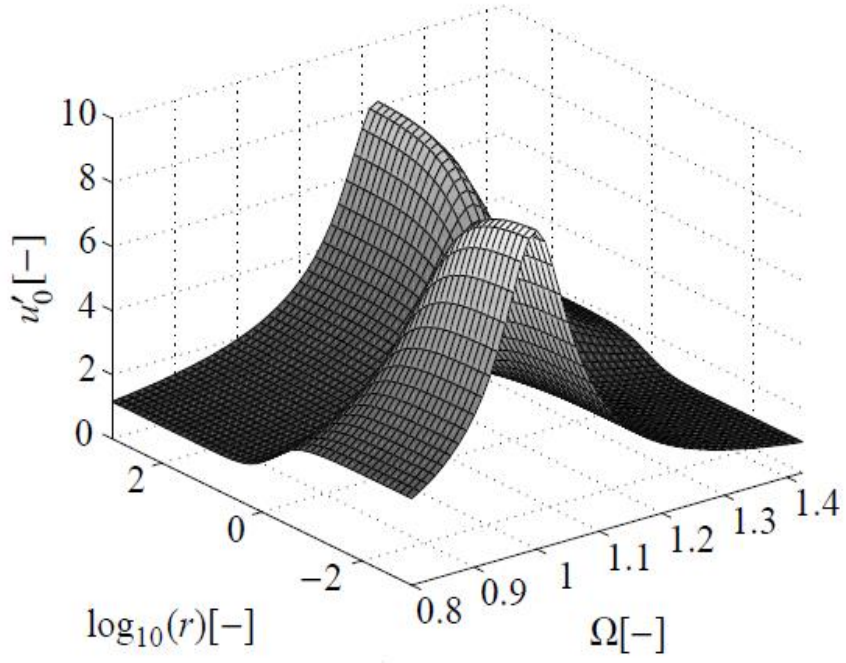
Bu tür bir sistem, düşük bir kuplaj için sistemin dinamik rijitliğinde ve doğal frekansında önemli bir değişiklik olmaması nedeniyle sıralı olarak çözülebilir. İlk olarak, problem çözme, geleneksel denklem sistemlerini çözme yöntemiyle mekanik bir alanla başlayabilir. Viskoz sönümlemenin her zaman toplanan güçten çok daha yüksek olduğuna dikkat edilmelidir. Bu gereksinim matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$k_e^2/\xi \ll 1 \quad (2.48)$$

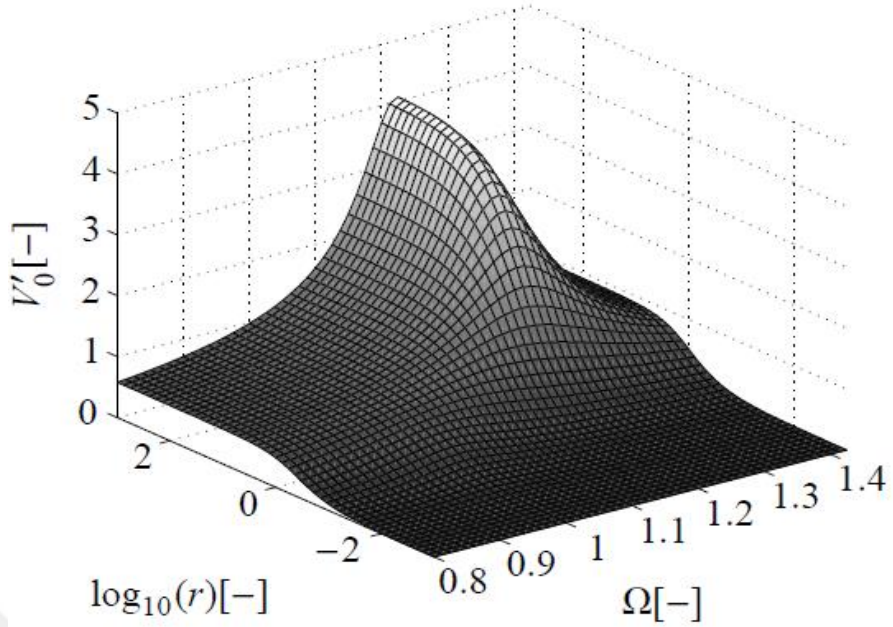
Mekanik alandaki denklem sisteminin çözülmesiyle bulunan yer değiştirmenin çözümü, gücü bulmak için elektrik alanında kullanılabilir. Bu amaçla, denklem 2.44 ila denklem 2.46 kullanılabilir.

2.2.4.2. Yüksek Bir Kuplajın Mekanik Etki Alanına Etkisi

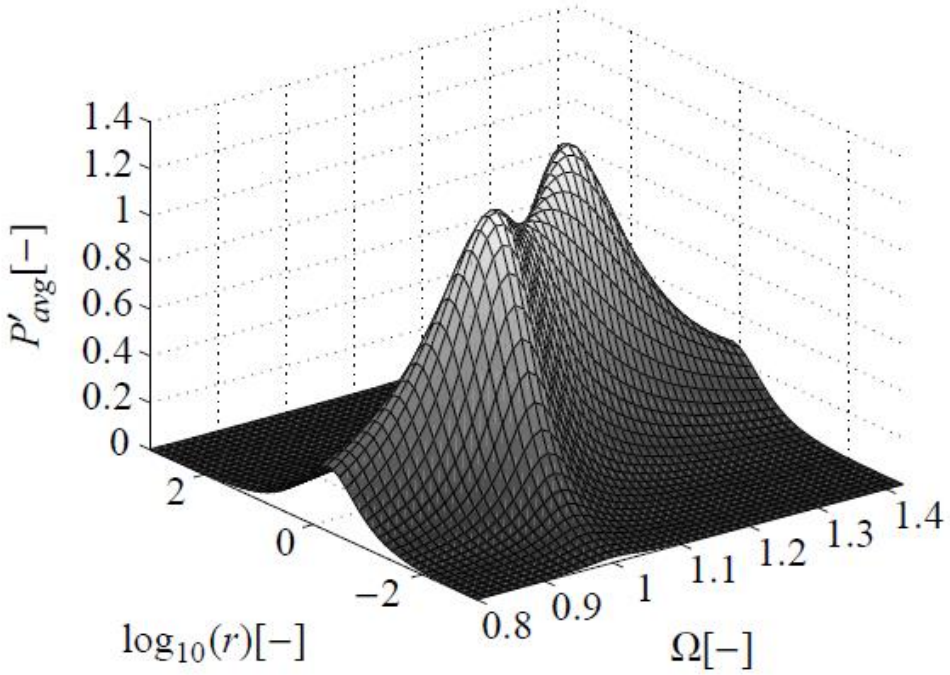
Yüksek bir kuplaj için yer değiştirme, voltaj ve ortalama gücün normalize edilmiş tepki grafikleri sırasıyla Şekil 2.21, Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'te gösterilmektedir$k_e^2 \gg 0.01$ olduğunda kuplajın yüksek olduğu kabul edilir. Şekil 2.21'de r≪1 için yer değiştirme tepkisinin tamamen mekanik olduğu görülebilir. Bununla birlikte, r 1'e yaklaştıkça eşleşmede önemli bir büyüme vardır. r, 1'in ötesine geçtiğinde, genlik ve doğal frekansta önemli bir kayma olur. Yüksek kuplajdaki voltajın davranışı, voltaj zirvesinin açık devre doğal frekansına doğru kayması dışında, düşük kuplajın davranışına oldukça benzerdir. Yüksek bağlantıda, düşük bağlantı için tek yerine iki güç tepe noktası vardır. Bu, empedans eşleştirme fenomeni [83, 84] ile açıklanabilir.



Şekil 2.20: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.5}$ için yer değiştirmenin ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05'in normalleştirilmiş tepki grafiği.



Şekil 2.21: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.5}$ için voltajın ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için normalleştirilmiş tepki grafiği.

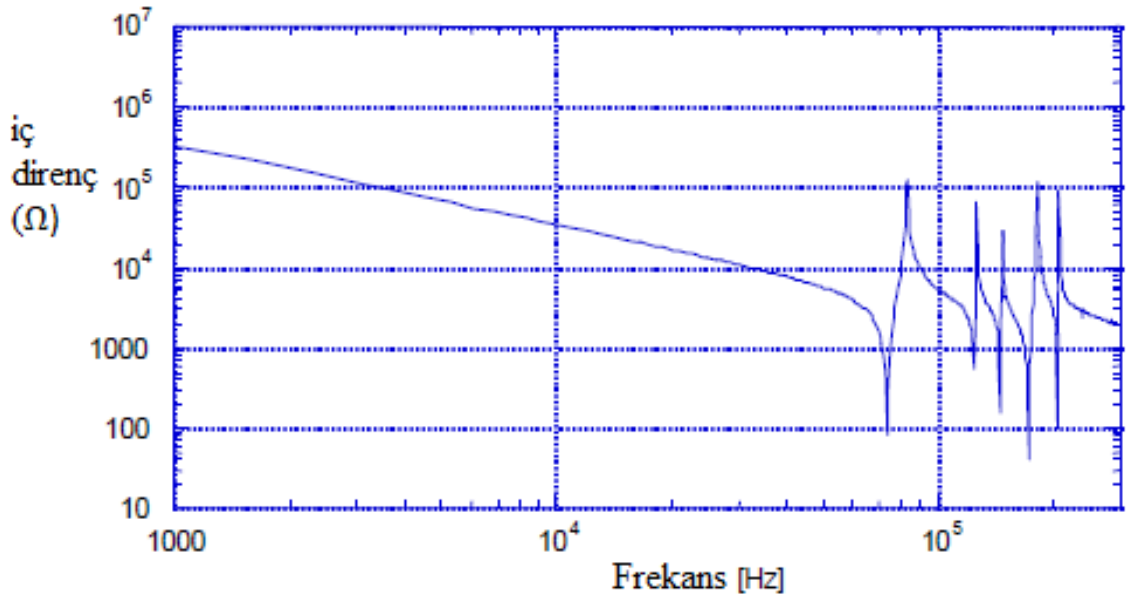


Şekil 2.22: Bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı ξ=0.05 için gücün normalleştirilmiş tepki grafiği.

2.2.5. Piezoelektrik Lineer Teorinin Sınırlamaları

2.2.5.1. Frekans Sınırlamaları

Çevremizdeki tüm nesneler doğal bir titreşim frekansına sahiptir. Fiziksel sistemin doğal frekansına yakın bir frekanstaki nesnelere periyodik seri elektrik, mekanik ve akustik darbeler uygulandığında, bu nesnelerde çok yüksek büyüklükte bir salınım meydana gelecektir. Genel olarak, normal malzemelerin mekanik uyarımı, mekanik bir rezonansa yol açar. Bununla birlikte, uygulanan bir mekanik alan, piezoelektrik malzemelerde elektrik rezonansı üretebilir. Tersine, bir elektrik alanının piezoelektrik malzemelerde büyük miktarda mekanik gerilim oluşturabileceğini belirtmek de çok önemlidir. Böylece, fiziksel sistemin mekanik doğal frekansına yakın bir frekansa sahip bir dizi periyodik elektrik darbesi bir rezonansa yol açacaktır. Piezoelektrik malzemenin (¨PZT) tipik frekans yanıtı Şekil 2.24'te gösterilmektedir. Bu eğri üzerinde doğrusal bir tepki alanı gözlemlenebilir. Rezonans frekansı, ortamın elektriksel ve mekanik koşullarının yanı sıra malzemenin özelliklerine de bağlıdır.



Şekil 2.23: PZT'nin tipik frekans yanıtı.

2.2.5.2. Elektrostriksiyon

Elektrostriksiyon, dielektriklerin bir elektrik alanına maruz kaldıklarında şekil değiştirmelerine neden olan bir özelliği olarak kabul edilir. Piezoelektrik malzemelerin bu özelliği, bir elektrik alanı varlığında kristal kafes içindeki iyon yer değiştirmesi ile açıklanır. Pozitif iyonların yer değiştirmesi uygulanan elektrik alanla aynı yönde, negatif iyonların yer değiştirmesi ise zıt

yöndedir. Yer değiştirmenin birikmesi, malzemenin gerilmesine yol açar. Bir piezo elektrik bileşeninin yanıtı genellikle bir doğrusal ve bir ikinci dereceden bileşenden oluşur. İkinci dereceden bileşen, elektrostriktif katsayı ile belirlenir.

2.2.5.3. Depolarizasyon

Poling işlemi, ZT'yi eski olarak polarize bir seramiğe kadar. "Belirli bir şekilde, "belirli" özelliklere sahip olmak için, "sıcaklık" konusunda sizi mutlu etmek için büyük önem vermek gerekir. Piezoelektrik üretim 3 ana depolarizasyon kaynağı: Termal, elektriksel ve mekanik depolarizasyon.

- **Termal depolarizasyon:** Bir piezoelektrik malzemenin kürlenme noktasına kadar ısıtılması, malzemenin tam bir depolarizasyonuyla sonuçlanan alan yönelimlerinde bir düzensizlik yaratacaktır. Bu nedenle, piezoelektrik malzemelerin curie noktalarının çok altındaki sıcaklıklarda kullanılması önemlidir. Genel olarak, bir piezoelektrik malzeme için güvenli çalışma sıcaklığı aralığı [0, curie sıcaklığı/2]'dir.
- **Elektriksel depolarizasyon:** Kutuplanma alanına zıt kutuplu çok güçlü bir elektrik alanının uygulanması, piezoelektrik malzemenin depolarizasyonuna neden olur. Malzeme özellikleri, alana maruz kalma süresi gibi faktörler, piezoelektrik malzemeyi depolarize etmek için gerekli alan kuvvetini belirler.
- **Mekanik depolarizasyon:** Çok yüksek mekanik stresin uygulanması, malzemenin depolarizasyonuna yol açan alanların oryantasyonunu bozabilir. Güvenli çalışma gerilimi aralığı malzeme kalitesine göre değişir.

2.3. PIEZOELEKTRİK MALZEMELERİN İŞLENMESİ

Günümüzde çok sayıda doğal ve sentetik piezoelektrik malzeme mevcuttur ve piezoelektrik ve piroelektrik cihaz ve uygulamalarda kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzeme üretim süreçleri, hem aktüatör hem de sensör uygulamalarında mikroelektromekanik sistemler (MEMS) ile entegre edilmiştir [85].

2.3.1. Tek Kristaller

Tek kristal malzemeler, doğal asimetrik yapıları nedeniyle daha fazla işlem aşaması olmaksızın piezoelektrik özellikler sergileyebilirler. İki ana tip tek kristal vardır: Ferroelektrik tek kristaller ve ferroelektrik olmayan tek kristaller.

2.3.1.1. Ferroelektrik Tek Kristaller

Ferroelektrik tek kristaller, uygulanan herhangi bir dış stres olmaksızın kalıcı bir polarizasyona sahiptir. Polarizasyon yönü, zıt yönlü güçlü bir elektrik alanı uygulanarak tersine çevrilebilir. Bu malzemelerin ana özelliği, herhangi bir elektrik alanı uygulanmadan kendiliğinden bir polarizasyonun varlığıdır. Bir elektrik alanına maruz kaldığında,

ferroelektrik malzemelerin bir manyetik alana maruz kaldığında ferromanyetik malzemelere benzer şekilde davrandığına dikkat edilmelidir.

Ferroelektrikliğin gözlemlendiği ilk malzeme Rochelle tuzudur. Ferroelektrik fenomeninin ilk teorileri 1930 ve 1934 yılları arasında Sovyetler Birliği'nde geliştirildi. Rochelle tuzunun ferroelektrik özellikleri, yalnızca bu malzemenin mono kristal numunelerinde ve kesin bir kristal eksen boyunca gözlemlenebilir. 1934'te Sovyet fizikçisi B.Vul, baryum titanat $BaTiO_3$'ün önemli keşfini yaptı. Baryum titanat, geniş bir sıcaklık aralığında ferroelektrik özelliklerin korunması, ısı ve neme karşı direnç, yüksek mekanik mukavemet ve üretim kolaylığı gibi önceden bilinen diğer tek kristalli ferroelektriklere göre çeşitli avantajlar sağlar. Bu malzeme dünya çapında çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır.

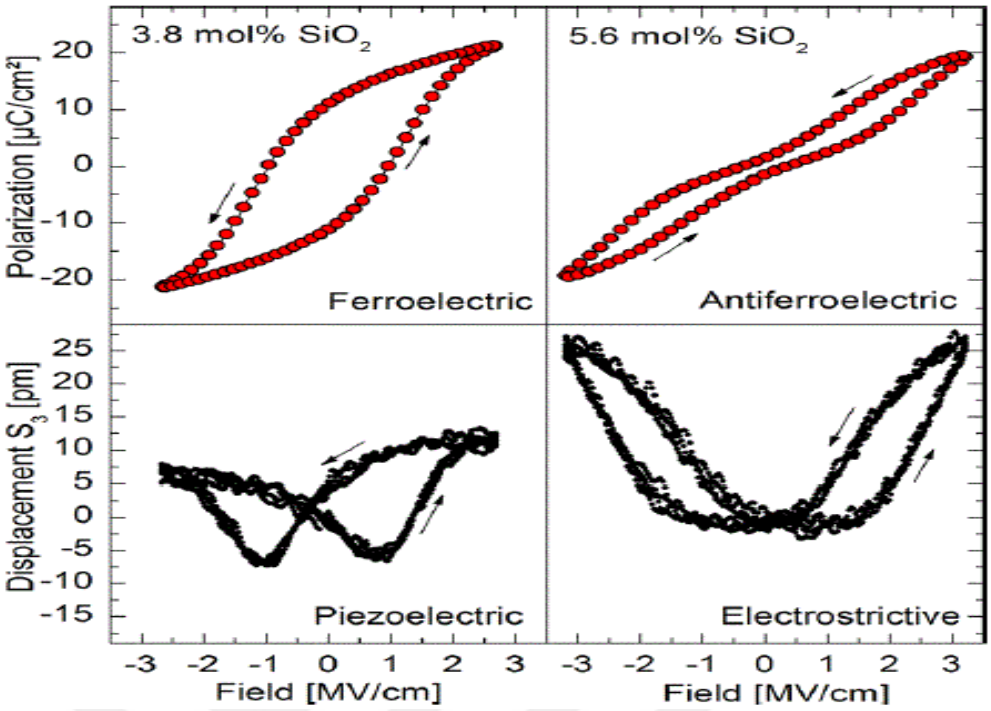
Baryum titanatın ana üretim adımı, eş moleküler miktarlarda baryum oksit (BaO) ve titanyum dioksitin (TiO_2) kavrulmasıdır. Daha sonra kurşun zirkonat, çinko titanatlar, stronsiyum ve kadmiyum gibi baryum titanata benzer birkaç ferroelektrik malzeme keşfedilmiştir.

2.3.1.2. Ferroelektrik Olmayan Tek Kristaller

Ferroelektrik olmayan tek kristal malzemeler, uygulanan harici elektrik veya mekanik alan iptal edildiğinde sıfır polarizasyon sergiler. Ayrıca domainlerin polarizasyon yönünü değiştirmek mümkün değildir. En yaygın olarak kullanılan ferroelektrik olmayan tek kristal piezoelektrik tek kristal piezoelektrik malzeme, SiO_2'nin bir polimorfu olan kuvarstır. Bu nedenle kuvarsın polarizasyon yönünü değiştirmek mümkün değildir.

Kuvars çeşitli ve çeşitli uygulamalarda kullanılır. Genel olarak, tek kristal kuvars laboratuvarda sıcak sudan (H_2O) hidrotermal büyüme tekniği ile üretilir. Bu işlem sırasında sıcaklık 397°C'ye ulaşabilir, basınç 170MPa civarındadır. Kuvarsın çözünürlüğünü arttırmak için mineralleştiriciye az miktarda NaOH veya Na_2CO_3 eklenir. Üretim sürecinde büyüme hızı çok yüksekse, üretilen malzemede çatlaklar ve kusurlar görünebilir. Büyüme çözeltisine bazı lityum tuzlarının eklenmesi, çözeltinin hidroksit (OH) seviyesini düşürür ve bu da malzemenin elektromekanik özelliklerinde önemli bir gelişme sağlar.

Kuvars, kendine has özellikleri nedeniyle yüksek hassasiyetli uygulama için gereklidir. Kuvars kristallerinin tüm piezoelektrik malzemelerin en kararlısı olduğuna dikkat edilmelidir. Aslında, piezoelektrik duyarlılığı mekanik stres, zaman ve sıcaklıktan bağımsızdır. Örneğin rezonatörler yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalardır. Bu nedenle bu bileşenlerde kuvars kullanılmaktadır.



Şekil 2.24: Piezoelektrik yer değiştirme – ferroelektrik, antiferroelektrik, piezoelektrik ve elektrostriktif modlarda polarizasyon grafikleri [86].

2.3.2. Polimer Filmler

Poliviniliden florür (PVDF) gibi polimerler, kristal fazdaki zincir birimlerinin özel düzenlenmesi nedeniyle ferroelektrik özelliklere sahiptir. İyi tepki ve yüksek hassasiyet gibi avantajları sayesinde PVDF birçok uygulamada kullanılmaktadır. Poliviniliden florür gibi polimerlerin piezoelektrik özellikleri, malzeme hem elektriksel hem de mekanik strese maruz kaldığında tamamen gelişir. Aslında, malzemenin piezoelektrik özellikleri, polimer filmin kutuplanmasıyla optimize edilebilir. Poling işleminin temel amacı, rastgele organize edilmiş dipolar momentleri uygulanan alana göre hizalamaktır. Kutuplama işleminin polimerlere sağladığı başlıca avantajlardan biri, dielektrik kaybının azalması ve ana dipollerin hizalanması nedeniyle dielektrik sabitinin artmasıdır [87]. Poliviniliden florür, eriyikten dökülmüş gibi a polar olmayan formda kristalleşir.

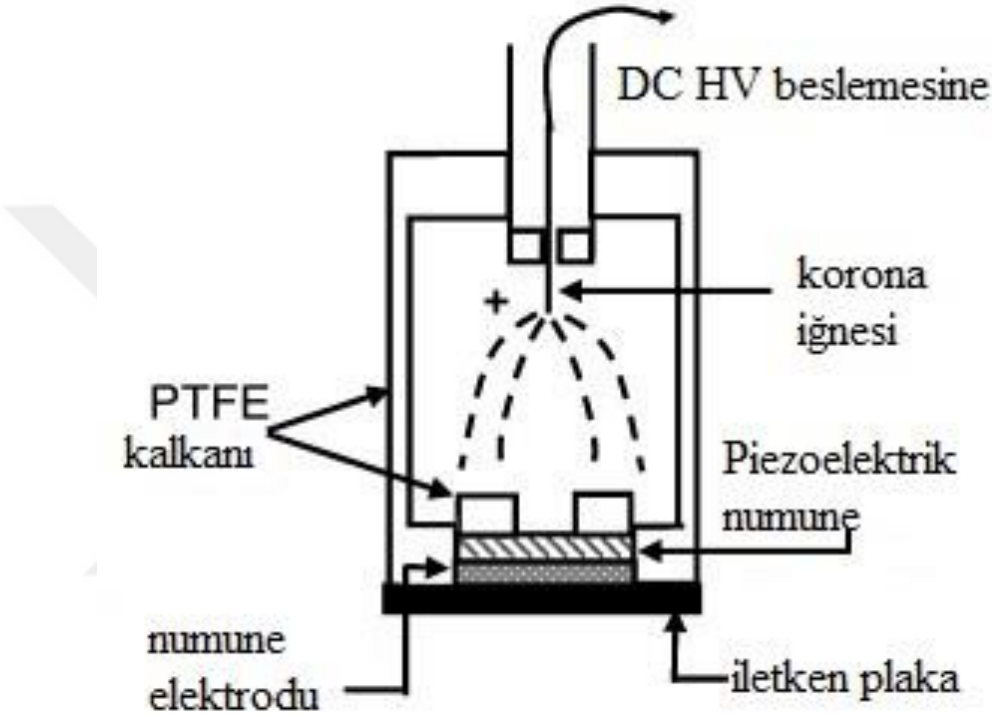
Malzemenin başlangıç uzunluğunun 5 katına kadar gerilmesi, polimerin, bir tarafta tüm hidrojen atomları ve diğer tarafta flor atomları ile düzlemsel bir zig zag düzenlemesi ile karakterize edilen β konfigürasyonuna geçmesine neden olacaktır.

Polimeri bir elektrik alanında kutuplamak, dipollerin paralel yönlenmesine yol açacaktır. Kutuplama işlemindeki elektrik alanı ne kadar yüksek olursa, PVDF filminin elektrik çıkış tepkisi o kadar iyi olur.

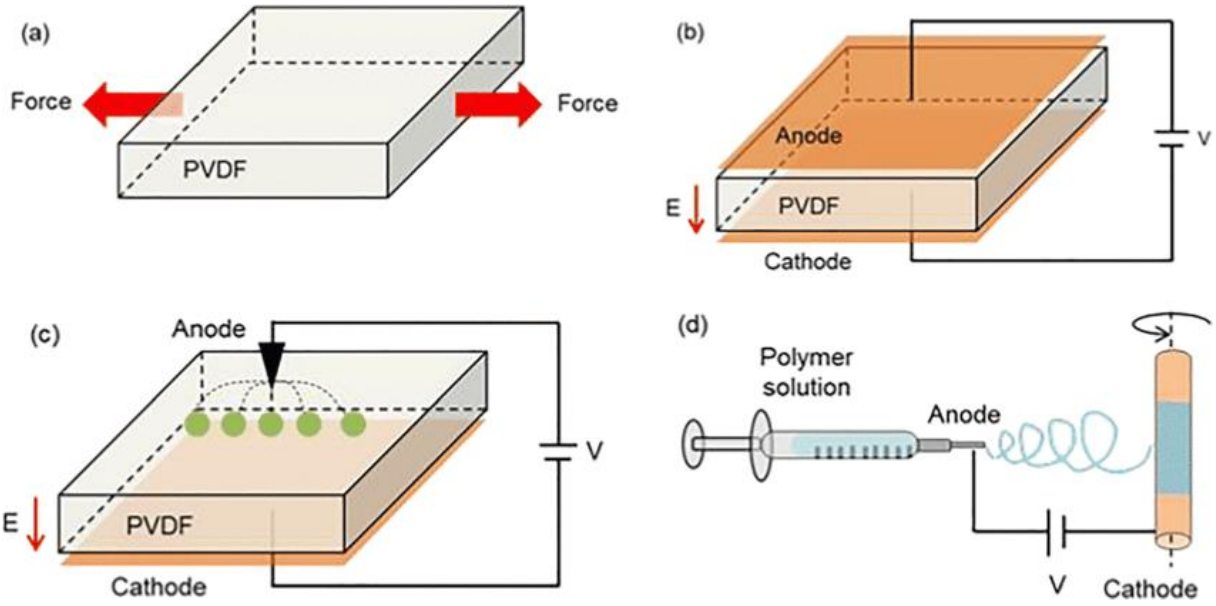
Ayrıca, PVDF filminin yüksek sıcaklık koşullarında mekanik olarak gerilmesi ve elektriksel olarak kutuplanması, piezo ve piro-elektrik sabitlerinde büyük bir artışa neden olur. Korona kutuplama, optoelektronikte kullanılan tekniklerden biridir. Korona kutuplama, korona deşarjları yoluyla gerçekleştirilen ferroelektrik malzemeler için temassız bir kutuplama işlemidir. Bu deşarjlar, homojen olmayan bir elektrik alanındaki deşarj ile başlatılan kısmi

hava arızaları olarak tanımlanabilir. Bu tür bir kutuplama işlemi, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinde optimum sonuçlar sağlar [88]. Optimum koşullar altında işlem gerçekleştirildiğinde, elverişsiz koşullar altında elde edilen sonuçlara kıyasla piezoelektrik ve piroelektrik sabitlerinde %100'lük bir iyileşme elde edilmiştir [89].

Şekil 2.26'da bir korona kutuplama aparatı görülebilir. Bu cihaz, bir DC HV (doğru akım yüksek voltaj) kaynağı, sistemin güvenliği için politetrafloroetilen (PTFE) kalkanlar, bir korona iğnesi ve korona deşarjlarının üretildiği bir numune arka elektrotu, kutuplanacak piezoelektrik malzeme ve piezoelektrik malzemeden oluşur. iletken bir levha.



Şekil 2.25: Bir korona kutuplama aparatı [90].

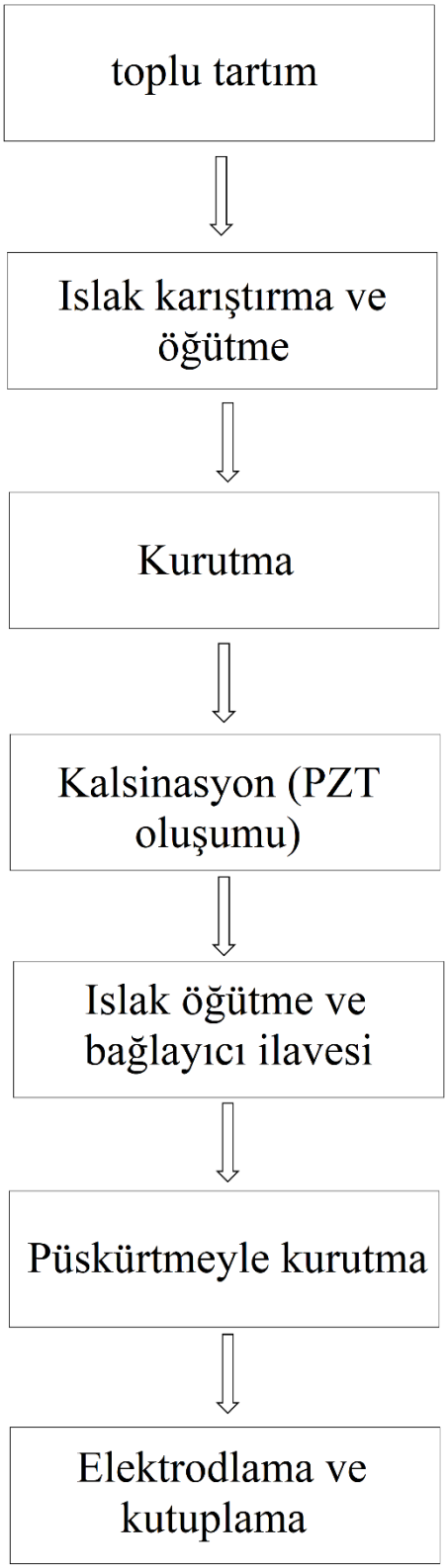


Şekil 2.26: Bir PVDF polimer filmin işlenmesi (a) mekanik stresin uygulanması, mekanik gerdirme (b) kontak kutuplama (c) krona kutuplama (d) elektro-eğirme işlemi [91].

2.3.3. Seramik

Tek kristalli piezoelektrik malzemelerin üretilmesi genellikle zor ve maliyetlidir. Bu nedenle baryum titanat ve benzeri malzemeler gibi polikristal piezoelektrik malzemeler çeşitli uygulamalar için tercih edilmiştir. Ferroelektrik seramikler olarak etiketlenirler ve geleneksel seramik üretim süreçleri kullanılarak üretilirler.

Kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi bir ferroelektrik seramiğin üretimi sırasında, gerekli miktarlarda zirkonyum, titanyum ve Sb2O5, CaO, Nb2O5, MnO gibi katkı maddelerinin yüzde birkaçı ile oksitler mekanik olarak karıştırılır. Daha sonra karışım kurutulur ve 800° - 1000°C arasındaki sıcaklıklarda kalsine edilir. Kurutma işleminden geçecek bir miktar bulamaç üretmek için elde edilen malzemeye organik bağlayıcılar eklenir. Daha sonra seramikler 1100 – 1300°C arasında değişen sıcaklıklarda presleme ve fırınlama teknikleri ile kullanım alanlarına göre şekillendirilir. Bununla birlikte, bireysel kristallerin rastgele polarizasyonu, bu seramiklerin piezoelektrik özellikler sergilemesine izin vermez. Bunun için seramiklerin önce bir polenleme sürecinden geçmesi gerekiyor. Bu kutuplama işlemi, seramik malzemelerin kalıcı bir polarizasyon ile kalmasını sağlayacaktır. Kurşun-lantan zirkonat titanat (PLZT) elde etmek için PZT işlemine lantan oksit ilavesi ve uzun sıcak presleme işlemleri ile şeffaf piezoelektrik malzemelerin üretildiği unutulmamalıdır.



Şekil 2.27: Karışık oksit yöntemiyle PZT üretimi.

Tablo 2.6, piezoelektrik malzemelerin sınıflandırmasını göstermektedir.

Tablo 2.6: Piezoelektrik malzeme türleri.

PIEZOELEKTRİK MALZEME TÜRÜ	ÖRNEKLER
Tek kristal: ferroelektrik [(1)] and ferroelektrik olmayan [(2)]	**Sentetik:** Potasyum Dihidrojen Fosfat (KDP)[(1)], Baryum Titanat Tek Kristali ($BaTiO_3$)[(1)], Amonyum dihidrojen fosfat (ADP), Etilen diamin tartrat (EDT) **Doğal**: Rochelle tuzu[(1)], Pirit, Kuvars[(2)], Borasit, Çinko Blende / Sfalerit, Topaz, Turmalin, Şeker.
Tahıl odaklı Cam seramikler	$2BaO\text{-}3SiO_2\text{-}TiO_2$
Ferroelektrik seramikler (Polikristalin ferroelektrikler)	$BaTiO_3$ seramik, PZT, PLZT, SBT, PBT, NBT
ferroelektrik polimerler	PVDF
ferroelektrik kompozitler	1-3 PZT- polimer kompozit

Piezoelektrik malzemeler çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu uygulamalardan biri de transformatörlerde piezoelektrik malzemelerin kullanılmasıdır.

2.4. REZONANT PIEZOELEKTRİK TRANSFORMATÖRLER

Bir piezoelektrik transformatör, tahrik ve tahrik edilen bölge olmak üzere iki ana bölgeye ayrılmış bir piezoelektrik gövde olarak tanımlanabilir. Transformatörün birincil devresi, tahrik kısmında bulunurken, ikincil devre, transformatörün tahrik edilen kısmında bulunur. Bu bölgeler elektriksel olarak yalıtılmış ancak mekanik olarak bağlantılıdır. Malzemenin tahrik kısmında, giriş elektrik akımından mekanik titreşimler üretilir. Bu mekanik titreşimler, farklı voltaj, akım veya empedansa sahip bir elektrik sinyaline yeniden dönüştürüldüğü malzemenin sürülen kısmının uyarılmasına neden olur. Özetlemek gerekirse, bir piezoelektrik transformatörün çalışma prensibi, ilk önce elektrik enerjisinin tahrik bölgesinde mekanik enerjiye piezoelektrik dönüşümü ve daha sonra tahrik edilen bölgede mekanik enerjinin elektrik enerjisine yeniden dönüştürülmesi ile karakterize edilir. Transformatörler, rezonans içinde çalışan piezoelektrik malzemelerin karlı özelliklerinden yararlanır. Bu nedenle, bu transformatörler rezonans piezoelektrik transformatörler olarak etiketlenir. Rezonans piezoelektrik transformatörler, rezonans frekanslarından birinde çalıştırılan bir malzemenin piezoelektrik özelliklerini kullanan pasif elektrik enerjisi transfer dönüştürücüleridir. Bu işlemin amacı voltaj, akım veya empedans dönüşümü elde etmektir. Sadelikleri, kullanım kolaylıkları ve imalatları sayesinde bu tür transformatörler geleneksel elektromanyetik transformatörlerin yerini almıştır. Şekil 2.29, bir rezonans piezoelektrik transformatörün yapısını göstermektedir.



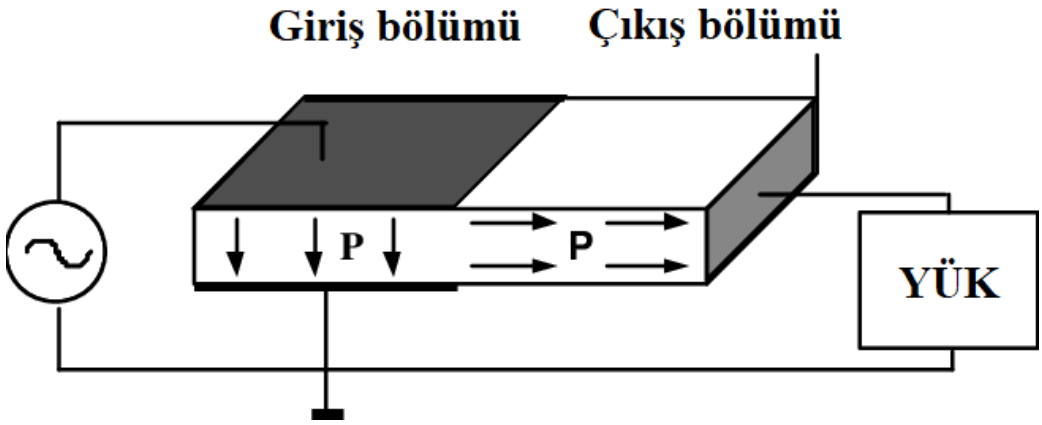
Şekil 2.28: Tipik bir piezoelektrik transformatörün yapısı.

Geleneksel elektronik transformatörleri kompakt hale getirmek için anahtarlama frekansı artırılır. Anahtarlama frekansının artması, histerezis kaybı, girdap akımı ve iletkenin cilt etkisi yoluyla güç kaybının artmasına neden olur ve bu transformatörlerin düşük verimliliğine neden olur. Geleneksel elektromanyetik transformatörlerin çalışma frekansı 500 kHz'i aşamaz.

Geleneksel elektromanyetik transformatörlerin aksine, rezonanslı piezoelektrik transformatörler rezonans modunda çalıştırılır. Bu sayede, ince ve kompakt şekilleri, yüksek güvenilirlikleri ve verimlilikleri ile yüksek voltaj sağlama yetenekleri gibi geleneksel elektromanyetik olanlara göre sayısız avantaj sunarlar. Piezoelektrik malzemelerin yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle rezonans transformatörleri daha az hacimlidir ve piezoelektrik transformatörlerin ince olmasına olanak tanır. Ayrıca, transformatörün elektromanyetik indüksiyonundan dolayı elektromanyetik parazit yoktur. Rezonanslı piezoelektrik transformatörlerin diğer geleneksel transformatörlere göre sunduğu bu avantajlar, güç dönüştürücüler, Katot ışın tüplü (CRT) ekran, düz panel ekran, fotokopi makineleri, sıvı kristal ekran, LED arka ışıklar gibi çeşitli uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmalarını sağladı…

2.4.1. Rosen Tipi Rezonanslı Piezoelektrik Transformatörler

Charles A. Rosen ve Keith Fish, patentlerinde [92] 1954'te piezoelektrik transformatör kavramını tanıtan ilk bilim adamıydı. Bu transformatöre Rosen adı verildi ve Rosen tipi transformatör olarak bilinir. Rosen tipi transformatör, Şekil 2.30'da gösterildiği gibi birbirine göre enine polarize olan iki bölgeye ayrılmış ince bir piezoelektrik dikdörtgen gövde olarak tanımlanabilir. Tahrik ve tahrik bölgeleri, epoksi reçineler gibi bazı çimentolar kullanılarak ayrı ayrı üretilebilir ve bir araya getirilebilir. Ancak elde edilen sonuçlar, tek parça piezoelektrik malzemeden yapılmışsa daha iyidir. Polarizasyon uzunlamasına, sürülen bölgedeki ise uzunlamasınadır. İki bölgedeki polarizasyon vektörleri birbirine göre dik açıdadır.



Şekil 2.29: Rosen tipi piezoelektrik transformatör [93].

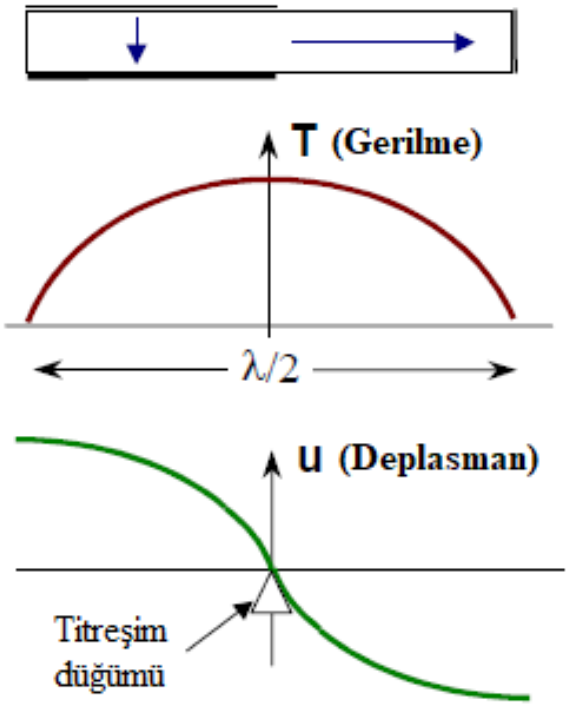
Rosen tipi bir piezoelektrik transformatörün çalışması sırasında, bir alternatif akım kaynağı, piezoelektrik gövdenin uzunlamasına eksenine çapraz olan sürücü (giriş) bölgesine bir miktar güç sağlar. Elektrik alanının yönünün, sürüş bölgesinin polarizasyonunun P yönüne paralel olduğuna dikkat edilmelidir. Bu alternatif potansiyelin tahrik bölgesine uygulanması, piezoelektrik gövdenin kalınlık boyutunun bir varyasyonuna yol açacaktır.

Bu enine gerilme, gövdenin uzunlamasına boyutunda bir gerilmenin oluşmasına neden olur. Bu, vücudun sürüş bölgesinde uzunlamasına titreşimlere neden olur. Vücudun, uygulanan potansiyellerin frekansına eşit bir frekansta temel modda her iki uçta bir anti-düğüm ile rezonansa girmesi gerektiğinde, sürülen (çıkış) bölgenin elektrotları arasında periyodik bir potansiyel ortaya çıkar. Bu elektrotların bağlanması, bu periyodik potansiyelleri yüksek empedanslı yük cihazına sağlayacaktır.

Sürüş alternatif akımının frekansı rezonans değilse, titreşim iletimi sırasında kayıplar vardır. Bu nedenle, çıkış voltajı giriş voltajından daha düşük olacaktır.

Rezonanssız modun aksine, piezoelektrik transformatöre giden alternatif akımın sistemin mekanik frekansı ile aynı frekansa sahip olması durumunda, sürüş bölgesinde oluşan titreşim çok yüksek olacaktır. Bu, yüksek voltaj üretimine neden olacaktır.

Temel titreşim düğümünde uyarılan rezonanslı bir piezoelektrik transformatördeki partikül yer değiştirmesi ve mekanik stres dağılımı Şekil 2.31'de gösterilmektedir. Yüksek mekanik kalite faktörü Qm'nin seçimi, neredeyse sinüzoidal olan bir partikül yer değiştirmesinin elde edilmesini sağlamıştır. Temel uyarma modunda, yer değiştirme, rezonans transformatörünün tam ortasında bir düğüme sahiptir [94].



Şekil 2.30: Rosen tipi bir piezoelektrik transformatörün temel titreşim modu – piezoelektrik gövdenin uzunlamasına ekseni boyunca mekanik stresin ve partikül yer değiştirmesinin dağılımı [93].

Geleneksel elektromanyetik transformatörlerin aksine, piezoelektrik rezonans transformatörleri dar bantlı cihazlardır. Nitekim bu tür transformatörlerle verimli bir dönüşüm elde edebilmek için mekanik rezonansta çalıştırılması gerekmektedir.

Efektif kuplaj faktörü k_{eff}, mekanik kalite faktörü Qm ve piezoelektrik gövdenin boyutları gibi parametreler, yüksüz voltaj dönüşüm oranını belirler. Bu dönüşüm oranı şu şekilde tanımlanabilir [95]:

$$r = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{4}{\pi^2}.k_{31}.k_{33}.Q_m.\frac{L}{t} = \frac{4}{\pi^2}.\frac{|d_{31}.g_{33}|}{\sqrt{S_{11}^E.S_{33}^E}}.Q_m.\frac{L}{t} \quad (2.49)$$

Burada L, dönüştürücünün uzunluğudur ve t, kalınlığıdır.

PXE43, genellikle güç uygulamalarında kullanılan rijit kurşun zirkonat titanat (PZT) seramiktir. Gerçekten de, bu malzemenin güç yoğunluğu, herhangi bir termal sorun yaşamadan 25Watt/cm3'ün üzerindedir. PXE43'ün diğer parametreleri Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7: PXE43'ün parametreleri.

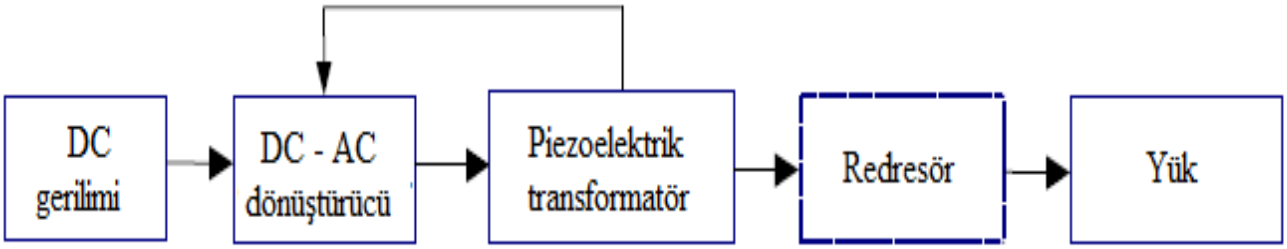
Q_m^E	$tan\delta$	$d_{31}[C/N]$	$g_{33}[V-m/N]$	$S_{11}^E[Pa^{-1}]$	$S_{33}^E[Pa^{-1}]$	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$
1000	2.10^{-3}	100.10^{-12}	27.10^{-3}	11.10^{-12}	13.10^{-12}	1000

Piezoelektrik gövde uzunluğu 24 ve kalınlığı 4 olan rezonanslı bir piezoelektrik transformatörü ele alırsak, transformatör voltaj oranı hesaplanabilir:

$$r = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\left|100.10^{-12} \times 27.10^{-3}\right|}{\sqrt{11.10^{-12} \times 13.10^{-12}}} \times 1000 \times \frac{24}{4} = 595$$

Bir sinüzoid veya sinüs dalgası sinyali, düzgün bir periyodik salınımı temsil eden sürekli matematiksel eğri olarak tanımlanabilir. Piezoelektrik transformatörleri çalıştırmanın en verimli yolu sinüs dalgası sinyali kullanmaktır. Bununla birlikte, sinüs dalgası oluşturmak için kare dalga voltajı yeterli değildir, daha karmaşık elektroniklere ihtiyaç vardır. Bu nedenle, anahtarlama kaybını en aza indirecek bir teknikle birlikte kare dalga gerilim tekniğini kullanmak gerekir.

Bu diğer teknik, Sıfır Volta Anahtarlama (ZVS) olarak etiketlenmiştir. Bu tekniği kullanmak için gerekli olan mekanizma bir DC güç kaynağından oluşmaktadır. Sağlanan DC voltajı, rezonans piezoelektrik transformatöre iletilen kare dalga voltajına dönüştürülür. Sistem gereksinimlerine bağlı olarak piezoelektrik transformatörün çıkışına bir redresör konulabilir. Üretilen ve/veya düzeltilen çıkış voltajı yüke verilir. Elektromanyetik transformatörlerle karşılaştırıldığında, piezoelektrik transformatörler yük değişimlerine karşı çok hassastır. Bu yük varyasyonları, rezonans frekans kaymalarına neden olabilir. Bu nedenle, Şekil 2.32'de gösterildiği gibi ya trafodan ya da yükten bir geri besleme bağlantısı yoluyla frekansı izlemek gereklidir.

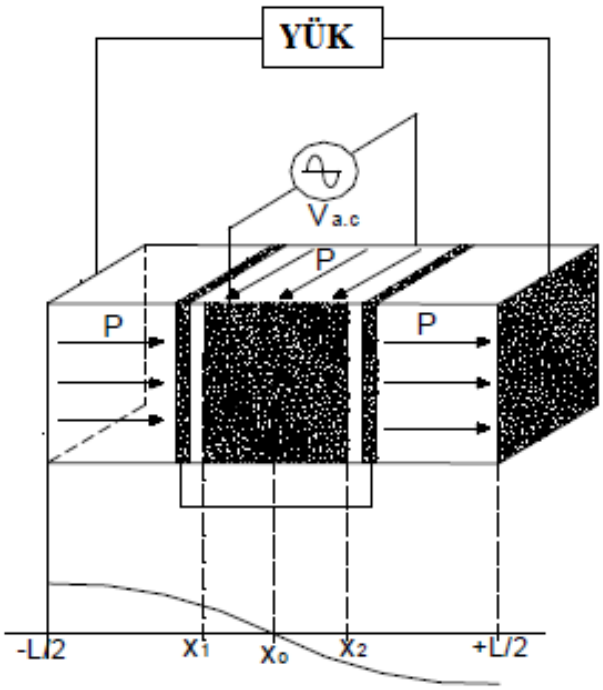


Şekil 2.31: Piezoelektrik rezonans transformatörü sürüş prensibi.

2.4.2. Rosen Tipi Piezoelektrik Transformatörün Topolojileri

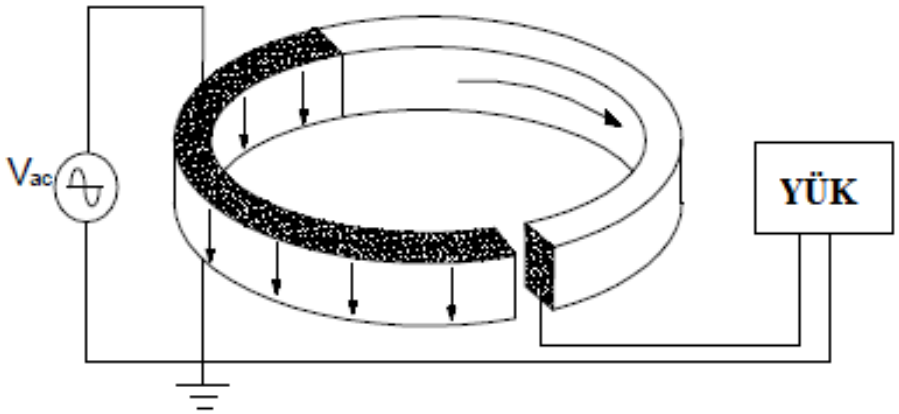
Rosen ve Fish, patentlerinde [92] birkaç transformatör modeli ve konfigürasyonu önerdiler. Rosen tipi piezoelektrik transformatörün beş ana konfigürasyonunu önerdiler.

- **Uzatılmış dikdörtgen piezoelektrik transformatör:**



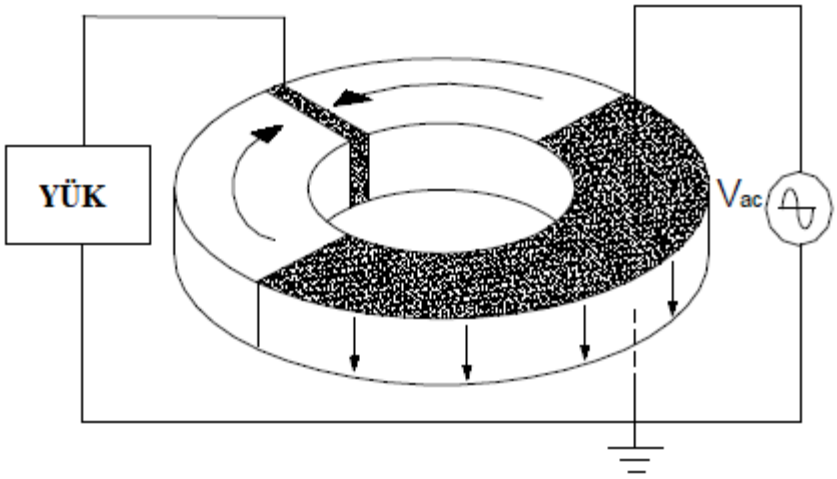
Şekil 2.32: Uzatılmış dikdörtgen piezoelektrik transformatörün şeması.

- **Dar çift kutuplu halka piezoelektrik transformatör:**



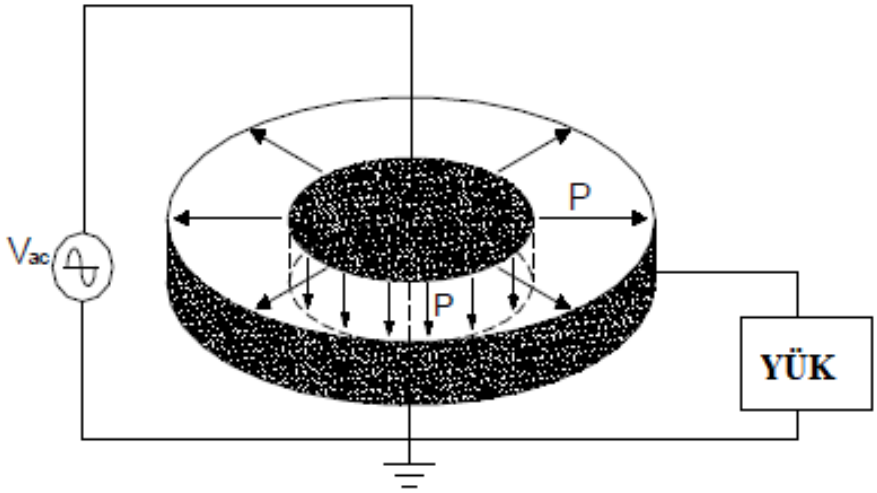
Şekil 2.33: Dar çift kutuplu halka piezoelektrik transformatörün şeması.

• Kalın çift kutuplu disk piezoelektrik transformatör:



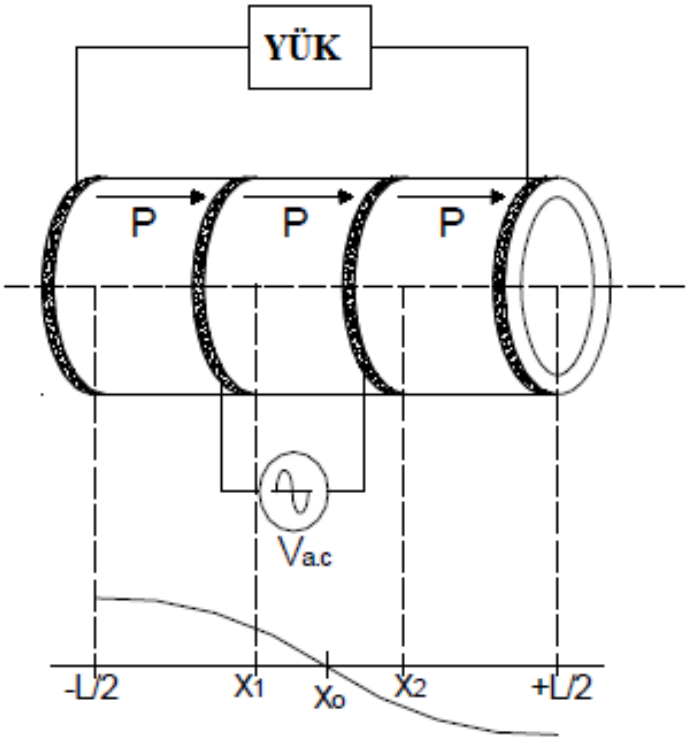
Şekil 2.34: Kalın çift kutuplu disk piezoelektrik transformatörün şeması.

• Çift kutuplu diskli piezoelektrik transformatör:



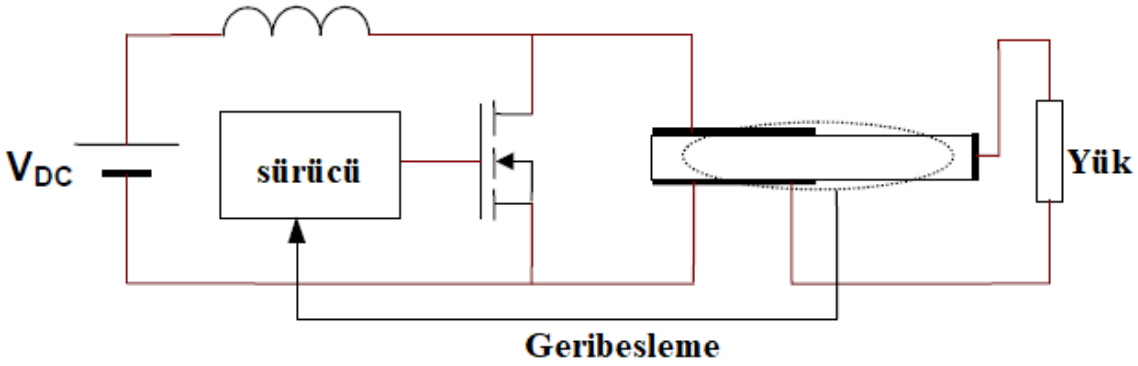
Şekil 2.35: Çift kutuplu disk piezoelektrik transformatörün şeması.

• **Boru biçimli piezoelektrik transformatör:** genellikle eksenel olarak kutuplanmış piezoelektrik borulardan ve metal borulardan oluşur.



Şekil 2.36: Boru şeklindeki piezoelektrik transformatörün şeması.

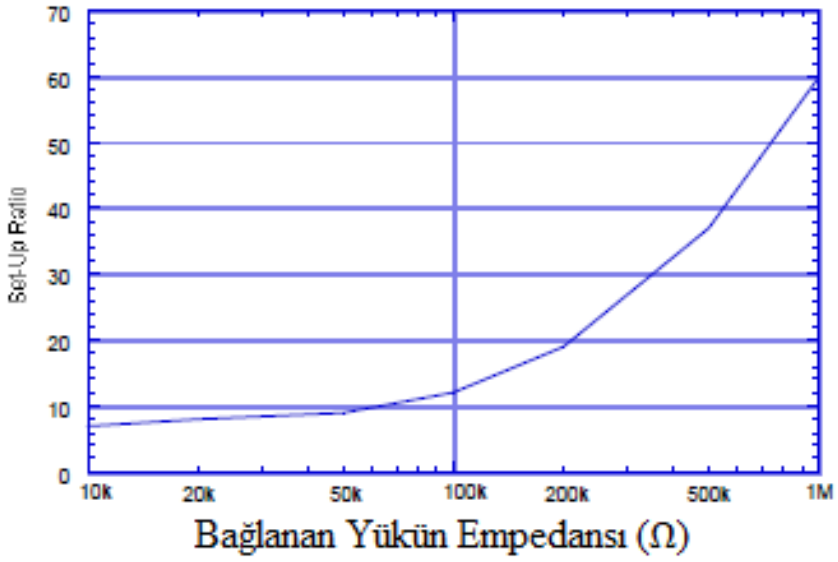
Yukarıda bahsedilen topolojiler Rosen ve Fish tarafından patentlerinde önerilmiştir. Bununla birlikte, bilimdeki gelişmeler sayesinde, piezoelektrik transformatörlerin başka bir konfigürasyonu kullanılmaktadır. Piyasada bulunan en basit, en iyi bilinen ve tek olanıdır.



Şekil 2.37: Bir amplifikatör tarafından tahrik edilen piezoelektrik rezonans transformatörü.

2.4.3. Piezoelektrik Transformatörün Çıkışına Bağlı Yük Empedansının Etkisi.

Piezoelektrik transformatörün çıkışı, bağlı yük empedansına bağlıdır. Piezoelektrik dönüşüm çıktı özelliklerine bir örnek Şekil 2.39'da gösterilmektedir. Bu örnekte, yük empedansı ne kadar büyük olursa, piezoelektrik transformatörün dönüşüm oranının o kadar yüksek olduğu görülebilir. Yük empedansının 1MΩ civarında olması durumunda yüksek bir dönüşüm oranı elde edilir. Böylece çıkış gücü daha yüksektir. Ayrıca, bağlı yük empedansı 100kΩ'nin altındaysa, dönüşüm oranının önemli ölçüde azaldığı ve çıkış gücünde bir düşüşe neden olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 2.38: Bağlı yük empedansının dönüşüm oranı üzerindeki etkisi.

Piezoelektrik transformatörün çıkış empedansı aşağıdaki ifade ile açıklanabilir:

$$Z_{out} = \frac{1}{C_{d2}.\omega} = \frac{1}{\left(1-k_{33}^2\right).\varepsilon_0.\varepsilon_r.\frac{W.t}{L_{out}}.2\pi.f} \quad (2.50)$$

Burada C_{d2} piezoelektrik transformatörün ikincil tarafının kısıt kapasitansıdır.

k_{33} piezoelektrik malzemenin 33 polarizasyon yönündeki elektroteknik bağlantı katsayısıdır.

ε_0 vakum geçirgenliğidir

ε_r malzemenin göreceli geçirgenliğidir

L_{out} piezoelektrik transformatörün ikincil tarafının elektrotlar arası mesafesidir.

t piezoelektrik transformatörün kalınlığıdır

W, piezoelektrik transformatörün genişliğidir

ω açısal frekanstır

f sürüş frekansıdır.

Eşleşen yük, rezonans piezoelektrik transformatör çıkış empedansının yük empedansı ile eşleştiği yüktür. Aynı zamanda çıkış özelliklerinin ani bir şekilde artmasına neden olan yüktür. Transformatörün optimum performansı için, transformatör çıkış empedansının bağlı yük empedansından daha düşük olması gerekir. Bu nedenle, zaten durum böyle değilse, bu gereksinimi karşılamak için piezoelektrik transformatör çıkış empedansı azaltılmalıdır.

2.4.4. Q'nun Transformatörün Rezonans Frekansı Üzerindeki Etkisi.

Bir piezoelektrik malzemenin Q özelliği aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$Q = \frac{Center\ frequency}{Bandwidth} \quad (2.51)$$

Piezoelektrik transformatör tasarlanırken dikkate alınması gereken önemli bir husus transformatörün rezonans frekansında çalışmasını sağlamaktır. Elektromanyetik ve piezoelektrik transformatörler arasındaki önemli bir fark, piezoelektrik transformatörlerin Q'sunun elektromanyetik olanlardan çok daha yüksek olmasıdır. Q ne kadar yüksekse, bant

genişliği o kadar dardır. Bu, bir elektromanyetik transformatörün rezonans frekansını korumanın bir piezoelektrik olandan daha kolay olduğu anlamına gelir.

Mümkün olan en iyi performansı elde etmek için, transformatör rezonans frekansında veya çok yakınında sürülmelidir. Bazen ±%0,5'lik bir hata bile transformatörün düzgün çalışması üzerinde çok kötü sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, bir voltaj geri beslemesi yoluyla transformatörün frekansını izlemek çok önemlidir. Bir piezoelektrik transformatörün çalışması sırasında rezonans frekansını çok sayıda faktör etkileyebilir. Bu faktörler çıkış yükü değişimi, sıcaklık, sürücü seviyesi olabilir…

2.4.5. Ölçme Uygulamalarında Rezonans Transformatörlerinin Sınırlamaları

Rezonans piezoelektrik, çok sayıda ölçüm uygulamasında kullanılmaktadır. Bir transformatörde, birincil devre kaynaktan güç çeken devredir, ikincil devre ise dönüştürülen voltajı yüke ileten devredir. Güvenilir ölçümler elde etmek için transformatörün, ölçüm ve ikincil koruma sistemlerini sürmek için birincil elektrik büyüklüğünü azaltabilme gibi bazı gereksinimleri karşılaması gerekir. İkinci olarak, dönüştürücü ayrıca birincil ve ikincil devreleri dielektrik olarak ayırabilmeli ve kişinin güvenliğini sağlayabilmelidir. Üçüncüsü, birincil ve ikincil seviyeler arasındaki transformatör oranı çok doğru olmalıdır.

Rosen tipi bir transformatörün tahrik ve tahrik elektrotlarının değiştirilmesi veya değiştirilmesi, bunların ölçüm ve koruma sistemlerinde kullanılmasına izin verebilir. Bu anahtar, transformatör aracılığıyla yüksek voltaj girişinden çok düşük voltaj çıkışı elde edilmesini sağlayacaktır.

Bununla birlikte, ölçme ve koruma sistemleri için voltaj dönüşümü rezonans piezoelektrik transformatörler tarafından gerçekleştirilebilse de, ölçüm ve koruma sistemlerinde Rosen tipi transformatörlerin kullanımını sınırlayan bazı yönler vardır. Birinci husus, ölçülecek olan yüksek gerilim akımlarının ana frekans aralığının, piezoelektrik transformatörleri rezonans frekanslarında çalıştırmak için çok düşük olan 50 ila 60 Hz arasında olmasıdır. İkinci olarak, ölçümler sırasındaki en önemli faktörün, rezonans frekanslarında çalıştırılan piezoelektrik transformatörler tarafından sağlanamayan çok yüksek doğruluk olduğuna dikkat edilmelidir. Üçüncüsü, rezonanslı piezoelektrik transformatörlerin dar bantlı transformatörler olduğu ve yalnızca rezonans frekanslarında veya yakınında uygun şekilde çalıştırılabileceği

belirtilmelidir. Yukarıda belirtilen gerçekler, ölçüm sistemlerinde rezonans piezoelektrik transformatörlerin kullanımını sınırlar.

Bu sınırlamalar, geniş frekans bandı ve çok yüksek doğruluk gibi ölçüm uygulamaları için çok ilginç özellikler sergileyen rezonanssız piezoelektrik transformatörler ile aşılabilir. Rezonanssız piezoelektrik transformatörlerin çalışma prensibi, rezonanslı olanınkine oldukça benzer; Sürücü elektrotlarından bir miktar giriş gücü aldıktan sonra, tahrik edilen elektrotlarına bir miktar çıkış gücü sağlayarak elektrikten elektrik enerjisine dönüşüm gerçekleştirirler. Bu iki tip transformatörün özellikleri Tablo 2.8'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.8: Rezonanslı ve rezonanssız transformatörlerin özelliklerinin karşılaştırılması.

Transformatör tipi	**Genel Özellikler**	**Genel uygulamalar**	**Ölçüm uygulamalarında/enstrümanlarında kullanım imkanı**
Rezonans Piezoelektrik transformatörler	• Yüksek dönüşüm oranları • Mükemmel enerji verimliliği • Düşük doğruluk ve düşük doğrusallık • Dar frekans bandı	Yüksek voltaj beslemesi (örneğin TV setlerinde)	Rezonans transformatörlerinin kararsızlığı nedeniyle yüksek doğruluğun gerekli olduğu yerlerde kullanılamaz
Rezonanssız Piezoelektrik transformatörler	• Yüksek doğruluk ve doğrusallık • Geniş frekans bandı • Düşük dönüşüm oranları • Düşük enerji verimliliği	Aktüatörler ve sensör cihazları	Çok yüksek doğruluk sağladıkları için ölçüm uygulamaları için uygundur.

2.5. PIEZOELEKTRİK ENERJİ TOPLAMA SİSTEMİ ANA BİLEŞENLERİ

Mekanik ve elektriksel alanlar gibi çeşitli alanlar arasındaki etkileşim, piezoelektrik enerji hasadının karmaşıklığını göstermektedir. Bu karmaşıklık, toplanan enerjiyi işlemek için kullanılan devrelerin doğrusal olmamalarıyla vurgulanır. Aslında, bir piezoelektrik enerji toplama sistemi, etkileri tartışılacak olan çok farklı bileşenlerden oluşur.

2.5.1. Piezoelektrik Eleman

Mekanikten elektrik enerjisine dönüşüm işleminde doğrudan yer alan anahtar bileşendir. Piezoelektrik elemanlar, sırasıyla Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterildiği gibi doğrudan ve dolaylı veya ters etkiler olmak üzere iki konfigürasyonda kullanılır. Doğrudan etki konfigürasyonunda, piezoelektrik eleman, rüzgar, insan hareketi veya motor gibi bir kaynaktan kaynaklanan titreşimlerle beslenir [96]. Ters etki konfigürasyonunda tam tersi olur: Piezoelektrik eleman bir miktar elektrik enerjisi ile beslenir ve bir miktar titreşim üretir.

2.5.2. Konuk Eden Yapı

Tüm sistemin titreşim kaynağı (doğrudan etki) ve mekanik yapısıdır (ters etki). Bu titreşimler rastgele uyarılardan, darbelerden ve su veya rüzgar gibi dolaylı kaynaklardan üretilir [97, 98].

Konak yapılara örnek olarak ayakkabılar, insan vücudu, zemin, yollar, motorlar köprüler vb.

2.5.3. Elektronik

Elektronik, bir piezoelektrik enerji toplama sisteminde bulunan elektrik devresi setini temsil eder. Gerçekten de, toplanan gücü en üst düzeye çıkarmak için gelişmiş elektrik devresi gereklidir. Pasif devreler genellikle mikro ölçekli piezoelektrik toplama makinelerinde kullanılırken, yüksek çıkışlı toplama makinelerinde çalışması için bir miktar güç gerektiren aktif devreler kullanılır.

Aktif devrenin pasif devre üzerindeki ana avantajı, piezo malzemenin voltajını değiştirerek elektromekanik bağlantıyı yapay olarak arttırmasıdır. Bu devrelerin ortak özelliği, bir depolama elemanına (kapasitör) sahip olmalarıdır. Bu depolama elemanına ek olarak, sensör düğümünün voltajını koşullandırmak için daha fazla elektronik kullanılır. Bu araştırma çalışmasında, koşullandırma devresi, toplanan enerjinin dağıldığı elektrik yükü adı verilen bir dirençle temsil edilmektedir.

2.6. ELEKTRONİK DEVRELERİ VE TEMELLERİ

Enerji hasadı alanında elektronik önemli bir rol oynamaktadır. Gelişmiş elektronik devreleri kullanmanın avantajlarından biri, çıkış gücünü önemli ölçüde artırma olasılığıdır. Gerçekten de, elektronik sayesinde piezo voltajı manipüle edilebilir. Güç toplama kavramını tam olarak

anlamak için iyi bir elektronik bilgisi gereklidir. Akım, gerilim, lineer bileşenler, şarj gibi kavramların anlaşılması gerekir. Yarı iletken bileşenler ve bunların devredeki işlevleri hakkında iyi bir bilgi çok önemlidir.

Mekanik alandaki ana değişkenler, bir cisme uygulanan kuvvetlerin hızı ve toplamıdır. Elektrik alanında bunlar gerilim ve akımdır [99]. Akım, yük taşıyıcı olan akış elektronları olarak tanımlanabilir. Elektronlar negatif yüklüdür. Geleneksel olarak, pozitif taraftan negatif tarafa elektronlar. Bununla birlikte, elektronlar aslında negatif taraftan pozitif tarafa akar. Akımın integrali, biriken elektronların miktarı olarak kabul edilebilir ve Q yükü olarak bilinir.

$$Q = \int Idt \qquad 2.52$$

Q yükü Coulomb [C] cinsinden ifade edilir. Bu fiziksel miktar, piezoelektrikte malzeme içindeki yük yer değiştirmesini temsil eder.

Bünye denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma = C^E \varepsilon - e^T E_v \qquad (2.53)$$

$$D = e\varepsilon + \epsilon^{\varepsilon} E_v \qquad (2.54)$$

Burada, , σ stres vektörüdür,

ε gerinim vektörüdür,

C^E esneklik matrisidir,

D elektrik yer değiştirmesidir [C⁄m^2],

E_v voltaj alan vektörüdür [V⁄m],

ϵ^{ε} geçirgenlik matrisidir [F⁄m]

Elektrot alanı kullanılarak ve zamana göre türetilerek akımın ifadesi bulunabilir. Dolayısıyla, mevcut denge denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$I = \theta \dot{u} + C_P \dot{V} \qquad (2.55)$$

İki tür akım vardır: doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC).

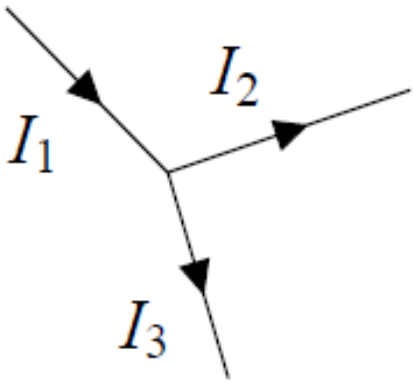
Doğru akım sadece tek bir akış yönüne sahiptir. Doğru akım, pille çalışan sistemlerde ve devrelerde çok yaygındır. DC akımla çalışan bir sistemi analiz etmek, statik bir mekanik problem ortaya çıkarır (statik bir çözüm).

Alternatif akım, her iki yönde de (negatiften pozitife ve tersi) akan bir akımdır. Bir genlik, frekans ve faz ile karakterizedir. Alternatif akım, elektrik prizlerinde ve çoğu ev aletinde bulunabilir. AC akımla çalışan bir sistemi analiz etmek, dinamik bir mekanik problemin çözümüne gelir (diferansiyel denklemlerin kullanılmasını gerektirir).

Piezoelektrik malzeme için, statik yer değiştirme uygulamasının sabit miktarda yükün yer değiştirmesine neden olduğu söylenebilir. Sürekli bir güç üretimi elde etmek için, yer değiştirmeyi düzenli olarak çevrime sokmak gerekir. Bu döngü kaçınılmaz olarak AC gücünün üretilmesine yol açacaktır. Bu güç genellikle işlenmelidir çünkü çok sayıda ölçüm sistemi ve elektronik devre DC akımıyla beslenir. Bu sonuca ulaşmak için bazı cihazlar kullanılabilir.

2.6.1. Temel Denklemler

Matematiksel olarak elektronik bileşenleri tanımlamak, piezoelektrik enerji hasadının analizi için hayati önem taşır. Elektronik devre dinamiği, Kirchhoff devre yasaları olarak da bilinen iki ana yasaya dayanmaktadır [100]. Koruma yasası olan Kirchhoff'un birinci yasası, bir devredeki bir düğümden geçen tüm akımların toplamının 0'a eşit olduğunu belirtir. Bu yasa Şekil 2.40'ta gösterilmektedir.

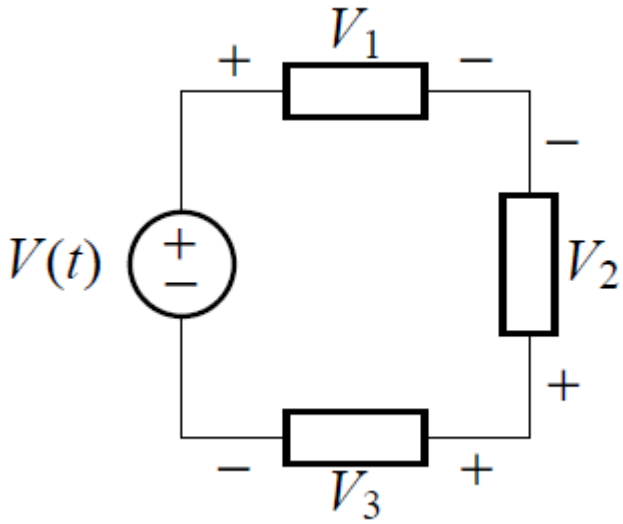


Şekil 2.39: Mevcut Kirchhoff yasası.

Konvansiyonda, düğüme doğru akan akımın pozitif olduğu kabul edilir. Merkezi düğümden akan akımın negatif olduğu kabul edilir. Şekil 2.40'taki örneğe düşük Kirchhoff akımı uygulanarak aşağıdaki ifade elde edilebilir:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \qquad (2.56)$$

Gerilim Kirchhoff yasası olarak bilinen Kirchhoff'un ikinci yasası, kapalı bir ağ etrafındaki tüm gerilimlerin toplamının 0'a eşit olduğunu belirtir. Bununla birlikte, Kirchhoff gerilim yasasını uygulamadan önce pozitif yönü belirtmek gerekmektedir.



Şekil 2.40: Gerilim Kirchhoff yasası.

Pozitif yön olarak saat yönünün seçilmesi durumunda Kirchhoff'un uygulanması aşağıdaki ifadeye yol açar:

$$V(t) - V_1 + V_2 - V_3 = 0 \qquad (2.57)$$

Mekanik ve elektrik alanı arasında çeşitli benzerlikler vardır. Bir yandan, elektrik alanında Ohm yasası çok önemli bir rol oynar. Bir direnç üzerinden I akımının (amper cinsinden) akışının ve bir V voltajının (volt cinsinden) varlığının aşağıdaki ilişkiye yol açtığını belirtir:

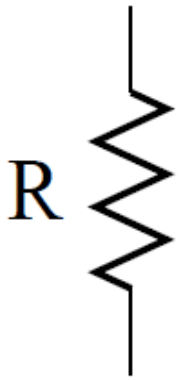
$$R = VI \qquad (2.58)$$

Burada, R dirençtir(ohm)

V, voltajdır(volt)

I, akım (amper)

Bir direncin sembolü Şekil 2.42'de gösterilmiştir.



Şekil 2.41: Bir direncin sembolü.

Öte yandan, mekanik alanda, bir damper üzerine bir kuvvetin uygulanması, bir miktar hız üretilmesine yol açar. Bu fenomen matematiksel olarak şu şekilde tercüme edilebilir:

$$F = cv \tag{2.59}$$

Burada, F, mekanik kuvvettir (N)

c, sönümlemedir (Ns/m)

v, hızdır (m/s)

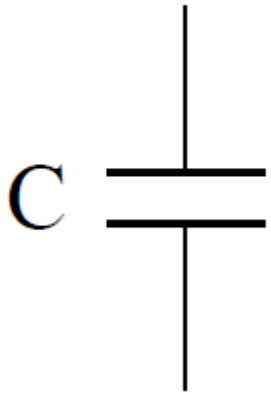
Direncin yanı sıra, elektronikte sıklıkla kullanılan iki bileşen daha vardır. Birincisi C kondansatörüdür. Kapasitans Farad (F) ile ifade edilir. Bir kapasitör genellikle iletken olmayan bir ortamla ayrılmış iki paralel plakadan oluşur. Bir direncin sembolü şekil 2.43'te gösterilmektedir. Bir kapasitörün rolü, üzerindeki voltaj arttıkça yük biriktirmektir. Mekanik alandaki eşdeğeri uyumluluktur. Bir kapasitör aşağıdaki denklem tarafından yönetilir:

$$V = \int Idt/C \tag{2.60}$$

Burada, V, volt cinsinden voltajdır,

C, Farad'daki endüktanstır,

I, amper cinsinden akımdır.



Şekil 2.42: Bir kondansatörün sembolü.

İkincisi L indüktörüdür. Endüktans Henries (H) ile ifade edilir. Bir indüktör genellikle bir tel bobinden yapılır. Bir indüktörün sembolü Şekil 2.44'te gösterilmektedir. Doğrusal bir indüktör aşağıdaki denklem tarafından yönetilir:

$$V = L\dot{I} \tag{2.61}$$

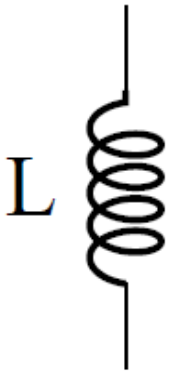
Burada ,V, volt cinsinden voltaj,

L, Henries'deki endüktanstır,

I, amper cinsinden akımdır.

Mekanikteki endüktansın eşdeğeri kütledir. Newton'un ikinci yasasını gözlemledikten sonra benzerlik açıktır:

$$F = m\dot{v} \tag{2.62}$$



Şekil 2.43: Bir indüktörün sembolü**.**

Yukarıda bahsedilen bileşenlerin matematiksel ifadesi, mekanik elektriksel alanlar arasında var olan benzerlikleri göstermiştir. Bu denklikler sırasıyla kuvvet-gerilim ve kuvvet akımı analoji tabloları olan Tablo 2.9 ve Tablo 2.10'da gösterilmiştir.

Tablo 2.9: Kuvvet-gerilim analoji tablosu.

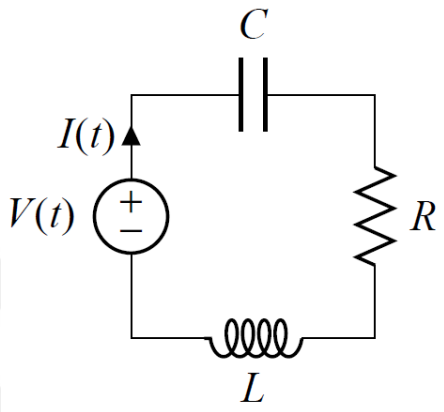
Elektrik büyüklük	**Mekanik eşdeğer**
Voltaj V	Kuvvet F
Akım I	Hız $\dot{u}$
kapasitans C	Uyumluluk $1/k$
Endüktans L	Kütle M
Direnç R	Viskoz sönümleme c

Tablo 2.10: Kuvvet-akım analoji tablosu.

Elektrik büyüklük	**Mekanik eşdeğer**
Akım I	Kuvvet F
Voltaj V	Hız $\dot{u}$
kapasitans C	Kütle M
Direncin karşılıklı 1/R	Sürtünme katsayısı B

Endüktansın karşılıklı 1/L	Yay sabiti K
Manyetik Akı Ψ	Yer değiştirme u

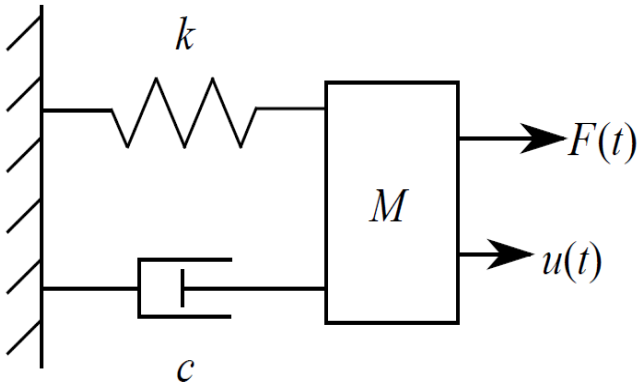
Mekanik ve elektriksel alanlar arasındaki benzerlikler, bir kütle yay-amortisör sistemi ile bir RLC devresi arasındaki karşılaştırma sırasında daha da çarpıcıdır. Bir RLC devresi, Şekil 2.45'te gösterildiği gibi bir direnç, bir endüktör, bir kapasitör ve bir gerilim kaynağından oluşur.



Şekil 2.44: RLC devresi.

Kirchhoff'un voltaj yasasının RLC devresine uygulanması, aşağıdaki denklemin yazılmasına izin verir:

$$V = L\dot{I} + RI + \frac{1}{C}\int I\,dt \tag{2.63}$$



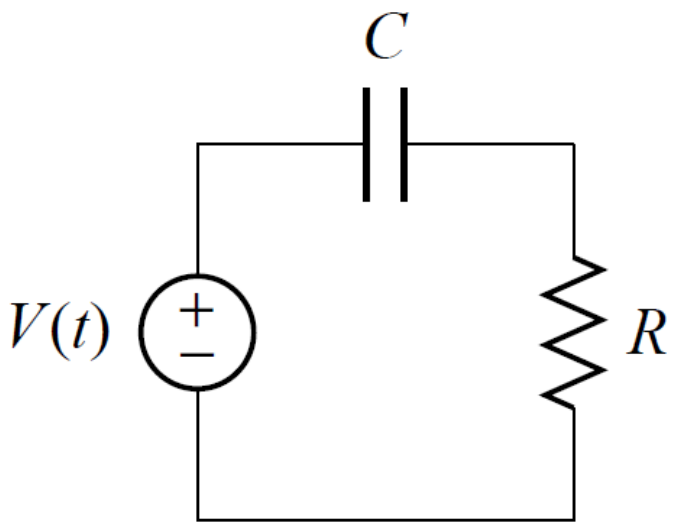
Şekil 2.45: 1DOF kütleli yay damper sistemi.

Newton'un ikinci yasasının kütle-yay-sönümleyici sistemine uygulanması, aşağıdaki denklemin yazılmasına izin verir:

$$F = M\ddot{u} + c\dot{u} + ku \tag{2.64}$$

Denklem 2.63 ve denklem 2.64'ün oldukça benzer olduğu oldukça açıktır. Aslında ikisi de ikinci mertebeden diferansiyel denklemlerdir ve harmonik bir çözüm varsayılarak analitik olarak çözülebilirler. Mekanik alandaki doğal frekans $\omega_m = \sqrt{k/M}$) 'dir. Elektrik alanında, doğal frekans $\omega_{el} = 1/\sqrt{LC}$ 'dir.

Sık kullanılan bir diğer devre türü ise Şekil 2.47'de gösterildiği gibi seri bağlı bir direnç, kapasitör ve gerilim kaynağından oluşan RC devresidir.



Şekil 2.46: RC devresi.

Bu devrenin analizi ile yazılabilecek diferansiyel denklem:

$$C\dot{V}_c + \frac{V_c}{R} \tag{2.65}$$

Devrenin $t = 0$'da V_0 genlikli bir adım gerilimi tarafından uyarılması durumunda, denklem 2.65 bir üstel fonksiyon kullanılarak çözülebilir. 0'dan V_0 'a şarj adımı ($V(t)$ sırasında) aşağıdaki asimptotik yanıt işlevi kullanılabilmektedir:

$$V_c(t) = V_0(1 - e^{-t/RC}) \tag{2.66}$$

Boşaltma adımı (($V(t)$ V_0'dan 0'a), aşağıdaki asimptotik yanıt işlevi kullanılabilir:

$$V_c(t) = V_0.e^{-t/RC} \quad (2.67)$$

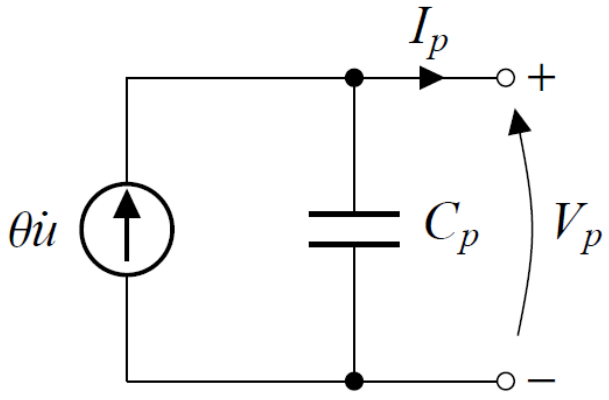
RC miktarı, kapasitörün bir voltaj değişimine karşı reaktivitesinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Örneğin, sistem bir adım voltajı kullanılarak uyarıldığında, t = RC'de voltaj, şarj adımı sırasında uygulanan voltajın %63'üne ulaşmıştır veya boşaltma adımı sırasında %63 oranında azalmıştır. Bu zaman, bir RC devresinin RC zamanı olarak etiketlenir.

Bir piezo elemanın elektriksel modelini, mevcut denge denklemi olan ($I = \theta\dot{u} + C_P\dot{V}$) 2.55 denklemini kullanarak ifade etmek mümkündür. Piezoelektrik malzemeyi akımı θu 'ye eşit olan bir jeneratör olarak ele alalım. Bu piezo üretecine paralel olarak bir kondansatör bağlanmıştır. Elde edilen devre Şekil: 2.48'de gösterilmiştir.

$I_P(t)$ piezoelektrik eleman tarafından iletilen akımdır, $V_P(t)$ ise devrenin iki elektrotu arasındaki potansiyel farkı temsil eder. Mevcut I_P fonksiyonunun, piezoelektrik elemanın elektrotlarına bağlanan şeyin doğasına bağlı olduğuna dikkat edilmelidir. Bir direnç R'nin elektrotlara bağlanması aşağıdakilere yol açacaktır:

$$I_P = V_P/R \quad (2.68)$$

Piezoelektrik elemana daha karmaşık devreler veya diğer bileşenler bağlanabilir ve bu da mevcut I_P'nin daha karmaşık hale gelmesine neden olur.



Şekil 2.47: Bir piezoelektrik elemanın elektriksel gösterimi.

2.6.2. Yarı İletken Bileşenler

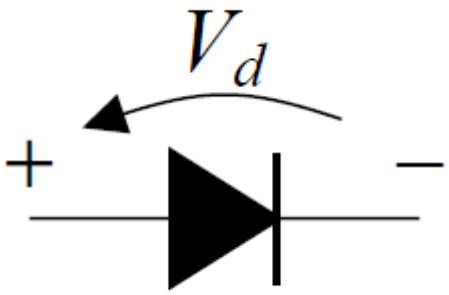
Güç toplama elektroniği, çok sayıda yarı iletken bileşen gerektirir. Onların özelliği, yukarıda bahsedilen bileşenlerin aksine doğrusal davranmamalarıdır. Bu nedenle, analizleri çok çaba ve dikkat gerektirir. Belirli cihazlarda kullanım için akımları kontrol etmeye ve alternatif akımdan doğru akıma gücü düzeltmeye izin veren elektronik olarak kontrol edilen anahtarlara benzerler.

2.6.2.1. Doğrultucular ve Diyotlar

Diyotlar, akımın sadece tek bir yönde geçmesine izin veren bileşenler olarak tanımlanabilir. Diyotların çalışma prensibi çok basittir. Uygulanan gerilim diyotun “geçiş” yönü ile aynı yönde olduğunda neredeyse engelsiz (empedans/direnç yok) akım geçişine neden olur. Bununla birlikte, çok küçük bir V_d voltaj düşüşü vardır. Akım, yalnızca voltaj "geçiş"e yönlendirildiğinde ve küçük voltaj düşüşü V_d'nin ötesine geçtiğinde diyot üzerinden iletilecektir. Gerilim düşüşü diyotun tipine ve imalat malzemesine göre değişir. Örneğin, bir silikon diyotun voltaj düşüşü 0.6V iken, bir germanyum diyotun voltaj düşüşü 0.2-0.3V arasında değişir. Shottky tipi diyotların voltaj düşüşü 0.2V'dir.

Voltajın "geçiş" yönüne zıt bir yönde uygulanması durumunda, diyot herhangi bir akımın geçişini engeller. Bu konfigürasyondaki mükemmel eşdeğeri, sonsuz dirence sahip bir direnç olacaktır. Altında diyotun arızalandığı bir negatif voltaj eşiği vardır. Bir diyotun şematik sembolü Şekil 2.49 [101]'de gösterilmektedir. Sembolde gösterildiği gibi, akım sadece pozitiften negatife doğru gösterilen yönde iletilir.

Voltajın "geçiş" yönünün tersi yönde uygulanması durumunda, diyot herhangi bir akımın geçişini engeller. Bu konfigürasyondaki mükemmel eşdeğeri, sonsuz dirence sahip bir direnç olacaktır. Altında diyotun arızalandığı bir negatif voltaj eşiği vardır. Bir diyotun şematik sembolü Şekil 2.49 [101]'de gösterilmektedir. Sembolde gösterildiği gibi, akım sadece pozitiften negatife doğru gösterilen yönde iletilir.



Şekil 2.48: Bir diyotun şematik sembolü [101].

Şekil 2.50, Shockley diyot denklemini kullanan karakteristik akım-voltaj (IV) eğrisini göstermektedir.

$$I = I_S(e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1) \quad (2.69)$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (2.70)$$

Burada, I,diyottan geçen akımdır,

I_S ters önyargı ölçeği veya doyma akımıdır,

V_d voltaj düşüşüdür (diyottaki voltaj),

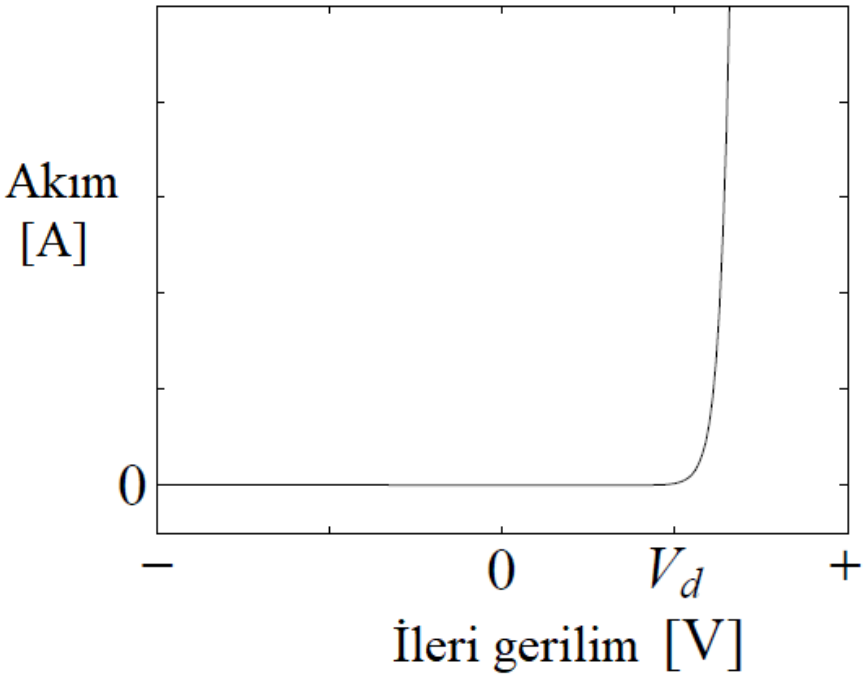
n kalite faktörü veya idealite faktörüdür

V_T termal voltajdır

K, Boltzmann sabitidir

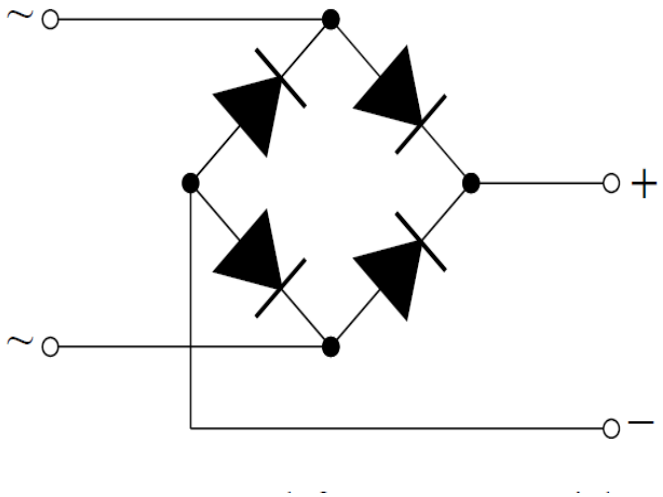
T sıcaklıktır

q elektron yüküdür.



Şekil 2.49: Bir diyotun karakteristik akım gerilimi (IV) eğrisi.

Alternatif akımın doğru akıma dönüştürülmesi diyotların kombinasyonu ile yapılabilir. Böyle bir diyot grubuna tam köprü doğrultucu denir. Tam köprü doğrultucunun tipik bir örneği Şekil 2.51'de gösterilmektedir. Bu şekilde, DC kontakları sağ tarafta bulunurken, AC kontakları şemanın sol tarafında bulunabilmektedir.



Şekil 2.50: Tam köprü doğrultucunun şematik gösterimi.

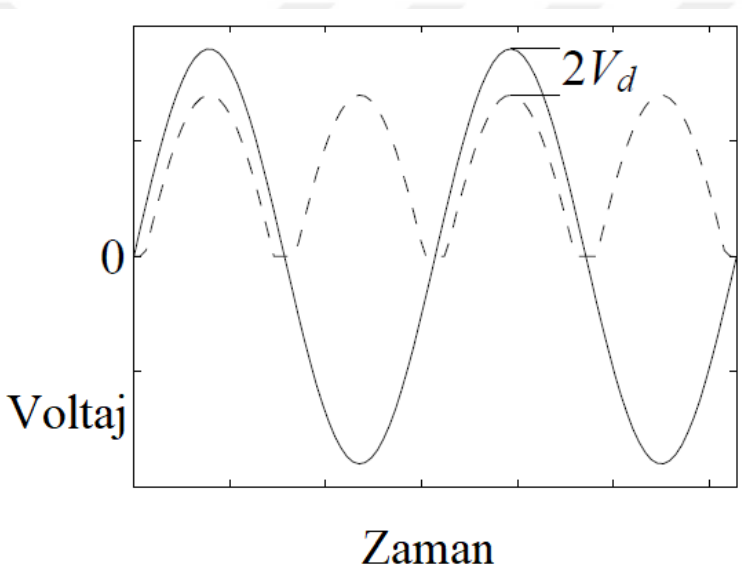
Tam köprü doğrultucunun tipik voltaj eğrisi Şekil 2.52'de gösterilmektedir. AC voltaj eğrisi tam satırda temsil edilir ve doğrultulmuş DC voltajınınki noktalı satırlarda gösterilir. Bu montajda iki seviyede bir miktar voltaj düşüşü olduğuna dikkat edilmelidir. Bu matematiksel olarak şu şekilde çevrilebilir:

$$V_{DC} = |V_{AC}| - 2V_d \quad (2.71)$$

Burada, V_{DC} doğru akım voltajıdır,

V_{AC}, alternatif akım voltajıdır,

V_d, diyot üzerindeki voltaj düşüşüdür.



Şekil 2.51: Tam köprü doğrultucunun tipik voltaj eğrisi.

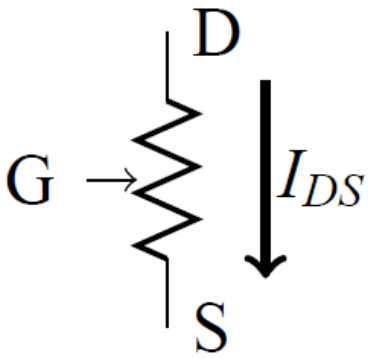
2.6.2.2. Alan Etkili Transistör

Alan etkili transistör (FET), anahtarlama özelliklerini kontrol etmek için voltajı kullanan anahtardır. Bir FET'in çalışma prensibi, iletken bir kanalın oluşturulmasıyla açıklanmaktadır. FET'de bir voltaj alanı olduğunda, iletken bir kanal açılır ve voltaj alanı ne kadar büyükse, iletken kanal o kadar büyük olur. Başka bir deyişle, iletken kanal, direnci voltaj alanı tarafından belirlenen değişken bir direnç gibidir. Bir alan transistörünün değişken direnç modelinin şematik sembolü Şekil 2.53'te gösterilmektedir. Bir FET genellikle dört (04) bağlantı

noktasından oluşur. Aslında, bu bağlantı noktalarından ikisi (02) kalıcı olarak bağlanır ve bu da üç (03) bağlantı noktasıyla sonuçlanır.

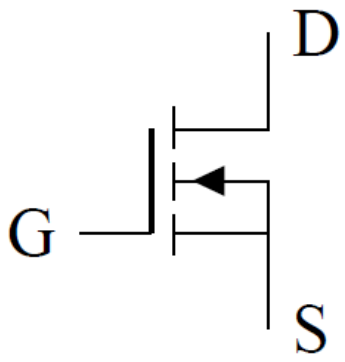
Alan etkili transistörlerin birkaç türü vardır. Her türün kendi çalışma prensibi, polarite geliştirme ve tükenme modu vardır. En çok kullanılan ve en iyi bilinen n-kanallı metal oksit yarı iletken alan etkili transistördür (MOSFET). Bu tip transistörde pozitif kapı kaynak gerilimi V_{GS}, drenaj ile kaynak arasındaki kanalı açar ve kapı kaynak gerilimi V_{GS} sıfıra (0) eşit olursa kanal tamamen bloke olur.

Kaynak (S), kapı (G), gövde (B) ve drenaj Şekil 2.52 ve Şekil 2.53'te gösterilmiştir. Gövde açıkça belirtilmemiştir, ancak okun gösterdiği merkezdir. Ayrıca kaynağa (S) bağlıdır. Metal oksit yarı iletken alan etkili transistörde (MOSFET) dört (04) ana bölge vardır: “kapalı” bölge, eşik altı bölge, doğrusal bölge ve doyma bölgesi.



Şekil 2.52: Bir alan etkili transistörün değişken direnç gösterimi.

"Kapalı", geçit kaynağı voltajının yeterli olmadığı ve drenajdan kaynağa kanal olmamasına neden olan bölgedir. Eşik altı bölge, V_{GS}'nin (geçit kaynağı voltajı) yalnızca bir akım sızıntısına izin verdiği, ancak akımın tam geçişine izin vermek için yetersiz olduğu bölgedir. Doğrusal bölge, akımın, geçit kaynağının ve tahliye kaynağı voltajının doğrusal olarak orantılı olduğu bölgedir. Doygunluk bölgesi, maksimum drenaj kaynağı akımına ulaşıldığı yerdir; bu, drenaj kaynağı voltajının arttırılmasının drenaj kaynağı akımını artırmayacağı anlamına gelir. Bu bölgelerden lineer bölgenin, aktif devre ile birleştirme amaçları için en ilginç olanı olduğuna dikkat edilmelidir.



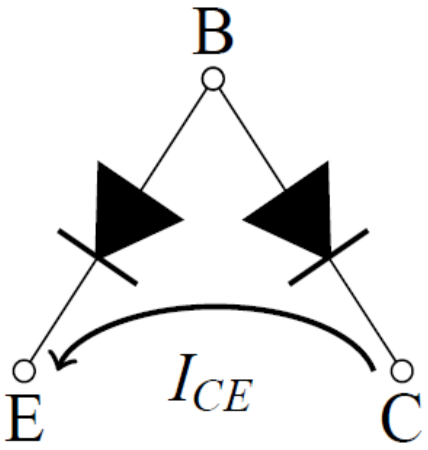
Şekil 2.53: Metal oksit yarı iletken alan etkili transistörün (MOSFET) sembolü.

2.6.2.3. Bipolar Kavşak Transistörü

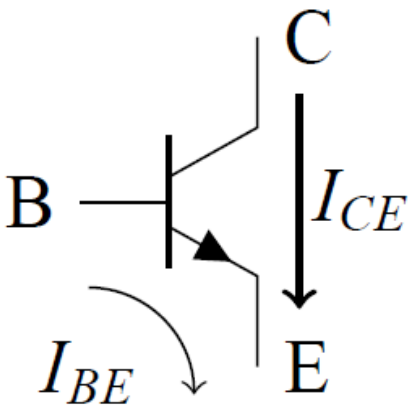
Bipolar bağlantı transistörleri, sinyalleri değiştirmek ve gücü yükseltmek için kullanılır. Daha büyük bir akımın geçmesine izin vermek için az miktarda kontrol akımı kullanabilirler. Bu akımların oranı, ortak yayıcı akım kazancı olarak etiketlenir. h_{FE} ile gösterilir. Bipolar bağlantı transistörü esas olarak 3 porttan oluşur. Bu portlar, Şekil 2.55'ten Şekil 2.57'ye kadar gösterildiği gibi emitör (E), toplayıcı (C) ve tabandır (B).

İki ana transistör türü vardır: NPN tipi ve PNP tipi. Bu iki tip bipolar bağlantı transistörü arasındaki fark, akımın yönüdür.

NPN konfigürasyonunda, daha büyük bir akımın kollektörden emitöre geçmesine izin vermek için tabandan emitöre küçük bir akım geçirilir. Akım gereksinimine ek olarak, diyotlara benzer şekilde, küçük bir voltaj düşüşü vardır. Bu voltaj düşüşü, V_{BE} temel emitör voltaj düşüşü ve V_{BC} temel toplayıcı voltaj düşüşü olan iki (02) bileşenden oluşur. V_{BC} çok önemli değildir çünkü genellikle B ve C arasında akım yoktur. Ana akım C ve E arasında aktığı için V_{BE} en alakalı olanıdır.



Şekil 2.54: NPN BJT diyot modeli.



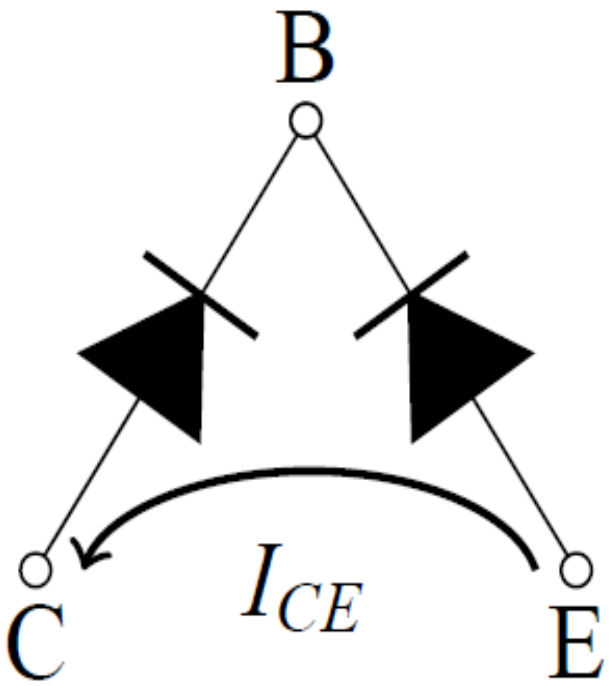
Şekil 2.55: NPN BJT şematik sembolü.

NPN iki kutuplu bağlantı transistörlerinin çalışmasında çok sayıda çalışma bölgesi vardır. Bu bölgeler cut-off, doygunluk, aktif ve ters aktif bölgelerdir.

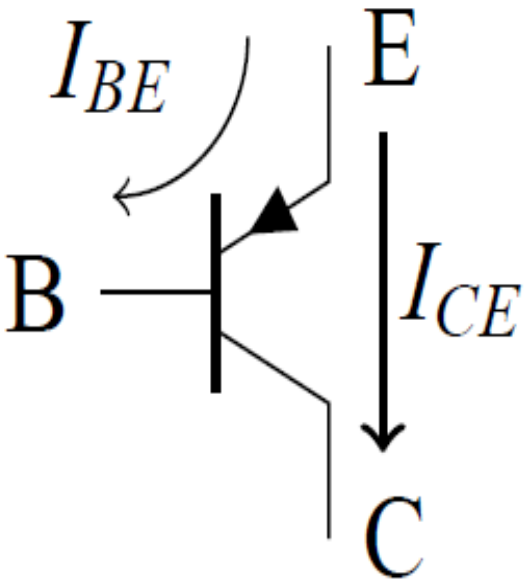
Kesme bölgesi, herhangi bir akımın geçişini engellediği bölgedir. I_{BE} bu bölgede o kadar düşüktür ki kollektörden emitere herhangi bir akım geçişine izin vermez. Etkin bölge, $I_{CE} \approx h_{FE}I_{BE}$'nin bulunduğu bölgedir. Doyma bölgesi, $V_{BE} > V_{CE}$ ve $h_{FE}I_{BE}$ 'ye kadar herhangi bir akımın kollektörden emitöre akabileceği bölgedir. Enerji hasadı için ilgi alanıdır. Kollektör emitörü yalnızca çok az bir eşdeğer dirence sahiptir. Bu bölgede, iki kutuplu bağlantı transistörü, akımın h_{FE} ve diğer bileşenlerin akım oranı ile sınırlandığı bir kısa devre gibi davranır. Bu bölgede akımların oranının diğer bileşenler tarafından belirlendiğine dikkat

edilmelidir. Ters aktif bölge, akımın tabandan kollektöre gittiği bölgedir. Bu konfigürasyon elektronik uygulamalarda nadiren kullanılır.

PNP BJT, NPN'ye benzer şekilde çalıştırılır. Tek fark akımların yönüdür. Daha büyük bir emitör-toplayıcı akımının geçişine izin vermek için küçük bir emitör tabanına ihtiyaç vardır. Akımların gösterimi, NPN transistörününkiyle aynıdır, ancak hepsinin her zaman negatif bir değeri vardır. PNP transistörünün, çoğunun engellenmeden geçmesine izin vermek için ana akımın küçük bir miktarını tükettiğine dikkat edilmelidir. PNP BJT ayrıca NPN ile aynı çalışma bölgelerine sahiptir (aktif, kesme, doygunluk ve ters aktif). NPN'ye gelince, piezoelektrik güç hasadı için ilgimizi çeken doygunluk bölgesi$V_{BE} < V_{CE}$ise, akımların oranı $I_{CE} < h_{FE} I_{BE}$'dir. PNP BJT'nin diyot modeli ve şematik sembolü sırasıyla Şekil 2.55 ve Şekil 2.56'da gösterilmektedir.



Şekil 2.56: PNP BJT'nin diyot modeli.

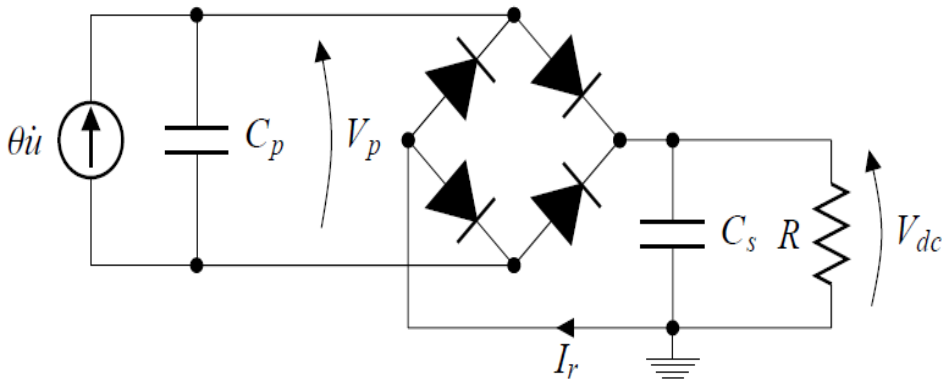


Şekil 2.57: PNP BJT'nin şematik sembolü.

2.6.3. Doğru Akım Empedans Eşleşmesi (DCIM)

2.6.3.1. Devrenin şematik gösterimi

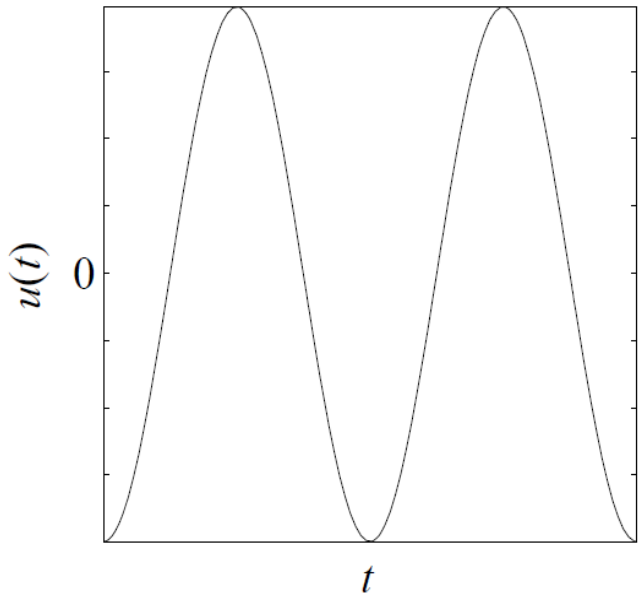
Bir doğru akım empedans eşleştirme (DCIM) devresi genellikle Şekil 2.59'da gösterildiği gibi bir doğrultucu, depolama kapasitörü C_S ve yük direnci R'den oluşur.



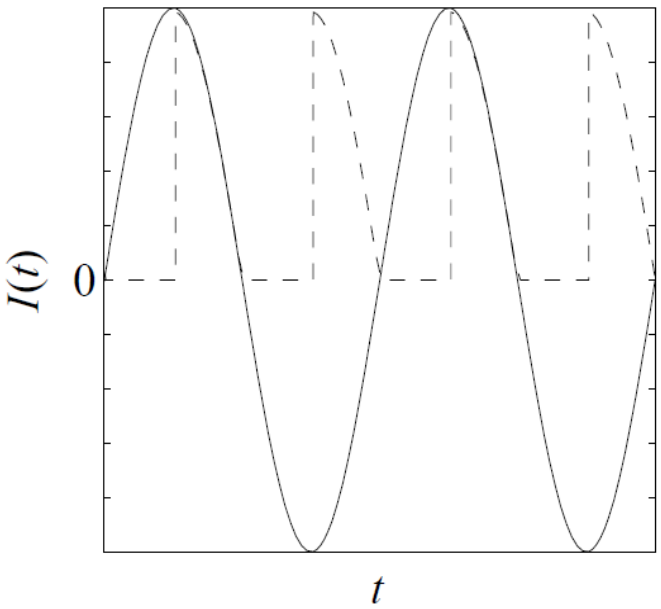
Şekil 2.58: DCIM devre şematik gösterimi.

Piezoelektrik eleman tarafından üretilen AC akımı doğrultulur. Daha sonra üretilen enerji C_S kondansatöründe depolanır.

Yarı sabit bir DC voltajı tutmak için depolama kapasitörü C_S'nin yeterince büyük olması gerekir. Bu nedenle, depolama devresinin RC süresi, piezoelektrik elemanın çevrim süresinden daha yüksek olmalıdır. Optimal dirençteki devrenin gerilim, akım ve yer değiştirme eğrileri Şekil 2.60'dan Şekil 2.62'ye kadar gösterilmiştir.

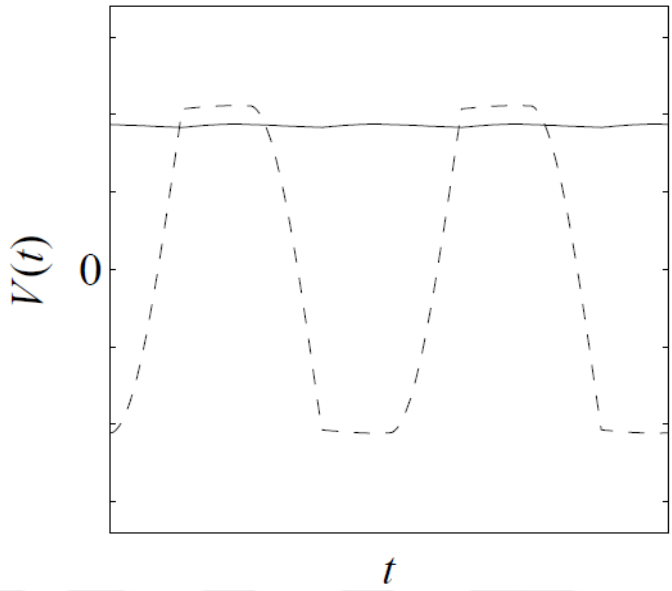


Şekil 2.59: Optimum dirençte yer değiştirme girişinin dalga biçimi.



Şekil 2.60: Optimum dirençteki akımın dalga biçimi - $\boldsymbol{\theta\dot{u}}$ tam çizgide, $\boldsymbol{I_r}$ ise noktalı çizgide temsil edilir.

Piezoelektrik elemandan sinüzoidal yer değiştirme uygulandığı için sinüzoidal bir akım elde edilir, sadece 90 derecelik bir faz farkı vardır.



Şekil 2.61: Optimum dirençteki voltajın dalga biçimi - $\boldsymbol{V_{dc}}$tam satırda, $\boldsymbol{V_p}$ ise noktalı satırlarda temsil edilir.

Operasyonun iki ana aşaması mevcuttur. Birinci faz, piezoelektrik elemanın AC voltajının $\pm V_0$ arasında salınım yaptığı durumları temsil eder. Doğrultucu akımının sıfır olduğu Şekil 2.61'de de görülebilir.

İkinci faza iletken faz denir. Bu, doğrultucunun eşik voltajına ulaşıldığında devrenin sabit voltaja yakın bir şekilde ilettiği zamandır. Eşik voltajının, doğrultucu diyot düşüşleri ve DC voltajı gibi parametrelere göre değiştiğine dikkat edilmelidir. Örneğin, Şekil 2.61'de, doğrultucu akımı 0'dan farklı olduğunda iletken faz açıktır. Şekil 2.62'de dikkat edilmelidir ki, C_s kondansatörünün yüksek değerinden dolayı DC gerilimi hemen hemen sabit kalmaktadır.

2.6.3.2. DCIM Devresindeki Geçerli Denklemler

Süreksiz iletimi nedeniyle bir doğrultucunun ana denklemini analitik olarak çözmek mümkün değildir. Bu, kesin bir analitik çözümün bulunamayacağı anlamına gelir. Shu ve Lien araştırma çalışmalarında [83, 102] DCIM devresini ayrıntılı olarak analiz ettiler. Sinüzoidal bir hareketle uğraştığımızı varsayarak, yarım çevrim yaklaşımıyla yaklaşık bir analitik çözüm bulmak mümkündür. Bu, enerji dengesi ve akım korunumu kavramları kullanılarak yapılabilir. Boyutsuz parametreler geri çağrılabilir:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_s}{M}}, \xi = \frac{C_s}{2M\omega_n}, \Omega = \frac{\omega}{\omega_n}, r = C_p\omega_n R \quad (2.41)$$

Diyot voltaj düşüşünü ihmal edilebilir olarak kabul ederek ve aşağıda tekrarlanan denklem 2.41'deki aynı boyutsuz parametreleri kullanarak ve yer değiştirme, voltaj ve toplama gücü denklemleri:

$$u'_0 = \frac{u_0}{F_0/k_s} = \frac{1}{\left[(1-\Omega^2+\frac{k_e^2 r\Omega}{r\Omega+\pi/2})^2+\Omega^2(2\zeta+\frac{2k_e^2 r}{(r\Omega+\pi/2)^2})\right]^{1/2}} \quad (2.72)$$

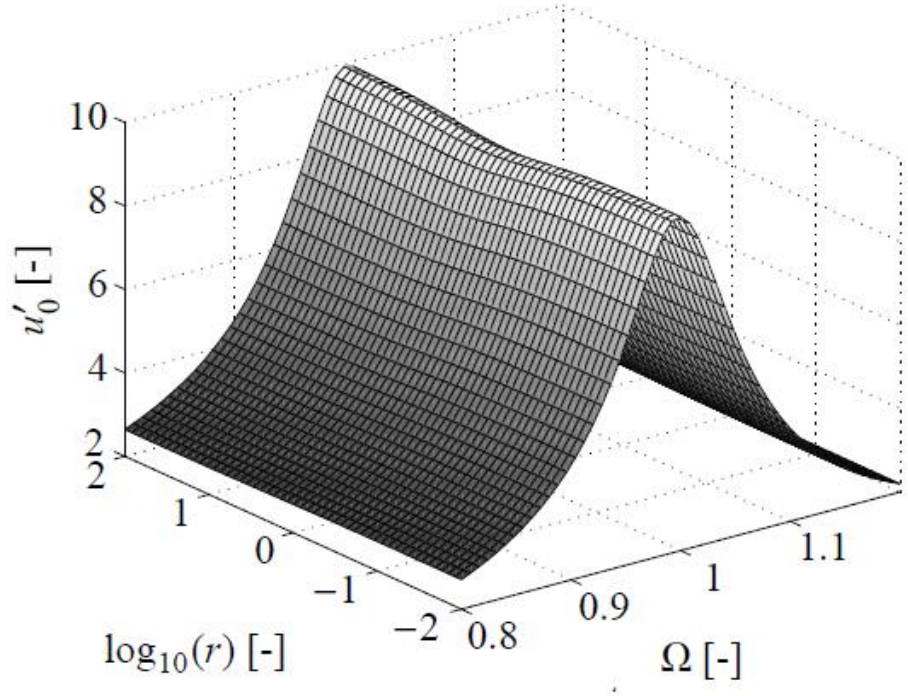
$$V'_0 = \frac{V_0}{F_0/\theta} = \frac{r\Omega}{r\Omega+\pi/2} k_e^2 u'_0 \quad (2.73)$$

$$P'_{avg} = \frac{P_{avg} M\omega_{SC}}{F_0^2} = \frac{1}{k_e^2}\frac{V\prime_0^2 r\Omega}{r} = \frac{k_e^2\Omega^2 r}{(r\Omega+\pi/2)^2} u'^2_0 \quad (2.74)$$

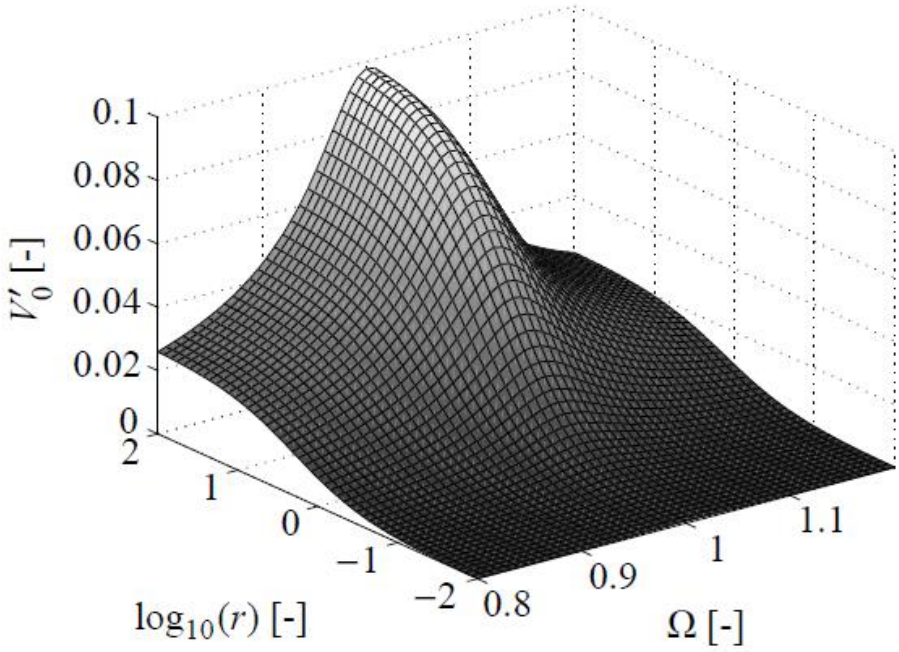
Analiz sadece t = 0 s ve t = T/2 s'de yapılır, burada T uyarma periyodudur. Genel olarak, tam voltaj ve yer değiştirme sinyalleri, düşük kuplajlı sistemler için güç çıkışını etkilemez. Aslında, sinüsoidalden küçük sapmaların çıktıyı önemli ölçüde etkilemediğine dikkat edilmelidir. Denklem 2.41'deki boyutsuz parametreleri kullandıktan sonra, bu çözümlerin (ACIM), denklem 44'ten denklem 46'ya kadar olanlardan matematiksel olarak çok farklı olmadığı anlaşılır. İki bölümde yalnızca birkaç değer farklıdır. Örneğin, u'_0 piezoelektrik rijitlik teriminin paydasında 1, π/2 ile değiştirilir. Piezoelektrik sönümleme teriminin paydasında da bir fark vardır.

2.6.3.3. Düşük Bir Kuplajın DCIM Devresine Etkisi

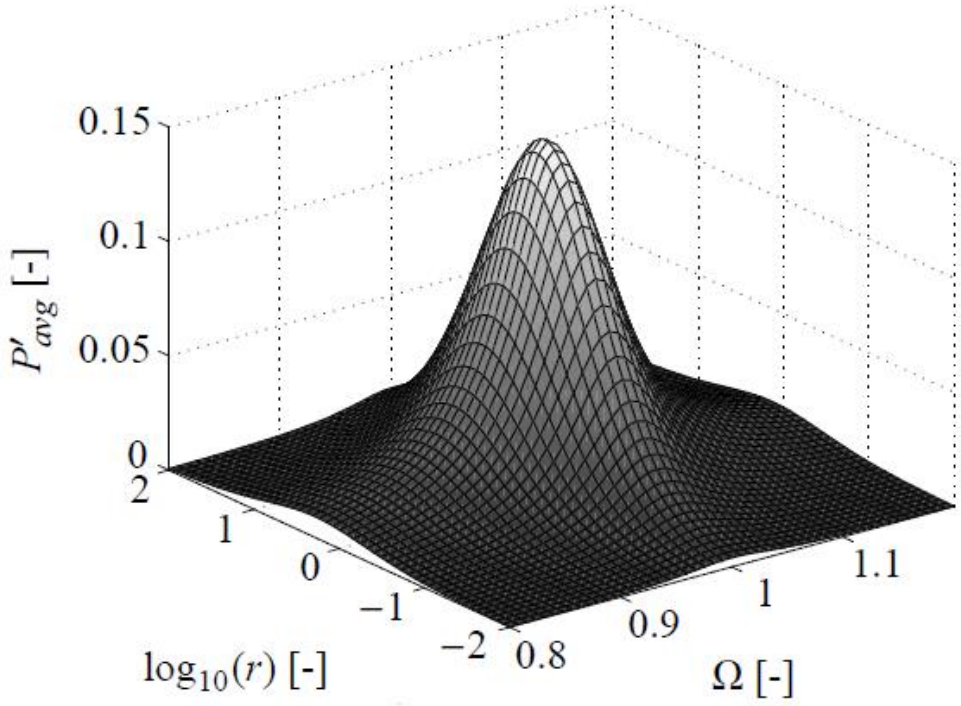
Ana denklemlerin analizi, Şekil 2.63, Şekil 2.64 ve Şekil 2.65'te gösterildiği gibi normalleştirilmiş yer değiştirme, gerilim ve güç grafiklerinin gösterilmesine izin verir. ACIM devresine gelince, düşük bağlantıda, piezoelektrik malzeme ve elektrik alanı mekanik alan üzerinde fazla etkiye sahip değildir. Kapalı ve açık devre koşullarında hiçbir güç toplamasına ile açıklanabilir. Bu nedenle sonuçlar aynıdır. ACIM ile eşleşen alternatif akım empedansı ile diğer benzerliklerden biri, optimal bir yükün varlığıdır. Bununla birlikte, normalleştirilmiş direnç r'nin değeri farklıdır.



Şekil 2.62: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.01}$ ve boyutsuz sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$- DCIM devresi için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği.



Şekil 2.63: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.01}$ için voltajın ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresinin normalleştirilmiş tepki grafiği.



Şekil 2.64: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.01}$ve boyutsuz sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için gücün normalleştirilmiş tepki grafiği.

Düşük bağlantı koşullarında optimum elektrik yükleri:

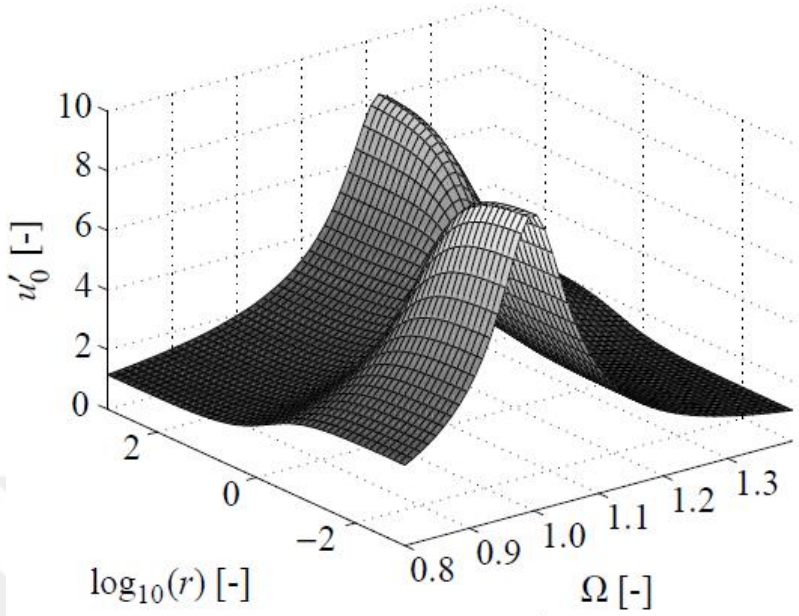
$$R_{opt} = \frac{\pi}{2C_p\omega} \text{ (boyutsal optimum elektrik yükü)} \quad (2.75)$$

$$r_{opt} = \frac{\pi}{2\Omega} \text{ (boyutsuz optimal elektrik yükü)} \quad (2.76)$$

DCIM ve ACIM arasındaki normalleştirilmiş direncin bu farkı, optimal dirence ve doğal frekansa (Ω = 1) yakın olan faydalı güç toplama bölgesinde bulunabilir. Yer değiştirme tepkisinde belirgin bir fark yoktur. Voltaj yanıtı oldukça benzerdir ancak ACIM devrelerininkinden biraz daha düşüktür. Bu, güçte de küçük bir azalmaya neden olur. Aynı uyarmada, DCIM ve ACIM devrelerinin maksimum normalleştirilmiş gücü arasındaki fark, optimum direnç yükünün de farklı olduğu anlamına gelir.

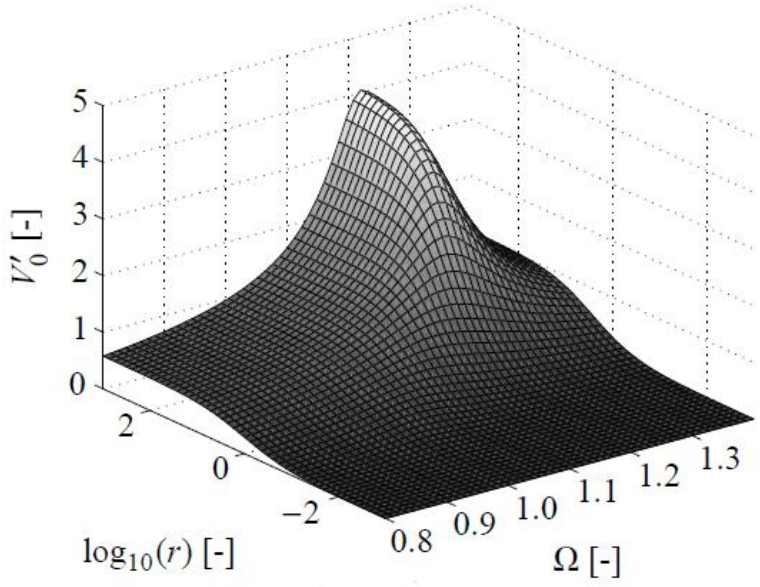
2.6.3.4. DCIM Devresine Yüksek Bir Kuplajın Etkisi

Normalleştirilmiş yer değiştirme, voltaj ve güç Şekil 2.66, Şekil 2.67 ve Şekil 2.68'de gösterilmektedir.

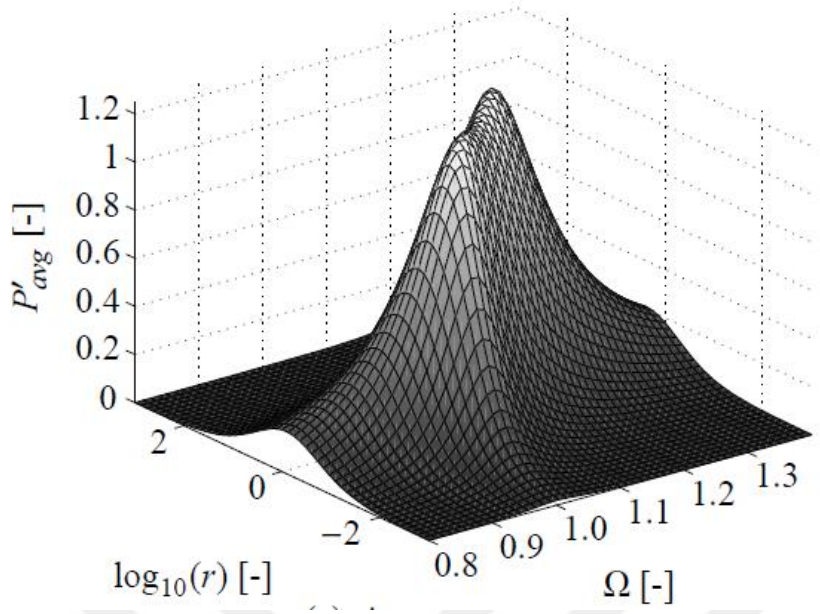


Şekil 2.65: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği.

Yer değiştirme grafiğinde, doğal frekansta bir değişiklik vardır. Gerçekten de, Ω frekansındaki tepe, normalleştirilmiş direnç arttıkça 1'den $\sqrt{1 + k_e^2}$ 'ye kayar.



Şekil 2.66: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için voltajın normalleştirilmiş tepki grafiği.



Şekil 2.67: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için ortalama gücün normalleştirilmiş tepki grafiği.

Miktarların geri kalanı için ACIM durumuyla benzerlikler var. Güç, eşit büyüklükte iki optimal noktaya sahipken, voltaj eğrisi açık devre rezonansı için yüksek bir değer gösterir. Optimum gücün yine ACIM kasasından daha düşük olduğuna dikkat edilmelidir. Yüksek bağlantı koşullarında direnç daha karmaşık hale gelir. Birkaç vaka var. Optimal yüklerin sayısının yanı sıra büyüklüklerinin de sönümleme ve kuplaja göre değiştiğine dikkat etmek önemlidir. Bir sistemin kuplajının yüksek mi yoksa düşük mü olduğunu temel kural [102] ile belirlemek de mümkündür.

2.6.3.5. Maksimum Toplanmış Güç

Piezoelektrik enerji hasadının bir başka gereksinimi, harmonik bir uyarımdan toplanabilecek maksimum güç miktarı hakkında biraz bilgi sahibi olmaktır. Optimal dirençte olduğu gibi, çok sayıda durum vardır.

Bir yandan, devrenin kuplajı düşükse, toplanan maksimum güç, normalleştirilmiş uyarma frekansının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir:

$$P'_{opt} = \frac{k_e^2 \Omega u_0'^2}{2\pi} = \frac{k_e^2 \Omega}{2\pi(2\zeta\Omega + k_e^2/\pi)^2} \tag{2.77}$$

Bu, düşük k_e^2/ζ oranı için kuplajdaki herhangi bir büyümenin güç artışına neden olacağı anlamına gelir. Bu, kuplaj çok düşük olduğunda, hareket denklemlerinin sıralı çözümünün kullanılabilmesiyle açıklanabilir. Bununla birlikte, bağlantıda nispeten küçük bir artış, döngü başına daha fazla enerjinin toplanmasına izin verecek olsa da, mekanik alan parametreleri etkilenmeyecektir. küresel mekanik davranışlar.

Öte yandan, devrenin kuplajı yüksekse, optimum direnç yükünde ve uyarma frekansında maksimum güç şu şekilde ifade edilebilir:

$$P'_{max} = \frac{1}{8+2\sqrt{16+\pi^2}}\frac{1}{\zeta} \tag{2.78}$$

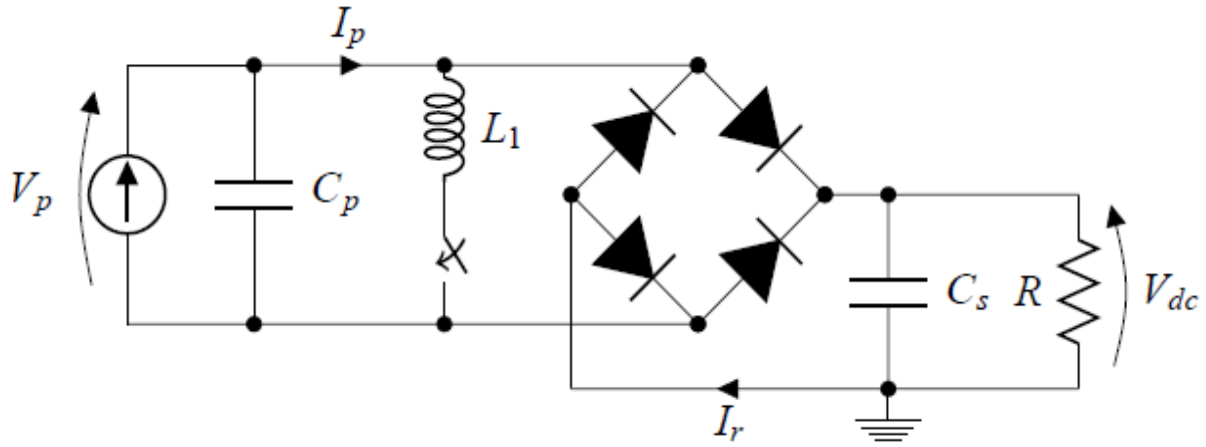
Maksimum toplanan güç, kısa devre ve açık devre rezonans zirveleri için aynı kalır. Elektromekanik kuplajın çok güçlü olması durumunda, yer değiştirmenin çok fazla engelleneceğini ve bunun da uyarımdan gelen enerji girişinin sınırlandırılmasına yol açacağını not etmek önemlidir.

2.6.4. İndüktör Devresinde Senkronize Anahtar Toplama

İndüktörde Senkronize Anahtar Toplama (SSHI) devresi, DCIM devresine çok benzer şekilde çalışan aktif bir devredir. Tek fark, DCIM devrelerinin piezo voltajını yamanın mekanik deformasyonunu kullanarak değiştirmesi, SSHI devresi ise bunu elektronik olarak yapmasıdır.

2.6.4.1. Devrenin Şematik Gösterimi

SSHI devresi, piezoelektrik elemanın voltajını anahtarlı bir elektrik osilatörü aracılığıyla işler. Bu işlem bir kapasitör ve indüktör gerektirir. Bu amaçla, Şekil 2.68'de gösterildiği gibi, piezo kapasitansına paralel olarak AC tarafına anahtarlanmış bir indüktör eklenir. Bu, gücün büyümesiyle sonuçlanan piezo voltajını önemli ölçüde artırmaya izin verir.



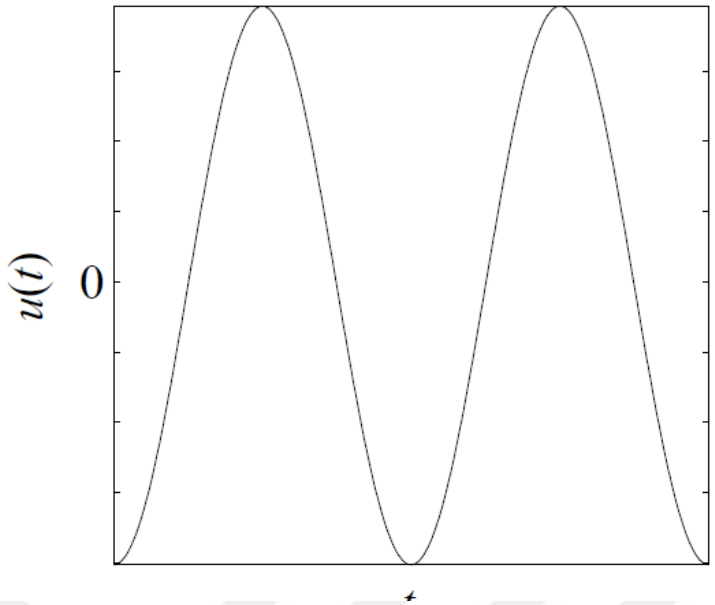
Şekil 2.68: SSHI devre şeması.

Bu devrede üç faz vardır. Birincisi DCIM devresine oldukça benzeyen iletken fazdır. Doğrultucu, piezoelektrik elemandan depolama devresine bir miktar akım iletir. Piezo voltajı, maksimum değerinde yarı sabittir.

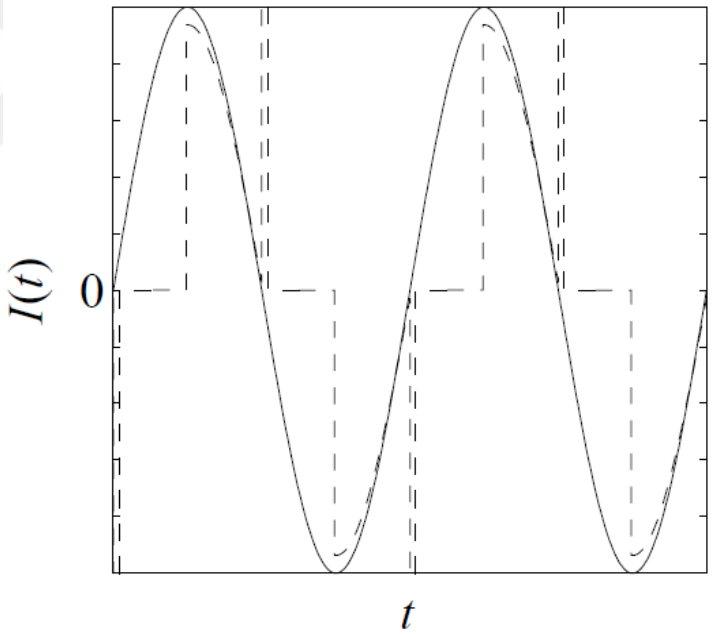
İkinci faz, piezo voltajı V_p düşmeye başladığında başlar. Voltaj düşüşü, kapanan anahtar tarafından algılanır ve endüktörün piezo elemanına bağlanmasıyla sonuçlanır. Bu küme bir osilatör oluşturur. Piezo voltajı, ω_{el} frekansında pozitif ve negatif arasında salınım yapar. Anahtarın tekrar açılması nedeniyle sadece yarım döngü sonra durdurulur.

Üçüncü aşamada, piezo elemanı açık devre modunda çalışır. RLC döngüsünün sonlu direncinden dolayı voltaj, ters çevirmeden öncekinden daha düşüktür. Piezo elemanı bu voltaj kaybını geri kazandıktan sonra zıt iletken faz başlar.

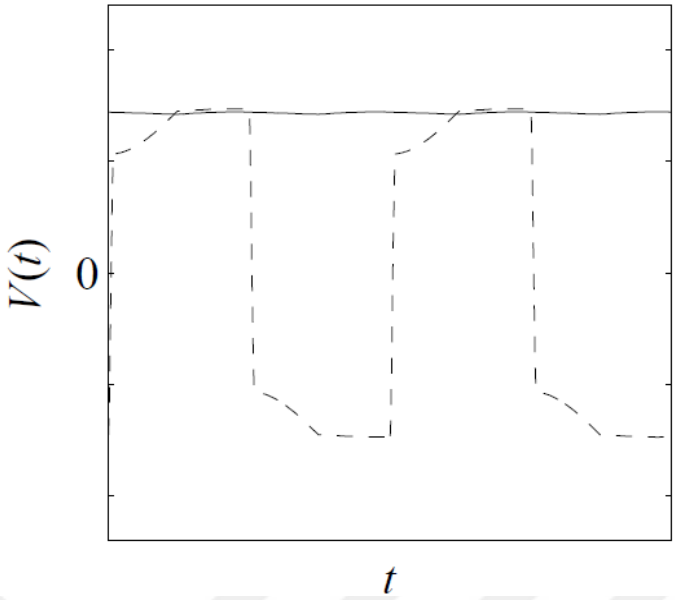
İlişkili yer değiştirme, akım ve voltajın dalga biçimleri sırasıyla Şekil 2.69, Şekil 2.70 ve Şekil 2.71'de gösterilmektedir.



Şekil 2.69: Yer değiştirmenin dalga biçimi.



Şekil 2.70: Akımın dalga biçimi.



Şekil 2.71: Gerilimin dalga biçimi.

2.6.4.2. SSHI Devresindeki Geçerli Denklemler

DCIM devresinde olduğu gibi analitik bir çözüm bulmak mümkün değildir. Doğrusal olmayan doğrultucunun yanı sıra devrenin anahtarlama hareketi çözümü daha da karmaşık hale getirir. Anahtarın kendisini yapmak için gerekli olan devre analitik olarak çözülemeyecek kadar karmaşıktır.

Bununla birlikte, voltaj ters çevirme terimleri dikkate alındığı sürece anahtarın iç bileşenlerini yok sayarak yaklaşık bir çözüm bulunabilir [103]. DCIM devresinde olduğu gibi, çözüm enerji dengesini, akım dengesini ve hareketin yarım döngüsünü dikkate alır. Bir elektrik osilatörün doğal frekansının şu şekilde yazılabileceğine dikkat edilmelidir:

$$\omega_{el} = 1/\sqrt{C_p L_1} \tag{2.79}$$

Burada, C_p kapasitanstır,

L_1 endüktanstır.

Bobinin sonlu direnci nedeniyle, mekanik alandaki viskoz sönümlemeye benzer şekilde salınımların genliğinde bir azalmaya neden olan bir miktar sönümleme vardır. Elektrik alanındaki sönümlemenin sembolü Q_i 'dir ve kalite faktörü veya indüktör kalitesi olarak da

etiketlenir ve kalite faktörü ne kadar yüksek olursa sönüm o kadar az olur. Mekanik alanda, viskoz sönüm sembolü ζ'dir. Kalite faktörünün ifadesi:

$$Q_i = \omega_{el} L_1 / R_L \tag{2.80}$$

Burada R_L bobin direncidir

V_{AI} inversiyonundan sonraki voltaj, inversiyondan önceki voltajın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir:

$$V_{AI} = -V_{BI} e^{-\pi/(2Q_i)} \tag{2.81}$$

Burada V_{BI}, ters çevirmeden önceki voltajı temsil eder.

Normalleştirilmiş yer değiştirme, voltaj ve güç aşağıdaki denklemlerde [103] ifade edilir:

$$u_0' = \frac{u_0}{F_0/k_s} = \frac{1}{\left[\left(1-\Omega^2+\frac{\frac{1-q_I}{2}k_e^2 r\Omega}{\frac{1-q_I}{2}r\Omega+\pi/2}\right)^2+\Omega^2\left(2\zeta+\frac{2\left[1+\frac{r\Omega}{2\pi}(1-{q_I}^2)\right]k_e^2 r}{(\frac{1-q_I}{2}r\Omega+\pi/2)^2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{2.82}$$

$$V_0' = \frac{V_0}{F_0/\theta} = \frac{r\Omega}{\frac{1-q_I}{2}+\pi/2} k_e^2 u_0' \tag{2.83}$$

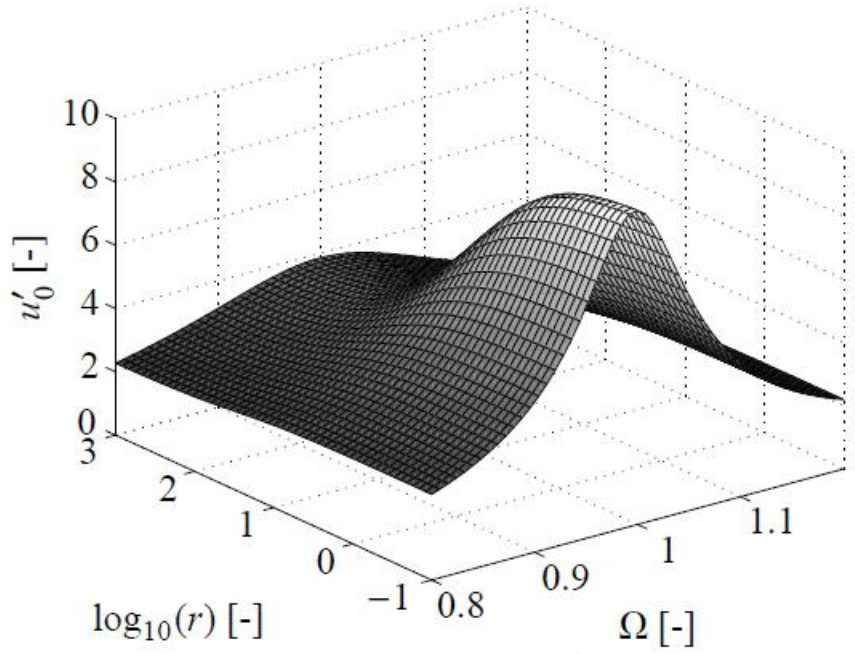
$$P_{avg}' = \frac{P_{avg} M \omega_{SC}}{F_0^2} = \frac{k_e^2 \Omega^2 r}{\left(\frac{1-q_I}{2}+\pi/2\right)^2} {u_0'}^2 \tag{2.84}$$

Burada, q_I denklem (2.81) ($e^{-\pi/(2Q_i)}$) üstel terimini temsil eder.

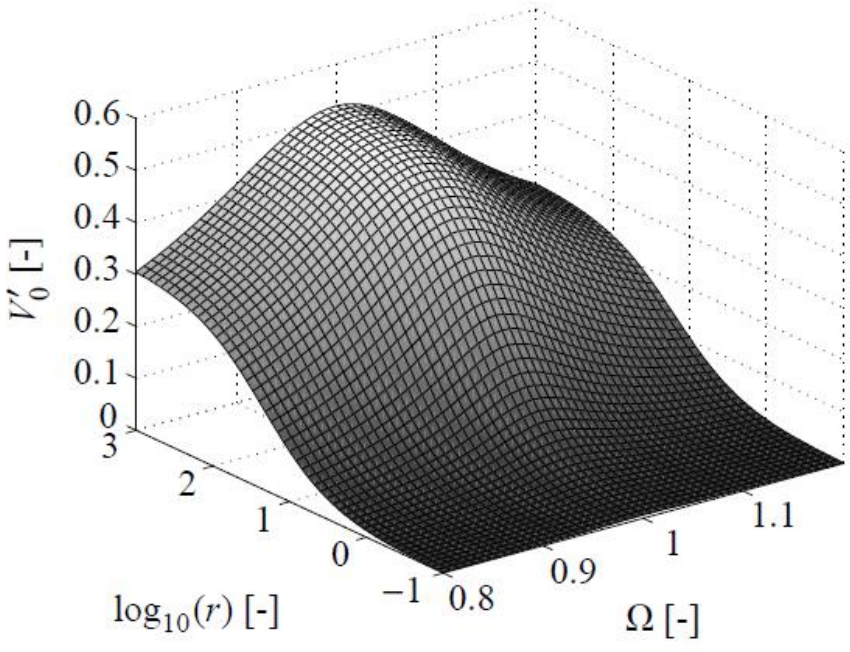
2.6.4.3. Düşük Bir Kuplajın SSHI Devresi Üzerindeki Etkisi

Ana denklemler, sırasıyla Şekil 2.73, Şekil 2.74 ve Şekil 2.75'te gösterildiği gibi yer değiştirme, voltaj ve gücün normalleştirilmiş tepki grafiğini temsil etmeye izin verir. Q_i indüktör kalitesinin 10'a (Q_i=10) eşit olduğu varsayılmıştır. Düşük kuplaj koşullarında, yer değiştirme grafiğindeki en dikkat çekici fark, r ≫ 1'de bir açık devre rezonans zirvesinin olmamasıdır. Bunun nedeni, güç toplanmamasına rağmen, devrenin enerjiyi direnç şeklinde dahili olarak dağıtmasıdır. indüktördeki kayıplar, mekanik alanda bir hareket bastırma ile sonuçlanır. Voltaj grafiğinde düzgün bir maksimum vardır. Piezo elemanından çıkarılan enerjinin büyük bir yüzdesi, sonlu indüktör kalitesinden dolayı direnç r ≫ 1 ise voltaj ters çevrilmesi sırasında kaybolur.

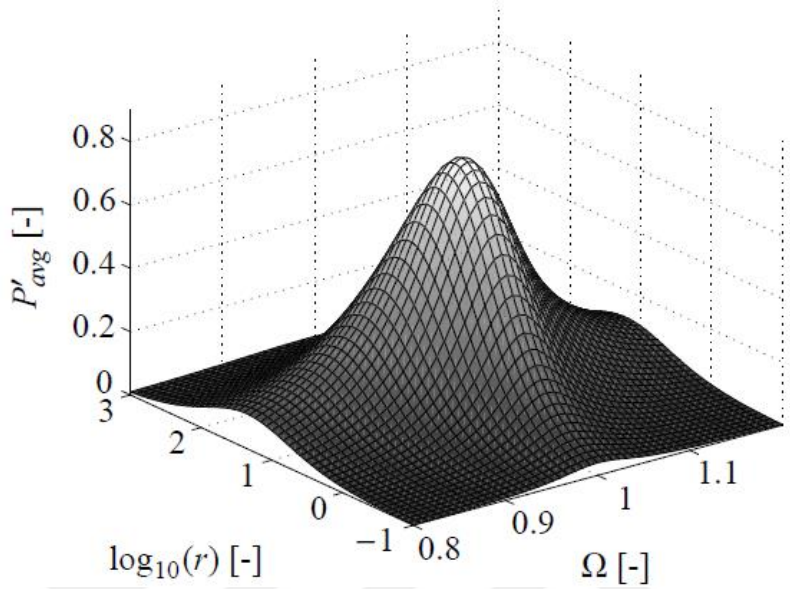
Normalleştirilmiş güç tepkisi grafiğinde kısa devre rezonansında optimal bir çalışma noktası vardır. Güç çıkışının DCIM devresinden önemli ölçüde daha yüksek olduğuna dikkat edilmelidir.



Şekil 2.72: Düşük bir kuplaj faktörü $k_e^2 = 0.01$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\xi = 0.05$ - SSHI devresi için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği.

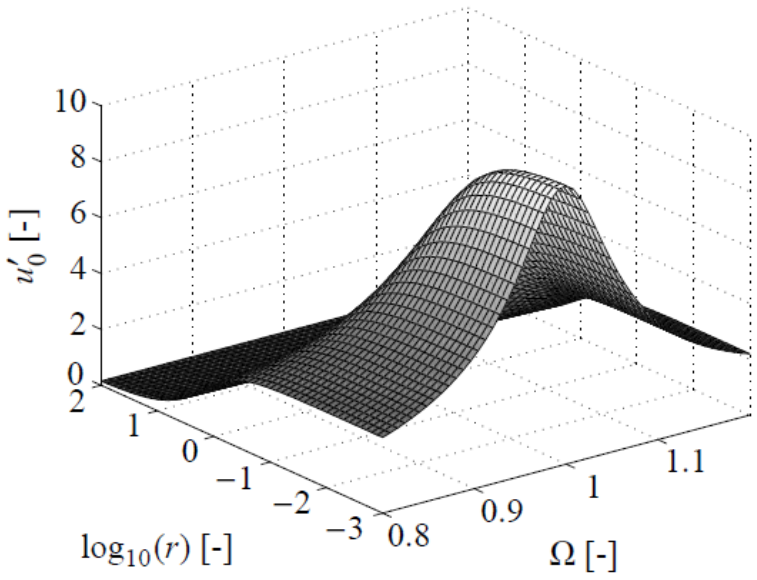


Şekil 2.73: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.01}$ ve boyutsuz sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için voltajın normalleştirilmiş tepki grafiği.



Şekil 2.74: Düşük kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.01}$ ve boyutsuz sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için gücün normalleştirilmiş tepki grafiği.

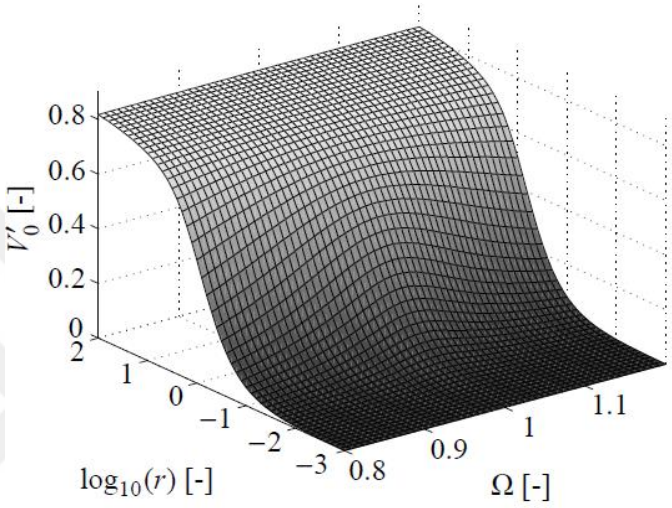
Yüksek kuplaj koşullarında, tüm r ≫ 1 için önemli bir sönüm vardır, bu da gerilimin ters çevrilmesinde neredeyse tüm enerjinin kaybolduğu anlamına gelir. DCIM açık devre durumuyla karşılaştırıldığında, voltaj genliği çok küçüktür. Bu, açık devre rezonansının olmaması ile açıklanabilir. Ayrıca tek bir güç optimumu vardır.



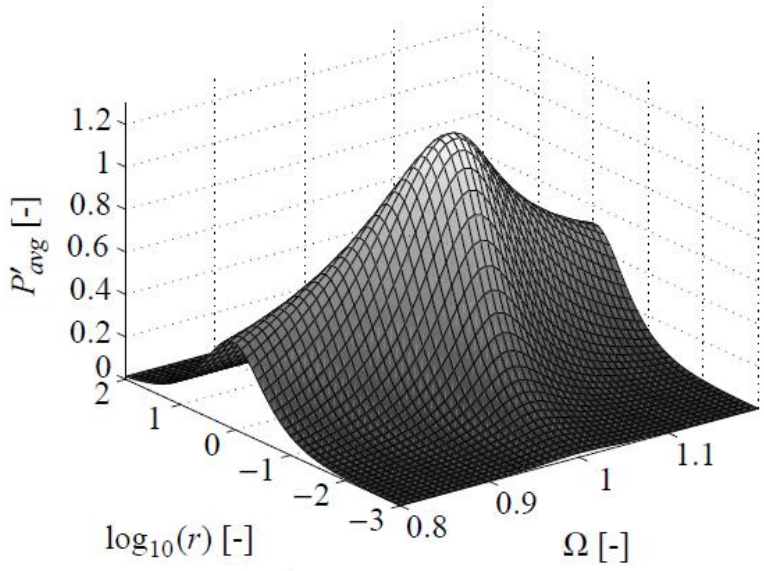
Şekil 2.75: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için yer değiştirmenin normalleştirilmiş tepki grafiği.

Optimum direnç şu şekilde ifade edilebilir:

$$r_{opt} = \frac{\pi^2 \zeta}{4k_e^2} \tag{2.85}$$



Şekil 2.76: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - SSHI devresi için voltajın normalleştirilmiş tepki grafiği.



Şekil 2.77: Yüksek bir kuplaj faktörü $\boldsymbol{k_e^2 = 0.5}$ ve boyutsuz bir sönümleme oranı $\boldsymbol{\xi = 0.05}$ - DCIM devresi için ortalama gücün normalleştirilmiş tepki grafiği.

2.6.4.4. Maksimum Toplanmış Güç

Optimal direnci denklem 2.85'teki ifadesi ile değiştirerek, düşük kuplaj koşullarında maksimum güç şu şekilde ifade edilebilir:

$$P'_{max} = \frac{k_e^2 \Omega {u'_0}^2}{(1-q_I)\pi} \tag{2.86}$$

SSHI devresi yer değiştirme tahrikli bir şekilde çalıştırıldığında, diğer devrelere göre çıktıda önemli bir artış sağladığı fark edilebilir.

SSHI'nin etkin kuplajı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\overline{k_e^2} = \frac{2}{1-q_I} k_e^2 \tag{2.87}$$

2.6.5. Senkron Elektrik Yükü Çıkarma Devresi

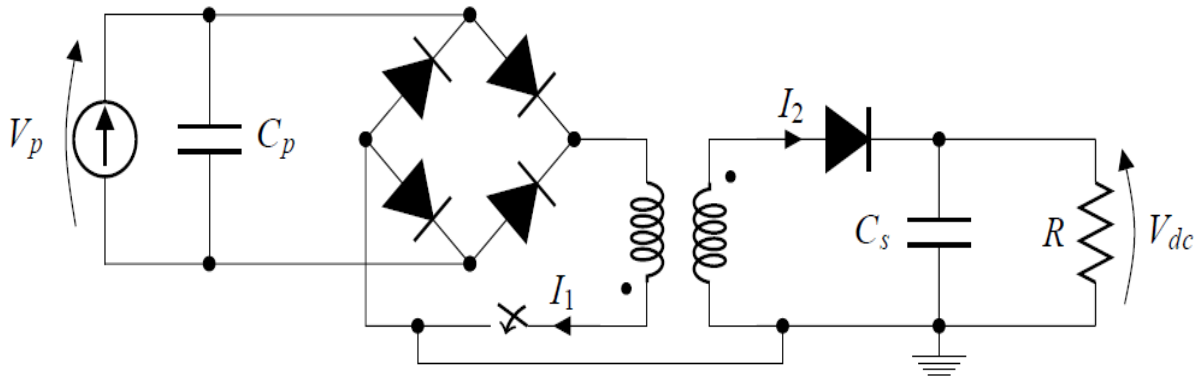
Senkron Elektrik Yükü Çıkarma devresi (SECE) [17], güç toplama için aktif bir devredir. Ana analitik avantajı, optimal elektrik yükü R'nin olmamasıdır. SECE, titreşim enerjisi hasadı için doğrusal olmayan bir tekniktir. Piezoelektrik elemanın kısa bir süre içinde bir bobin üzerinde değiştirilmesinden oluşur. Bu teknik de elektromanyetik jeneratörler için çok uygundur [104]. SECE devrelerinin sağladığı temel fayda, empedans uyum sorununu çözmenin yanı sıra yüksek bir elektromekanik dönüşüm oranı sağlamasıdır.

2.6.5.1. Devrenin Şematik Gösterimi

Senkron Elektrik Yükü Çıkarma devresi Şekil 2.79'da gösterilmektedir. Bir bağlı indüktör ve bir anahtarın eklendiği DCIM devresidir. Bobinlerin pozitif kontaklarının sembolü bir noktadır. Bu özel durumda, üretilen akımın istenen yönde akmasını sağlamak için bobinler zıt olarak bağlanır.

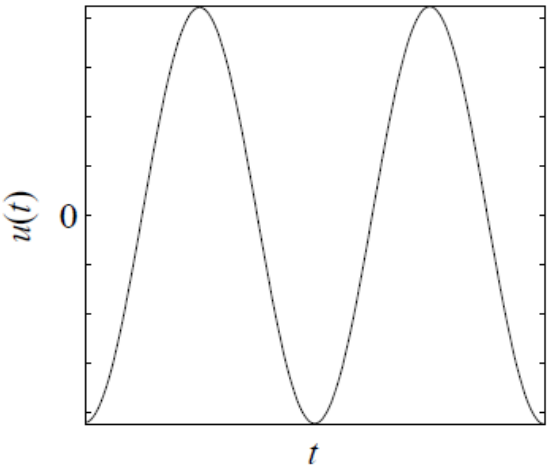
Açık faz, devre çalışmasında ana fazdır. Bu aşamada piezo eleman açık devre konfigürasyonundadır. Gerilimin maksimize edilmesi, anahtarın kapandığı birincil deşarj

fazına yol açar. Bu, elemanın doğrultucu ve birincil indüktör yoluyla iletilmesine izin verir. Doğrultucu ve birincil indüktörden geçen akım maksimum olduğunda piezo elemanındaki voltaj sıfırdır. Ardından, anahtar tekrar açılır ve ikincil deşarj aşamasına neden olur. Bu durumda bağlı indüktörün manyetik alanı maksimumdur. Anahtarın açık olması nedeniyle, indüktör, doğrultucu ve indüktörün sekonder kombinasyonunda akım üretimi yoluyla enerjisini boşaltır. Bu üretilen akım diyottan geçerek C_S'yi şarj eder. İkincil deşarj aşamasının tamamlanmasının ardından döngü, açık aşamadan başlar.

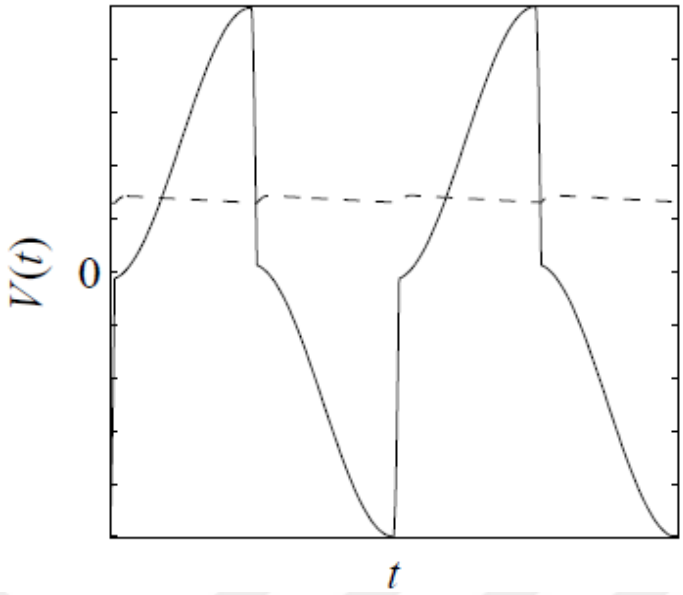


Şekil 2.78: SECE devre şeması.

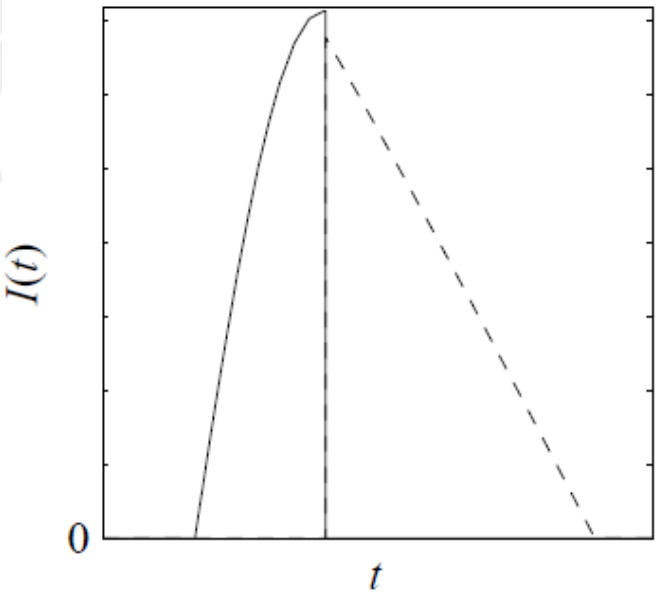
Bir SECE devresinin yer değiştirme girişi, voltajı ve endüktör akımının dalga biçimleri Şekil 2.80, Şekil 2.81 ve Şekil 2.82'de gösterilmektedir.



Şekil 2.79: Bir SECE devresinin yer değiştirme girişinin dalga biçimi.



Şekil 2.80: Bir SECE devresinin geriliminin dalga biçimleri. Tam çizgi V_p'yi, noktalı çizgi V_{dc}'yi temsil eder.



Şekil 2.81: Bir SECE devresinin akımının dalga biçimleri. Tam çizgi I_1'i, noktalı çizgi ise I_2'yi temsil eder.

2.6.5.2. Maksimum Toplanmış Güç

Düşük kuplaj koşullarında, SECE devresi çoğunlukla açık devre modunda çalıştığı için güç, bir kapasitörde depolanan enerjinin denklemi (Denklem 2.88) kullanılarak ifade edilebilir.

$$E_C = \frac{1}{2} C_p V_{p,0}^2 \quad (2.88)$$

Genliği u_0 olan bir harmonik yer değiştirmeyi varsayalım, maksimum piezo gerilimi $V_{p,0}$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_{p,0} = \frac{2\theta u_0}{C_p} \quad (2.89)$$

Düşük kuplaj koşullarında normalleştirilmiş maksimum güç şu şekilde ifade edilebilir:

$$P'_{max} = \frac{k_e^2 \Omega {u'_0}^2}{\pi} \quad (2.90)$$

Yüksek kuplaj koşullarında ifadesi şöyle olur:

$$P'_{max} = \frac{1}{16\zeta} \quad (2.91)$$

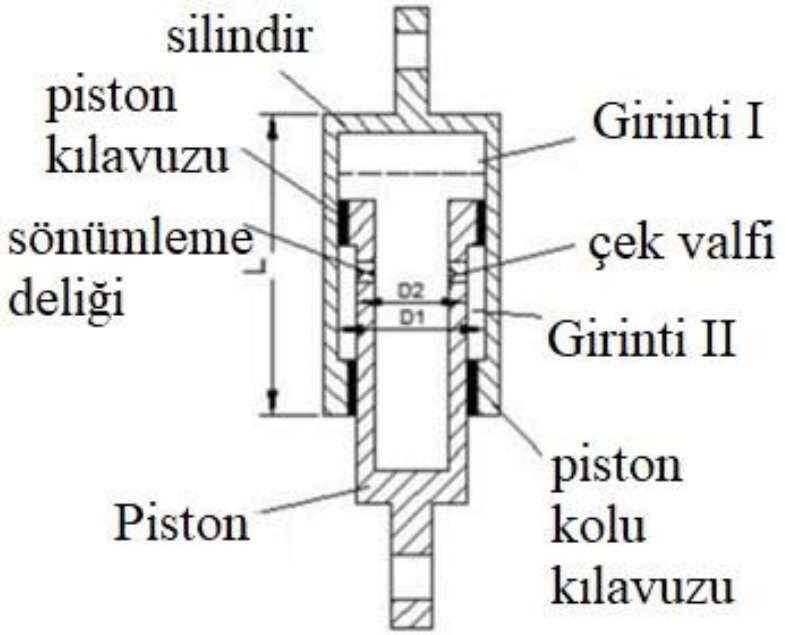
2.7. SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ

Süspansiyon sistemi esas olarak amortisörler, yaylar ve araç ile tekerlek grupları arasında bir bağlantı oluşturan ve ikisi arasında göreceli harekete izin veren bağlantılardan oluşur. Araç şasisinin en önemli bileşenlerinden biridir. Aracın gövdesini destekler ve engebeli yol profillerinden kaynaklanan titreşimleri emerek denge, rahatlık ve iyi yol tutuşu sağlar.

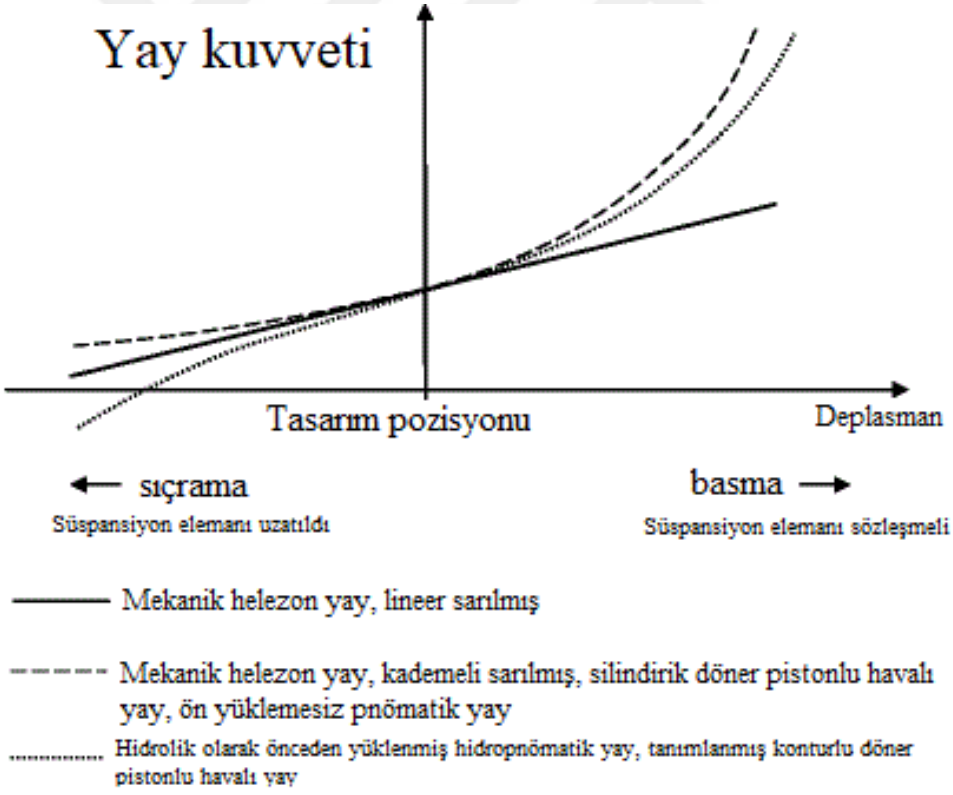
2.7.1. Ana Süspansiyon Sistemi Çeşitleri

Oleo-pnömatik süspansiyonlar olarak da bilinen hidro-pnömatik süspansiyon sistemleri, en son madencilik damperli kamyonlarda en yaygın süspansiyon türüdür. Yay rolünü oynayan gazlı bir ortamdan ve damper rolünü oynayan sıvı bir ortamdan oluşurlar. Ek olarak, bir gaz akümülatörü belirli bir miktarda nitrojeni belirli bir basınçta tutar.

Damperli kamyonlarda hidro-pnömatik süspansiyonlar dışında iki farklı süspansiyon türü daha kullanılmaktadır. Bunlar mekanik ve pnömatik süspansiyon sistemleridir [105]. Üç farklı süspansiyon sistemi tipinin kuvvet ve yer değiştirme eğrilerinin analizi, her birinin karakterize edilmesini sağlar. Şekil 2.84'te gösterildiği gibi, hidro-pnömatik ve pnömatik süspansiyon mekanizmasının yay rijitlik oranı değişken ve ilerleyicidir. Bu, gaz poli-tropik durum değişikliği fenomeni ile açıklanabilir. Bununla birlikte, mekanik yayın yay rijitlik oranı tüm işlem boyunca kalır.



Şekil 2.82: hidro-pnömatik ön süspansiyon yapısı.



Şekil 2.83: Mekanik, hidropnömatik ve pnömatik süspansiyon mekanizmalarının kuvvet-yer değiştirme eğrileri [105].

Sürüş sırasında, kamyon titreşimleri, süspansiyonlarda dağılan bir miktar enerji üretir. Piston, sistem içindeki hidrolik yağın sıkıştırılmasına yol açan tamburun içine itilir. Önemli kesitsel varyasyon, bu enerjinin büyük bir kısmının sürtünme yoluyla dağılmasına neden olur. Geri kalanı, gaz akümülatörünü kullanarak sıkıştırılabilir gaz odası üzerinde hareket edecektir. Bu, sönümleyici hidrolik yağı kinetik enerjisinin yay gazının potansiyel enerjisine dönüştürülmesini sağlar. Karşılıklı dönüşüm, gaz (akümülatör) genleşerek hidrolik yağın menfezler boyunca ters yer değiştirmesiyle sonuçlandığında meydana gelir. Bu fenomen, üretilen tüm enerji tamamen dağılana kadar tekrar eder. Hidrolik yağ ile sağlanıyorsa salınımı durdurmak için gerekli sönümleme.

Pnömatik süspansiyonlar, genellikle hava olan gaza ilham verir ve verir. Bu, basınç değişimi ve yük arasında doğrusal bir ilişki ile sonuçlanan enerji kaybından sonra gaz hacminin sabit kaldığı anlamına gelir.

Hidropnömatik süspansiyon mekanizmaları söz konusu olduğunda, enerji dağıtma işlemi sırasında değişen hidrolik yağın hacmidir. Başka bir deyişle, tüm süreç boyunca hiçbir değişiklik yoktur. Bununla birlikte, bu gaz kütlesinin hacmi uygulanan yükler ile ters orantılı olarak değişir (yük ne kadar yüksekse, gaz kütlesi hacmi o kadar az olur ve bu da daha yüksek bir yay rijitliği oranı ile sonuçlanır). Bu, Şekil 2.84'teki hidro-pnömatik süspansiyonların sergilediği aşamalı davranışı açıklar.

Mekanik süspansiyonların yüksek yüklerde düşük doğal frekanslar ve düşük yüklerde yüksek doğal frekanslar sağladığına dikkat edilmelidir. Tüm yük koşulları için pnömatik süspansiyonlar düşük doğal frekanslar sağlar. Hidropnömatik sistemlerin doğal frekansları artan yüklerle biraz artar. Her üç süspansiyon türü için de, durmaya yönelik sönüm, genellikle yağ olan bir sıvının viskoz sürtünmesi yoluyla gerçekleşir.

2.7.2. Sınır Sürtünmesi

Kılavuz elemanlar, burçlar ve contalar gibi askı sistemi bileşenleri, sınır sürtünmesi ile ek sönümlemenin olumsuz etkisine neden olur. Bu nedenle contalarda ve kılavuz elemanlarda sürtünmeyi ortadan kaldırmak ve burçlardaki sürtünmeyi minimum seviyede tutmak çok önemlidir.

Mekanik süspansiyonlarda mekanik yay elastik deformasyona uğrar ve sürtünme olmaz. Bu, bu tür sistemlerde sınır sürtünmesinin yalnızca viskoz sönümleme sıvısındaki kılavuz ve sızdırmazlık elemanları tarafından oluşturulabileceği anlamına gelir. Dinamik contalardaki sürtünme kuvveti, conta kenarının uzunluğu ve contadaki fark basıncı ile doğru orantılıdır.

Pnömatik süspansiyon sistemleri ayrıca yağ sönümleme tekniğini kullanır. Mekanik süspansiyonlarda meydana gelen aynı tip sürtünme pnömatik süspansiyonlarda da mevcuttur. Ayrıca körükten kaynaklanan sürtünme vardır. En son eksenel katlı körüğün ortaya çıkışı, körük sürtünmesini azaltmaya izin verir. Standart döner körüklü bir binek otomobilde ilave körük sürtünmesi yaklaşık 20N'dir. Yeni eksenel kat körük teknolojisinin kullanılması, sürtünmenin %50 oranında azalmasına neden olur. Başka bir deyişle, pnömatik süspansiyondaki sınır sürtünmesi, mekanik süspansiyondakinden biraz daha yüksektir.

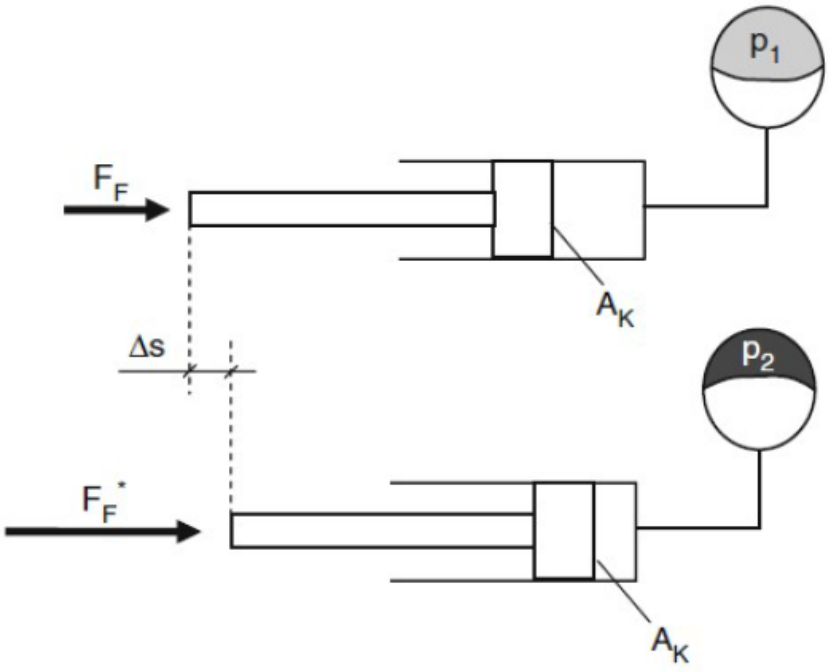
Hidro-pnömatik süspansiyonları tasarlarken, sınır sürtünmesini hesaba katmak çok önemlidir. Tek bileşenli entegrasyonu nedeniyle, ekstra yay sönümleme elemanlarının eklenmesi oldukça zordur. Bu tür sistemlerde kauçuk burçların kullanılması mümkündür ve sürtünme seviyelerinin azaltılmasına yardımcı olabilir. Yüksek yüklere maruz kalmak, yumuşak kauçuk elemanların kullanılmasını zorlaştırır. Bununla birlikte, gürültü transferini de artırabilir. İzin verilen yükleri mümkün olduğunca yüksek tutmak ve kauçuk elemanları mümkün olduğunca yumuşak tutmak hayati önem taşımaktadır.

2.7.3. Seviye Kontrolü ve Ayarı

Mekanik yaylı süspansiyon seviye kontrolü ve ayarlamaları, bu işlemin sınırlı etkisi nedeniyle oldukça sıra dışıdır. Mekanik yaylı süspansiyon sistemlerinde en yaygın seviye ayarlama yöntemi manuel olanıdır. Ancak seviye kontrolünün şimdiye kadar mekanik yaylı süspansiyonlar üzerinde çok az etkisi oldu.

Hidro-pnömatik ve pnömatik süspansiyonların seviye ayarlamaları, sistemden yağ veya gazın eklenmesi veya boşaltılması yoluyla kolayca yapılabilir. Her iki tip süspansiyon sistemi de bu süreçten geçebilse de, hidro-pnömatik süspansiyon sistemlerinin daha doğru bir şekilde seviyelendirildiğine dikkat edilmelidir. Hidropnömatik süspansiyon sistemlerinde tesviye hızı, pnömatik sistemlere göre daha yüksektir.

Tipik bir hidropnömatik süspansiyon sistemi, hidropnömatik akümülatör, hidrolik silindir ve hidrolik sıvı olmak üzere 3 ana bileşenden oluşur. Konfigürasyonu, akümülatör ve silindir ayrılacak şekilde ise, ek yağ hatları ve bağlantı parçaları gereklidir. Hidrolik sıvının serbest bırakılması veya eklenmesi yoluyla hidrolik basınç ayarı, sistemin işlevini düzgün bir şekilde yerine getirmesini sağlar. Akümülatördeki basınç ve sıvı hacmi, piston çubuğunun yer değiştirmesi sırasında değişir. Bu varyasyonlar piston kolu kuvvetinin yer değiştirmesine göre değişmesine neden olur. Yay rijitliği c, piston kolu kuvveti ile konumu arasındaki ilişki ile tanımlanır. Sürtünme ve atalet kuvvetlerinin ihmal edilebilir olduğu varsayıldığında, dış yay kuvvetinin F_F her zaman basınç tarafından üretilen kuvvete eşit olduğu açıktır. Yay dış kuvveti F_F arttırıldığında, basıncı dengeyi sağlayan bir değere ulaşana kadar bir miktar sıvı akümülatörün içine yer değiştirir. Süspansiyon sisteminin işleyişini anlamanın temel temeli, dış yay kuvvetleri ile hidrolik basınçtan kaynaklanan iç kuvvetler arasındaki dengede bulunabilir.



Şekil 2.84: Mono süspansiyon sisteminin pistonundaki kuvvet dengesi [105].

$$F_F = A_K . P_1 \quad (2.92)$$

$$F_F^* = A_K . P_2 \quad (2.93)$$

$$c = \frac{F_F - F_F^*}{\Delta_S} \quad (2.94)$$

Ayrıca, akümülatör ve silindir arasına bir akış direncinin uygulanması, sisteme ek sönümleme sağlar. Bu, hidrolik sıvının kinetik enerjisinin bir kısmının ısıya dönüştürülmesiyle elde edilir.

Bu ek mekanizma sayesinde, silindir kılavuz elemanları ve contaların neden olduğu istenmeyen sınır sürtünmesinin yanı sıra istenilen sönüm elde edilir.

2.7.4. Süspansiyon Sistemlerinin Yay Özellikleri

2.7.4.1. Hidro-pnömatik Süspansiyon Sisteminin Özel Durumları

0 durumunda, yay kuvveti F_{F0}, 0'a eşittir. Gaz, V_0 akümülatörünün tüm hacmini kaplar ve akümülatör basıncı, hidro-pnömatik süspansiyonun tasarımı sırasında tanımlanan P_0 ön yükleme basıncına eşittir.

Durum 1'de, statik süspansiyon kuvveti F_{F1} süspansiyonu süspansiyon desteğine yükler. $F_{F1} > F_{F0}$ olduğuna dikkat edilmelidir. Statik süspansiyon kuvveti F_F1'in uygulanması, izotermik akümülatör hacminin V_0'dan V_1'e değişmesine ve P_0'dan P_1'e basınç değişikliğine yol açar.

2. durumda, dinamik süspansiyon kuvveti F_{F2}, F_{F1} etrafında salınır. Böylece, akümülatör gazı, alternatif ve politropik sıkıştırmalar ve genişlemeler yaşar. Yeni basınç ve hacim sırasıyla P_2 ve V_2'dir.

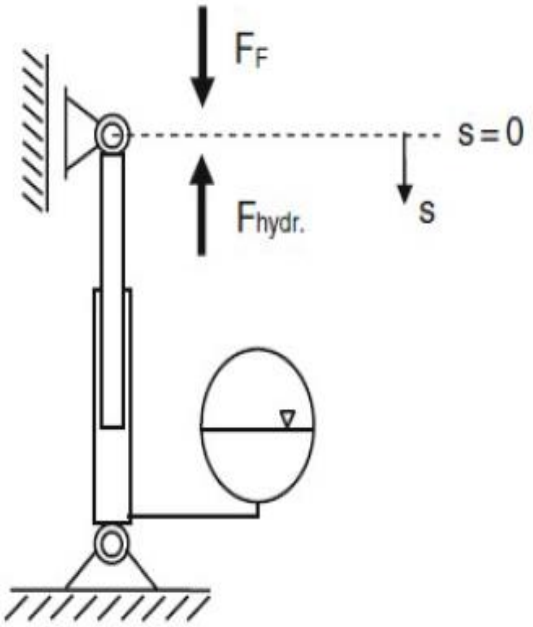
2.7.4.2. Yay Rijitlik Faktörü

Hidro-pnömatik süspansiyon sistemlerinin silindirine etki eden dış kuvvetin büyümesi, aynı anda basınçta bir artışa ve piston çubuğunun konum değişikliğine neden olur. Bu, hidrolik sıvının sıkıştırılması, bağlantı elemanlarının ve sıvı hatlarının genişletilmesi ve akümülatördeki gazın sıkıştırılması ile doğrulanır. Akış direncini hidro-pnömatik bir süspansiyon sisteminden çıkardıktan sonra, yay rijitliği oranı, süspansiyon silindirinin saf yay kuvveti yer değiştirme eğrisi kullanılarak bulunabilir. Yay rijitlik oranı, hidrolik sıvı sıkıştırma, gaz sıkıştırma ve sıvı hatları ve bağlantı elemanlarının genişlemesi ile ilgili üç bileşenden oluşur. Genel fizik yasalarının uygulanması denklem (2.95) ile sonuçlanır:

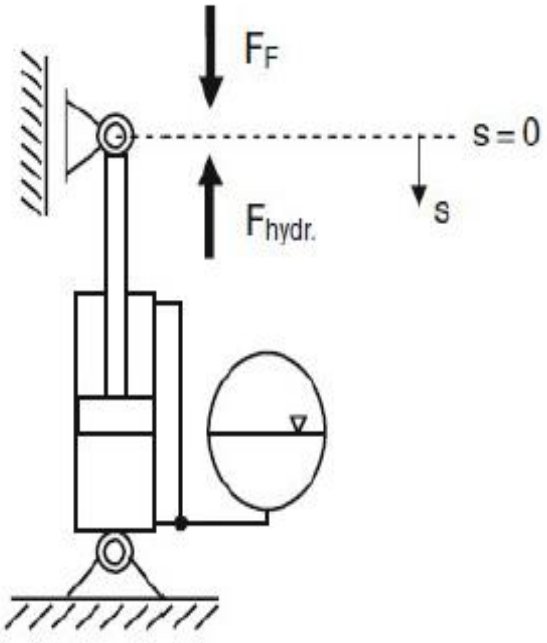
$$C_S = \frac{C_G C_L C_F}{C_G K_L + C_G C_F + C_F C_L} \tag{2.95}$$

Hidrolik sıvı; sıvı bağlantı parçalarının ve hatların yüksek rijitliği ve ayrıca hidrolik sıvının yüksek sıkıştırma modülü nedeniyle hatlar ve bağlantı parçalarının toplam yay rijitlik oranı C_S üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Başka bir deyişle, hidro-pnömatik süspansiyon sisteminin yay karakteristikleri esas olarak akümülatörlerin gaz özelliklerinden etkilenir.

Hidro-pnömatik süspansiyon sistemleri çeşitli konfigürasyonlarda kullanılabilir. Tek etkili silindir Şekil 2.85'da, çift etkili silindir ise Şekil 2.86'de gösterilmektedir.



Şekil 2.85: Önceden yüklenmemiş tek etkili hidro-pnömatik süspansiyonun şeması [105].



Şekil 2.86: ön yüklemesiz çift etkili hidro-pnömatik süspansiyonun şeması [105].

İkinci konfigürasyonun birincisine göre avantajı, daha fazla geri tepme sönümlemesi sağlamasıdır. Pistonun kesit alanı, piston çubuğunun harici olarak etkili alanı olarak kabul edilir. Sıkıştırma ve geri tepme için kuvvet-yer değiştirme eğrisi. Mekanik bir helezon yay için bu kuvvet-yer değiştirme eğrisi doğrusaldır. Doğrusal yapısı, helezon yayların paralel bağlanması ve sarma teknikleri kullanılarak değiştirilebilir. Hidro-pnömatik süspansiyonların kuvvet yer değiştirme eğrisi orantısız bir şekilde ilerleyicidir.

Piston bölmesindeki basınç ile piston yüzeyine uygulanan dış kuvvet arasındaki ilişki şu şekilde yazılabilir:

$$F_K = P_K A_K \tag{2.96}$$

Durumların politropik değişimlerinin durum denklemini kullanarak:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \tag{2.97}$$

S yer değiştirmesinin artması gazın sıkışmasına yol açar:

$$V_2 = V_1 - A_K S \tag{2.98}$$

P_2 şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1^n}{V_2^n} = \frac{P_1 V_1^n}{(V_1 - A_K s)} \tag{2.99}$$

Durum 0'dan durum 1'e durum değişimi izotermaldir. Şu sonuca varılabilir:

$$P_1 V_1 = P_0 V_0 \tag{2.100}$$

V_1 şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$V_1 = \frac{P_0 V_0}{P_1} \tag{2.101}$$

Pistondaki kuvvetlerin dengesinden:

$$F_{F1} = P_1 A_K \tag{2.102}$$

Bu nedenle:

$$P_1 = \frac{F_{F1}}{A_K} \tag{2.103}$$

2. durumda, yüzey fonksiyonu $P_K(s)$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_K(s) = P_2 \tag{2.104}$$

Yukarıdaki tüm denklemleri birleştirmek bizi şu sonuca götürür:

$$F_K(s) = \frac{\frac{F_{F1}}{A_K} X \left(\frac{P_0 V_0}{\frac{F_{F1}}{A_K}}\right)^n}{\left(\frac{P_0 V_0}{\frac{F_{F1}}{A_K}} - A_K S\right)^n} A_K \tag{2.105}$$

Bu yüzden:

$$F_K(S) = F_{F1} X \frac{\left(\frac{P_0 V_0}{F_{F1}}\right)^n}{\left(\frac{P_0 V_0}{F_{F1}} - S\right)^n} \tag{2.106}$$

Şunu varsayalım:

$$\frac{P_0 V_0}{F_{F1}} = h_{0F} \tag{2.107}$$

Bu denklem ikame ile elde edilebilir:

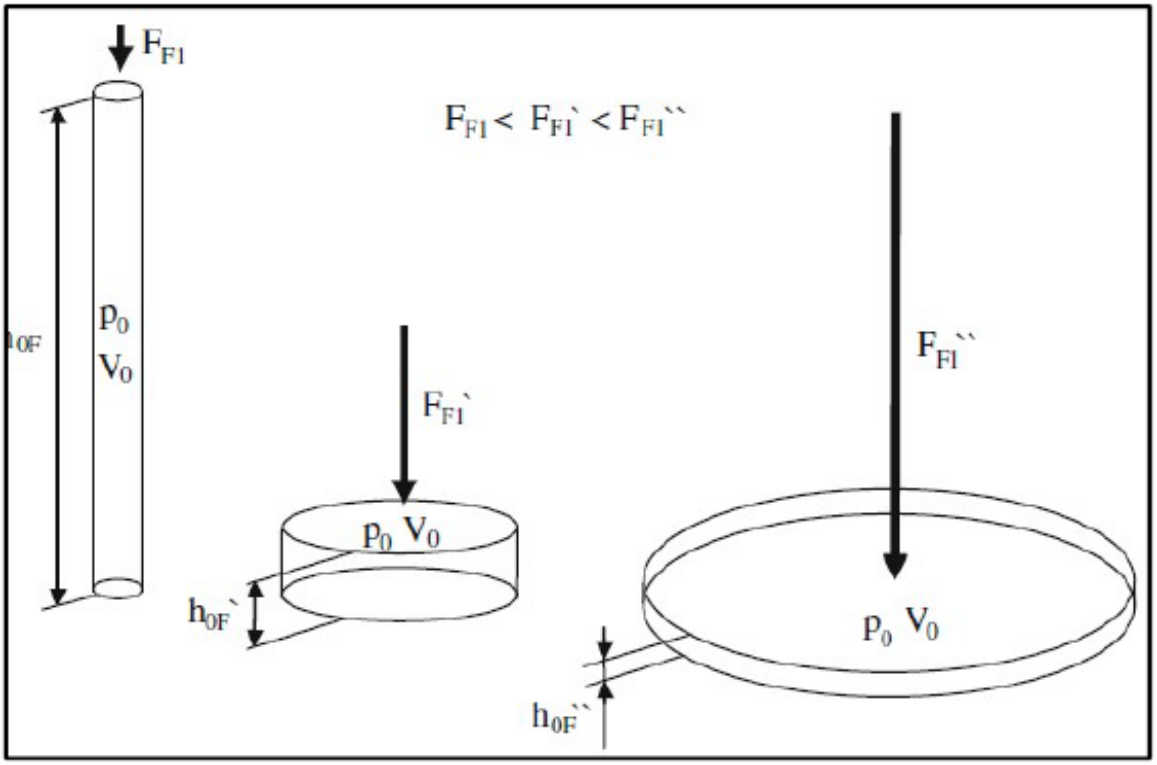
$$F_K(S) = F_{F1} X \frac{(h_{0F})^n}{(h_{0F} - S)^n} \tag{2.108}$$

h_{0F}, basıncı P_0 ön yükleme basıncına eşit olan ve hacmi V_0'a eşit olan bir gaz sütununun yüksekliğini temsil eder. F_{F1} dış kuvveti, Şekil 2.88'de gösterildiği gibi gaz kolonunun tepesine uygulanır.

Hidro-pnömatik süspansiyon sistemlerinin önemli bir özelliği, statik yay yükü ne kadar yüksekse, h_{0F} gaz kolonunun yüksekliğinin o kadar küçük olmasıdır. Herhangi bir S yer değiştirmesinde, gaz basıncı kuvvetlerindeki varyasyon ne kadar yüksek olursa, yay rijitlik oranının o kadar yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Sütun yüksekliğinin göreli değişimi $(h_{0F} - S)/h_{0F}$ olarak ifade edilebilir.

h_{0F} ne kadar küçükse, kolon yüksekliğindeki nispi değişiklik, hacimdeki nispi azalma ve basınçtaki nispi artış o kadar önemlidir. Yay rijitlik oranı, statik yay yüküne bağlıdır:

$$c = \frac{dF}{ds} = \frac{d(PA_K)}{ds} = A_K \frac{dP}{ds} \tag{2.109}$$



Şekil 2.87: farklı statik yay yükleri için gaz sütunu $\boldsymbol{h_{0F}}$ yüksekliği $\boldsymbol{F_{F1}}$ [105].

(2.99) denkleminin türevini alarak ve zincirler kuralını uygulayarak.

$$\frac{dP}{ds} = P_1 V_1^n (-n)(V_1 - A_K S)^{n-1}(-A_K) \qquad (2.110)$$

Denklem (2.103) ve Denklem (2.101)'e göre 0'dan 1'e izotermal değişim ve pistondaki kuvvetlerin dengesi dikkate alınarak, Denklem (2.111) şu şekilde çıkarılabilir:

$$c = A_K \frac{dP}{ds} = A_K \frac{F_{F1}}{A_K}\left(\frac{P_0 A_K V_0}{F_{F1}}\right)^n (-n)\left(\frac{P_0 A_K V_0}{F_{F1}} - A_K S\right)^{-n-1}(-A_K) \qquad (2.111)$$

İfadeyi çözerek ve h_{0F}'yi Denklem (2.107)'deki ifadesi ile değiştirerek:

$$(s) = F_{F1} n \frac{h_{0F}^n}{(h_{0F} - S)^{n+1}} \qquad (2.112)$$

Denklem (2.112), h_{0F}'nin yay rijitlik oranının değişkenlerinden biri olduğunu gösterir. h_{0F}, F_{F1}'in bir işlevidir.

Özel durumda $S = 0$ ve h_{0F} çözülerek yay rijitliği denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$c = n \frac{F_{F1}^2}{P_0 V_0} \qquad (2.112)$$

Süspansiyon silindirlerinin geometrisinin bu denklemlerin hiçbirini etkilemediğine dikkat edilmelidir. Akümülatördeki asılı yük ve gazın özellikleri, yay rijitlik oranının bağlı olduğu kuvvet-yer değiştirme eğrisinin şeklini tanımlar. Akümülatördeki gazın temel özellikleri, ön dolum basıncı P_0 ve akümülatör hacmi V_0'dır. Gaz ayrıca ideal gaz durumu denklemi ile de tanımlanabilir: $m_G RT$. Bu, yay rijitliği oranının aynı zamanda gaz dolgusunun kütlesine m_G ve T sıcaklığına da bağlı olduğunu gösterir. Akümülatör gaz sıcaklığı ne kadar düşükse, yay o kadar rijittir.

2.7.5. Hidro-pnömatik Süspansiyonların Sönümleme Özellikleri

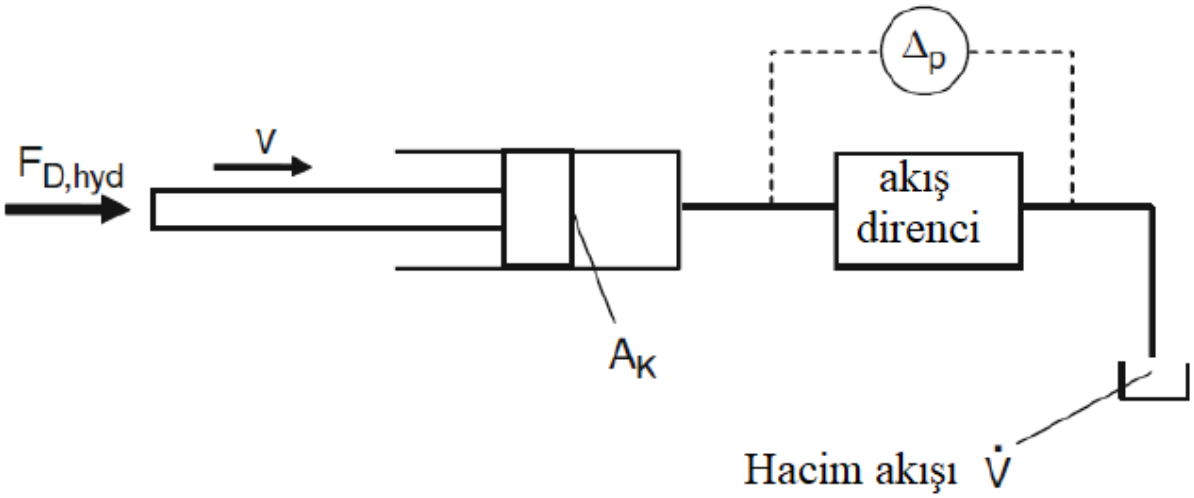
Süspansiyon sisteminde, sönümleme elemanları tekerlek grupları, şasi ve rampa tarafından iletilen dış enerjinin dağıtılmasını sağlar. Sönüm olayı sayesinde rezonansa bağlı salınım genliklerinin artması önlenir. Sönümleme elemanları, süspansiyon sistemlerinin çalışması sırasında geciktirme kuvvetlerinin uygulanması yoluyla mekanik enerjinin (çoğunlukla kinetik ve biraz potansiyel) ısıya dönüştürülmesinde rol oynar. Bir süspansiyondaki sönümleme kuvvetleri, akışkan, viskoz veya hidrodinamik sürtünme ve sınır, kuru veya katı cisim sürtünmesi olmak üzere iki ana prensibe dayanmaktadır. Bir yandan, akışkan içinde, akış kanalına bir akış direncinin yerleştirilmesi yoluyla viskoz veya hidrodinamik sürtünmeler elde edilir ve bu da, geciktirme kuvvetinin oluşmasına yol açan silindirin hareketli parçaları üzerinde etki eden akışkan basıncının artmasıyla sonuçlanır. Öte yandan, sınır, kuru veya katı cisim sürtünmeleri, cisimlerin ara yüzleri boyunca birbirine kayması ile elde edilir ve yapışma ve yüzey pürüzlülüğü nedeniyle bir direnç oluşturur.

Ayrıca, belirli yol profillerinde araçların hızını azaltmak için aşınmasız geciktirici uygulamalarında uygulanan girdap akımı ilkesi gibi pek alışılmış olmayan başka ilkeler de vardır. Girdap akımı ilkesi, bir manyetik alanda hareketi sırasında bir elektrik iletkeninin akım indüksiyonunu kullanır. Ek olarak, iç gaz dolgularını kullanarak aynı anda hem damper hem de yay rolünü oynayan gazlı-yay-sönümleyici-elemanları olarak adlandırılan elemanlara dikkat etmek önemlidir.

2.7.5.1. Akışkan Sürtünmesi Sönümlemesi.

Hidropnömatik süspansiyon sisteminde basınç, pistonun hareketli kısımlarındaki hidrolik akışkan vasıtasıyla akümülatörlere aktarılır. Pistonun yer değiştirmesi, hidrolik sıvının, frekansa bağlı olarak akış yönü varyasyonları ile akümülatör ve silindir arasında akmasına izin

verir. Akışkanın içindeki kesme akışları, akış dirençlerinin montajı sayesinde hidrolik akışkanın kinetik enerjisini ısıya dönüştürür. Akış direnci tarafından piston hareketine karşı bir kuvvet oluşturan bir basınç kaybı üretilir. Dolayısıyla ortaya çıkan bu kuvvet, Şekil 2.89'da gösterildiği gibi salınımdan enerjiyi boşaltacağı için bir sönümleme kuvvetidir.



Şekil 2.88: akışkan sürtünmesi sönümleme prensibi [105].

$$F_{D,hyd} = \Delta P A_K \tag{2.113}$$

$F_{D,hyd}$, kamyon şasesine bağlı süspansiyonun üst kısmından eklenen rot tarafı kuvvetini temsil eder. Bu kuvvet esas olarak yüzey tümsekleri (hareket halinde) ve yüksek darbeli kepçe yükleme işlemleri (rölantide) tarafından tahrik edilir.

$F_{D,hyd}$, pistonun etkin kesitine bölünen sonuçtaki basınç düşüşüne eşittir.

$$F_{D,hyd} = \frac{P_{D,hyd}}{v} \tag{2.114}$$

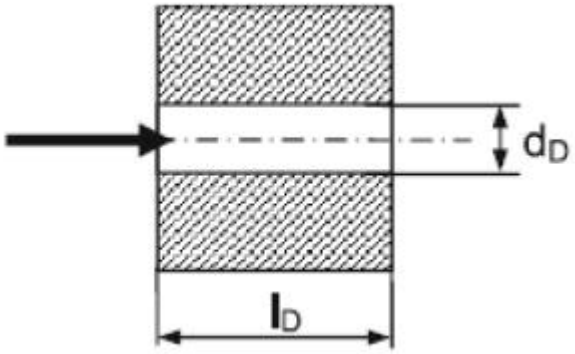
Basınç düşüşü şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_{D,hyd} = F_{D,hyd} v = \Delta p \dot{V} \tag{2.115}$$

Akışkan sürtünmesi sönümleme kuvvetinin büyük ölçüde süspansiyonun hızıyla ilişkili olduğunu belirtmek çok önemlidir.

sınır sürtünmesi yerine süspansiyon hareketinin hızı.

Kısma ve menfezler olan ana özelliklerine (basınç kaybı ve hacim kaybı) bağlı olarak iki farklı basit direnç türü mevcuttur. Birinci tip basit direnç, Şekilde gösterildiği gibi akış kesitinin genişten dar ve arkadan genişe yavaş bir geçişi kullanılarak akışın yavaşlatıldığı kısmalardır.



Şekil 2.89: Akışkan sönümleme aktif prensibi [105].

Ek sönümleme için bir gaz kelebeğinin enine kesiti genellikle dairesel bir şekle sahiptir ve silindir ile akümülatör arasındaki akışkan yolundaki bir bileşendeki küçük bir delik tarafından sağlanır. Küçük kesit, yüksek kesme kuvvetleri ve basınç kayıpları ile sonuçlanan hidrolik sıvının çok yüksek akış hızlarının üretilmesine yardımcı olur. Bir gaz kelebeğinde basınç kaybının doğrudan hidrolik sıvının viskozitesine bağlı olduğuna da dikkat edilmelidir. Gaz kelebeğindeki basınç kaybı şu şekilde ifade edilebilir:

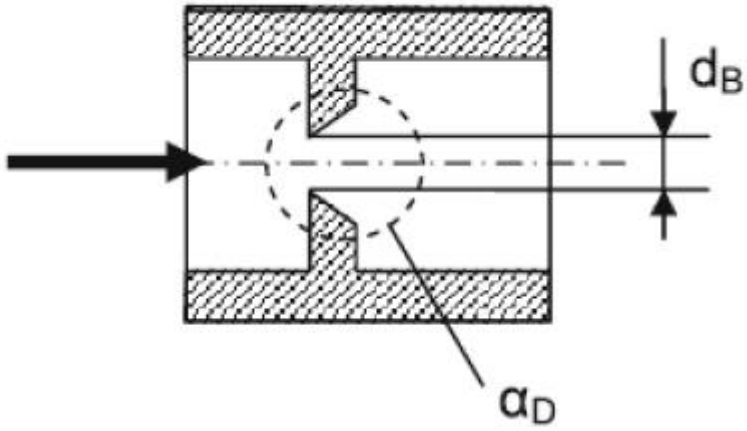
$$\Delta P = \dot{V} v \rho K_D \tag{2.116}$$

K_D, gaz kelebeğinin fiziksel özellikleriyle (boyutlar, geometri) ilgili bir sabittir.

Aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$K_D = \frac{128 l_D}{\pi d_D^4} \tag{2.117}$$

İkinci tip basit direnç, Şekil 2.91'de gösterildiği gibi, sıvı akışının genişten dara veya tam tersi akış yolunda tek veya çoklu ani geçişlere maruz kaldığı deliklerdir.



Şekil 2.90: orifis sıvı direnci.

Hidrolik akışkanın yüksek türbülansı, mekanik enerjinin ısıya dönüştürülmesi için gerekli olan iç akışkan sürtünmesine neden olur. Bu tip direncin bir diğer önemli özelliği, basınç kaybının ikinci dereceden hacim akışına bağlı olmasıdır. Bir menfezdeki basınç kaybı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta P = \dot{V}^2 K_B \tag{2.118}$$

K_B, gaz kelebeğinin geometrisine, boyutuna ve hidrolik sıvı yoğunluğuna bağlı bir sabittir. Bir orifis direnci için K_B şu şekilde hesaplanabilir:

$$K_B = \frac{8\rho}{\alpha_D^2 \pi^2 d_B^4} \tag{2.119}$$

Burada, α_D akış katsayısını temsil eder ve giriş kenarı geometrisine ve Reynolds sayısına bağlıdır.

2.7.5.2. Strok Sonu Sönümlemesi

Süspansiyon sisteminin özelliklerinden biri, giriş tarafından alınan uyarıları izole etmek için sınırlı stroklarının mevcut olmasıdır. Süspansiyon sisteminin üst ve alt tarafları arasındaki yer değiştirme miktarı sistem rijitliğine bağlıdır. Süspansiyon sisteminin yumuşak olması durumunda, izole taraftaki ivme azalması nedeniyle yer değiştirme miktarı çok fazladır. Uyarılar belirli bir büyüklüğe ulaşırsa, gerekli yer değiştirme, süspansiyon sistemi bileşenlerini olumsuz yönde etkileyen mevcut süspansiyon strokunun daha büyük seviyelere yükselir. Bu durum sürüş kalitesinin ve konforunun düşmesine neden olur.

Bu sorunu önlemek için yaygın bir çözüm, süspansiyon yayı ve amortisörü daha rijit hale getirerek yükseltmektir. Bu, en kötü ve en aşırı çalışma koşulları için yeterli süspansiyon darbesi sağlar. Ancak bu yükseltmenin dezavantajlarından biri, normal çalışma koşullarında konfor ve sürüş kalitesinin düşmesidir. Strokun sonunda bir dibe vurma olayının şiddetini sınırlamak için, silindire göre pistonun hızında bir azalma gereklidir. Pistonun son konumlara çok fazla yaklaşması durumunda, ekstra bir yavaşlatma kuvveti uygulamak gerekebilir. Bu, piston son konumlara yaklaştıkça sisteme sabit veya hafifçe artan bir yavaşlama sağlar.

Diğer bir alternatif, strok sonu sönümlemenin etkilerini azaltmak için elastomer elemanların kullanılmasıdır. Bu elastomer elemanlar, piston uç pozisyonlara çarpmadan hemen önce sistemde bir yavaşlama sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Bu konfigürasyon, sistemin çelik elemanları etkilemeden hem küçük hem de aşırı darbelere maruz kalmasını sağlar. Hafif araçlarda, sürücüler bu tür strok sonu sönümlemeyi fark edebilir ve bileşenler aşırı yükten iyi korunur. Elastomer elemanlar, geri tepme aşamasının sonunda orijinal boyutlarına ve şekline geri döner. Enerjinin tamamı dağılmaz, çünkü elastomer malzemede çok az bir miktar kalır ve kayıp açısına neden olur. Elastomer elemanların oturma ve çalışma koşullarından dolayı erken yaşlanma gibi dezavantajlara sahip olduğuna dikkat etmek önemlidir. Bu nedenle ya düzenli sıklıkta ya da durumlarına göre değiştirilmeleri gerekir. Aşırı yüklenmeyi önlemek için sistem tasarımı, aşırı zorlamayı önlemek için stroku sınırlayan mekanik takozlar içerir.

Akış direnci, sırayla silindir bölmesinde bir basınç artışına yol açan bir basınç düşüşü yaratır. Sonuç olarak, süspansiyon sisteminin hareketli parçalarına bir miktar ek sönümleme kuvveti uygulanır. Bazen ekin kesit alanı değişkendir ve silindir strokuna göre değişir. Bu durumda, akış direncinin etkisini piston yer değiştirmeleri temelinde tanımlamak için bir mekanizma gereklidir. Bu tür değişken akış dirençlerinin sabit kesitli olanlara göre avantajı, daha kararlı strok sonu sönümleme kuvveti sağlayabilmeleridir.

2.7.6. Matematiksel Araba Modelleri

Araç dinamiklerini analiz etmek için yıllar içinde çok sayıda matematiksel araç modeli geliştirilmiştir. Bu modeller toplu parametreler kullanır ve koruma ilkesi ve Newton yasaları gibi temel fizik yasalarına dayanır. Bu nedenle toplu parametre modelleri olarak adlandırılırlar ve araç süspansiyon sistemlerinin performanslarını ve özelliklerini değerlendirmek için kullanılabilirler. Yaygın olarak kullanılan üç ana model vardır. Bunlar tam araba modeli (TAM), yarım araba modeli (YAM) ve çeyrek araba modeli (ÇAM) olarak bilinir.

2.7.6.1. Çeyrek Araba Modeli

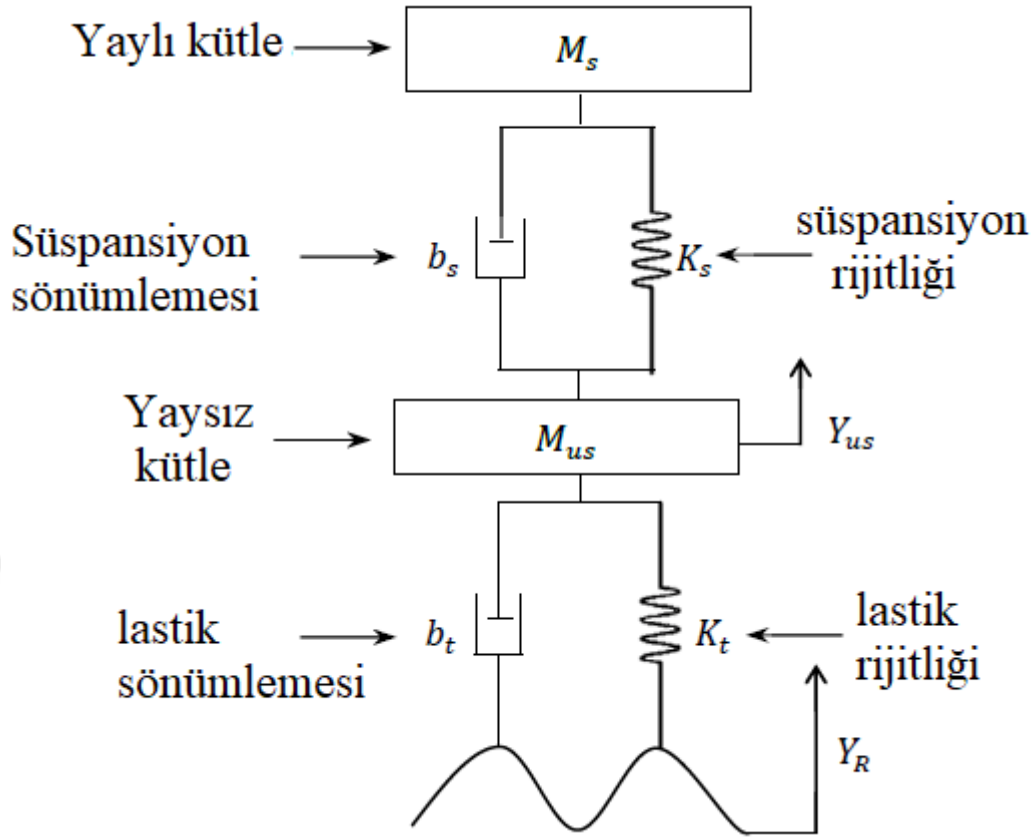
Basitliği sayesinde, araç süspansiyon sistemi analizi için genellikle çeyrek araba modeline öncelik verilir. Gerçekten de, tam araç modelinin en önemli parametrelerini sağlar. Florin et al. [106] araştırma çalışmalarında, durum uzay modeli, transfer fonksiyonu ve MATLAB Simulink ortamında simülasyon olan üç farklı çeyrek araba modeli analizi tekniğini karşılaştırmışlardır. Bu çalışmanın sonuçları, her üç tekniğin de aynı süspansiyon parametresi değerlerini sağladığını ortaya koydu. Araştırma çalışmalarında, Sharma ve ark. [107], MATLAB Simulink ortamında durum-uzay gösterimi yoluyla çeyrek araba modeli için iki serbestlik derecesi tanımladı. 0,1 m'lik adım giriş uyarıları araca sağlandı. Sonuç olarak, yaysız kütlede (%30) ve yaylı kütlede (%80) yüksek bir aşım gözlendi. Elde edilen sonuçlar, sürüş kalitesi ve konfor beklentilerinin altında kaldı. Bu eksiklikleri gidermek için, kabin hareketlerini kabul edilebilir konfor değerleri içinde tutacak bir kontrolör tasarlanmıştır. Vaishnav ve diğerleri tarafından yürütülen önceki çalışmalar. [108], Cramer kuralının yanı sıra transfer fonksiyonunu kullanarak çeyrek araba matematiksel modelinin kurulmasına izin verdi. Jamali ve ark. [109], yol bozulmasına karşı izolasyonlarını değerlendirmek amacıyla elektrikle çalışan bir araba için çeyrek araba modeli geliştirmeye odaklandı. Farklı sönüm katsayılarında yaylı ve yaysız kütlelerin ivme ve yer değiştirme genlikleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Minimum frekans yanıtı Simulink MATLAB programında b_{opt} sönüm sabitinde kaydedilmiştir. b_{opt} ifadesi şuydu:

$$b_{opt} = \sqrt{\frac{K_S M_S}{2}} = \sqrt{\frac{K_{us}+2K_S}{K_{us}}} \tag{2.120}$$

Burada, K_{us}, yaysız kütle rijitlik katsayısıdır,

K_s, yaylı kütlenin rijitlik katsayısıdır,

M_S, yaylı kütledir.



Şekil 2.91: Çeyrek araba modeli (iki serbestlik derecesi).

Hassaan [110], sürüş kalitesi ve konforu korunarak hız tümseğinde çeyrek araba yarım model sürüş davranışlarını gözlemlediği bir çalışma yürütmüştür. Matematiksel modellerin belirlenmesinde durum modeli kullanılmıştır. Daha sonra bu modeller MATLAB üzerinde analiz edilmiştir. Çalışma, sürüş kalitesinin ve konforun korunabilmesi için hız tümsekleri civarında araç hızının 7 km/s'yi geçmemesi gerektiğini ortaya koydu.

Gao et al. [111] çeyrek araba modeli parametrelerinin rastgeleliğinin dinamik analiz üzerindeki etkisi üzerine bir araştırma çalışması yürütmüştür. Çalışma, mod şekillerinin rastgeleliğinin hiçbir şekilde lastik rijitliğine bağlı olmadığını ortaya koydu. Bununla birlikte, yaysız ve yaylı kütlelerin değerine bağlıdır. Birinci doğal frekansın belirsizlik yaylı kütleden etkilenirken, ikinci doğal frekansın belirsizlik yaysız kütle sisteminden etkilendiğini belirtmek de önemlidir.

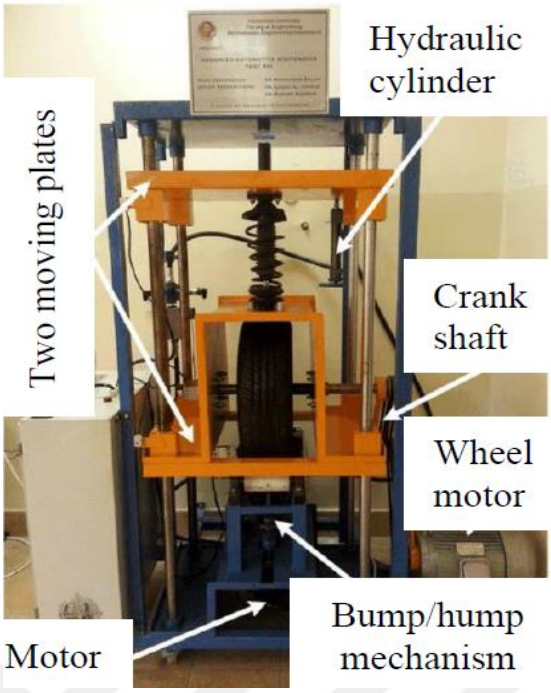
Prabhakar ve Arunachalam [112], rijitlik ve sönüm katsayılarını değiştirerek çeyrek araba modelinde pasif süspansiyon sistemleri üzerinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ardından, bu değiştirilmiş pasiflerin performansları. Optimum araç kullanımı ve sürüş konforu için

kaydedilen parametreler, yaylı sönümleme için 1500 N.s/m ve rijitlik katsayıları için 13 kN/m olarak bulunmuştur.

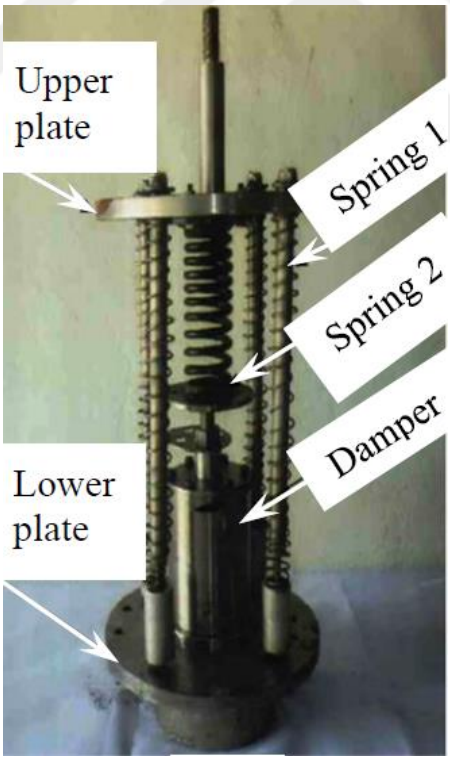
Deneylerin yapılabilmesi için iki hareketli plaka yaya ve amortisöre bağlanarak çeyrek araba modelleri tasarlanabilir. İki hareketli plaka, yaysız ve yaylı kütleleri temsil eder. Deneysel modeller arasındaki en büyük fark, bazı modellerde gerçek araba lastikleri ile ikame edilen yaysız kütlenin doğasında yatmaktadır. Değişken bir diğer önemli faktör, uyarma giriş kuvvetinin yoğunluğudur.

Bir yanda gerçek araba lastikleri olan deneysel modeller var. Salah [113] çeyrek araba modelini incelemek için bir deney yaptı. Tasarımı, Şekil 2.93'te gösterildiği gibi, aralarında amortisörler bulunan hareketli bir plakaya bağlanan gerçek lastikten oluşuyordu. Burulmayı minimum seviyede tutmak için kılavuz olarak tasarıma dört adet paslanmaz çelik çubuk eklendi. Yaylı kütlenin çeyreği hareketli plaka ile temsil edilirken yay ve amortisör amortisörler ile temsil edilir. Modeli gerçek bir lastikle birleştirmenin avantajı, çok gerçekçi sonuçların elde edilmesidir. Tasarlanan modelin maksimum kapasitesi 300 kg ve 162 km/s motor hızına dayanabiliyor.

Öte yandan, zamanla yaysız kütle olarak hareketli bir plaka ile birkaç deneysel model geliştirilmiştir. Örneğin, Jugulkar ve ark. [114], modellerini eşit rijitlikte (3.33 N/mm) dört yaya ve ayarlanabilir sönümleyicilere bağlı iki hareketli plaka kullanarak oluşturmuştur. Şekil 2.93 yayların paralel bağlandığını göstermektedir. 32.77 N/mm rijitlikte ek bir yay, plakanın merkezinde seri olarak amortisöre bağlanmıştır. Kılavuzluk ve sürtünmeyi azaltmak için makaralı rulmanlı bir merkezi çubuk uygulandı. Uyarma girişi bir elektrik motoru tarafından sağlandı. Motorun dönme hareketini sistemin lineer hareketine dönüştürmek için kuruluma bir Scotch Yoke mekanizması dahil edildi.



Şekil 2.92: Yaysız kütle olarak gerçek lastikli çeyrek araba modelinin deneysel modeli [113].



Şekil 2.93: Yaysız kütle olarak hareketli plakalı çeyrek araba modelinin deneysel modeli [114].

2.7.6.2. Yarım Araba Modeli

Yarım araba modeli, 2 lastik içeren dört serbestlik dereceli bir modeldir. Lastiklerden biri ön dingilden diğeri ise arka dingilden. Bu modelde, arabanın boyuna eksenine göre simetrisi hakkında bir varsayım yapılır. Yarım araba modeli Şekil 2.95'te gösterilmektedir. Bu modellerde kullanılan ağırlık merkezi, yay ve amortisör özellikleri gibi parametreler gerçek otomobillerinkilerle örtüşmektedir. Patel ve ark. [115] MATLAB Simulink'te yarım araba modelini kullanarak çeşitli hızlarda yol profilini değerlendirmek için bir algoritma geliştirilmiştir. Modelin uyarılması için bir giriş yol profili kullanılmış ve bu giriş yol profili ile farklı hızlarda ölçülenler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. MATLAB Simulink'teki simülasyonun sonuçları, zaman, mesafe ve frekans alanında girdi ile ölçülen yol profili arasındaki uyumu gösterdi. Gao et al. [116] araştırma çalışmalarında arabaların doğal frekansının belirsizliğinin araba parametrelerinin belirsizliğine bağlı olduğunu göstermiştir. İlk iki doğal frekans, arka ve ön aks arasındaki mesafeye bağlıdır. Üçüncü ve dördüncü doğal frekans, ön ve arka yaysız kütlelere (lastiklere) bağlıdır.

Şekil

(1) Yaylı kütle

(2) Yaysız ön kütle.

(3) Arka yaysız kütle.

(4) Ön süspansiyon rijitliği.

(5) Arka süspansiyon rijitliği.

(6) Ön lastik rijitliği.

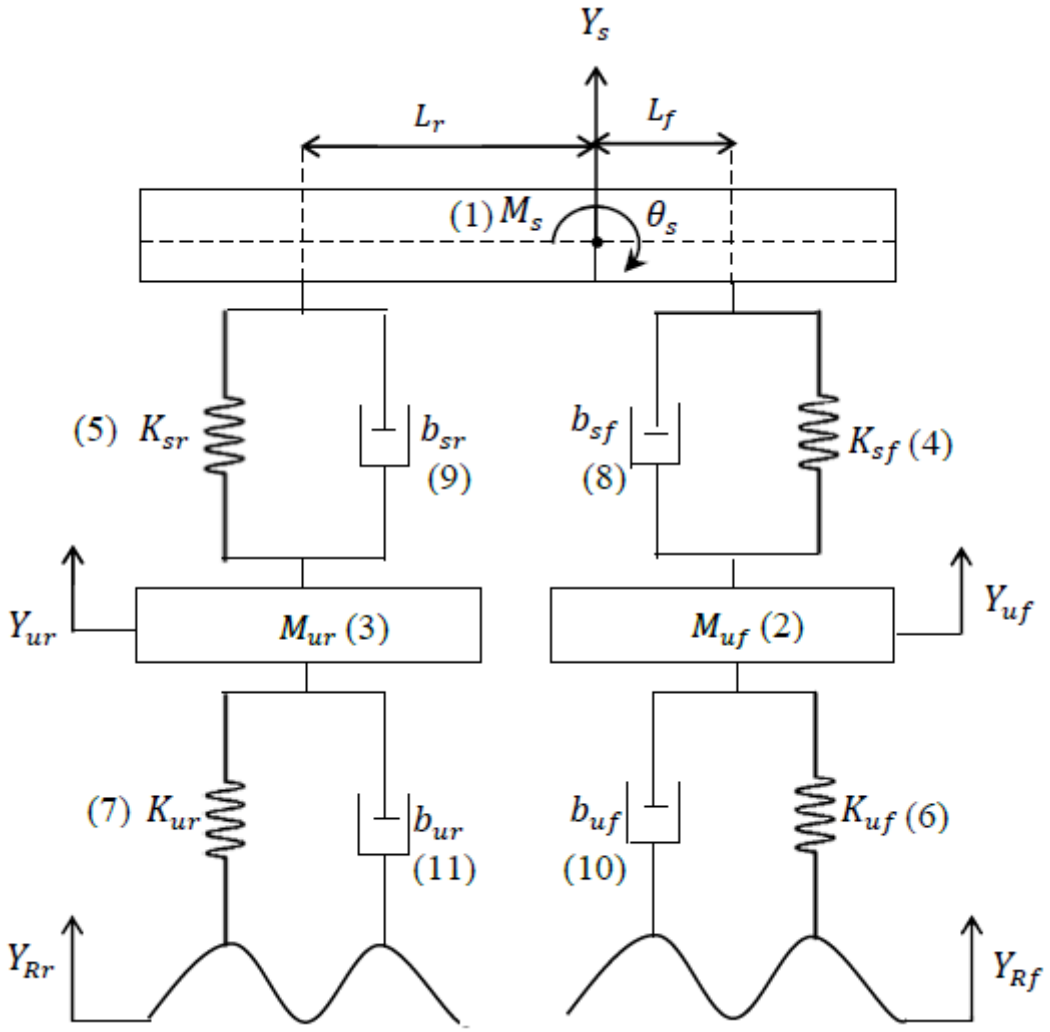
(7) Arka lastik rijitliği.

(8) Ön süspansiyon sönümlemesi.

(9) Arka süspansiyon sönümlemesi.

(10) Ön lastik sönümlemesi.

(11) Arka lastik sönümlemesi.

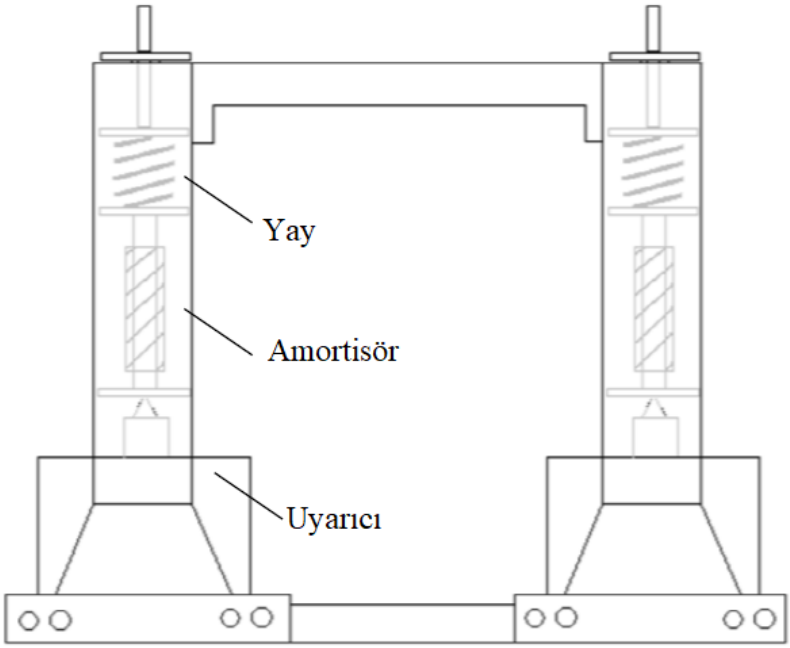


Şekil 2.94: Yarım araba modeli (dört serbestlik derecesi).

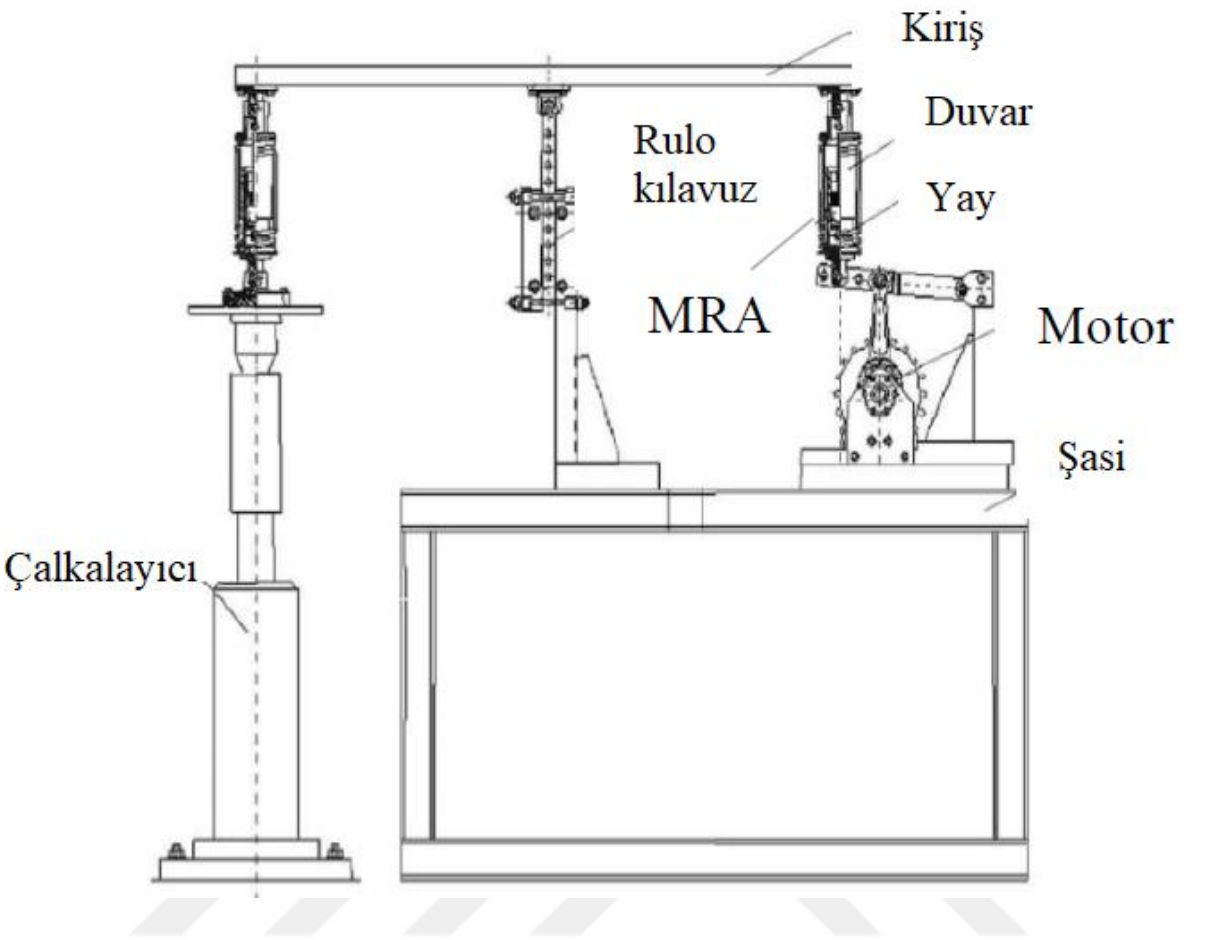
Daha önceki çalışmalarda çeyrek ve yarım araba modelleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Optimum sönüm katsayısı değerlerini bulmak için Faheem et al. [117] hem çeyrek hem de yarım araba modellerinin yer değiştirme ve frekans tepkilerini analiz etmek için bir çalışma yürütmüştür. Bu analizlerin sonuçları, optimum sürüş kalitesi ve konforu için her iki model için de sönümleme katsayısının 3000 N.s/m'yi geçmemesi gerektiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, Mehmood ve ark. [118], Laplace dönüşümünün yanı sıra MATLAB programında durum uzayı temsilini kullanarak çeyrek buçuk araba modelinin dinamiklerini analiz etti. Maksimum sürüş kalitesi ve konfor için optimum sönümleme katsayısı değerleri kaydedildi. Çeyrek araba modeli (2 serbestlik derecesi) için 3000 ile 4000 N.s/m arasında bir optimum sönümleme aralığı belirlendi. Bununla birlikte, yarım araba modeli, 1500 N.s/m ila 2000 N.s/m arasında bir optimum sönümleme aralığı sergiledi.

Deneysel yarım araba modellerini tasarlamak için önceki çalışmalar yapıldı. Simülasyonların sonuçlarını deneysel olanlarla doğrulamak için Chavan ve Sawant [119] bir kiriş ile birbirine bağlanan iki süspansiyon setinden oluşan bir deney düzeneği tasarlamıştır. Şekil 2.96'da gösterildiği gibi, her süspansiyon bir yay ve amortisörden oluşur. Giriş uyarımı, her süspansiyona eksantrik bir kam ile sağlanır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, süspansiyon sisteminin doğrusal olmama durumu dikkate alınarak çeşitli frekanslarda simülasyon sonuçları ile birleştirilmiştir.

Şekil 2.97, Sapiński ve Martynowicz [120] tarafından sıçrama ve yunuslama hareketlerini dikkate alarak titreşim kontrolünü analiz etmek için geliştirilen deneysel bir yarım araba modelinin tasarımını göstermektedir. Tasarımları, yay ve manyetoreolojik amortisörlerden (MRA) yapılmış iki özdeş süspansiyon sisteminden oluşuyordu. Yarı yaylı kütleyi temsil eden ağırlığa sahip çelik bir çerçeve, her iki süspansiyonu da birbirine bağlar. Bunlardan birine giriş uyarımı elektrohidrolik silindir sarsıcı, diğerini ise kam krank mekanizmasına bağlı elektrik motoru uyartı. Kılavuz ve dengeleyici rolünü oynamak için tasarıma merkezi bir silindir eklendi. Çalışmanın sonuçları, uygun bir manyetoreolojik amortisörün (MRA) kullanılmasının, yer değiştirme ve ivme genliklerini azaltarak titreşimleri en aza indirmeye izin verdiğini ortaya koydu.



Şekil 2.95: Bir kirişle birbirine bağlanan iki süspansiyonlu yarım araba modelinin deneysel kurulumu [119].

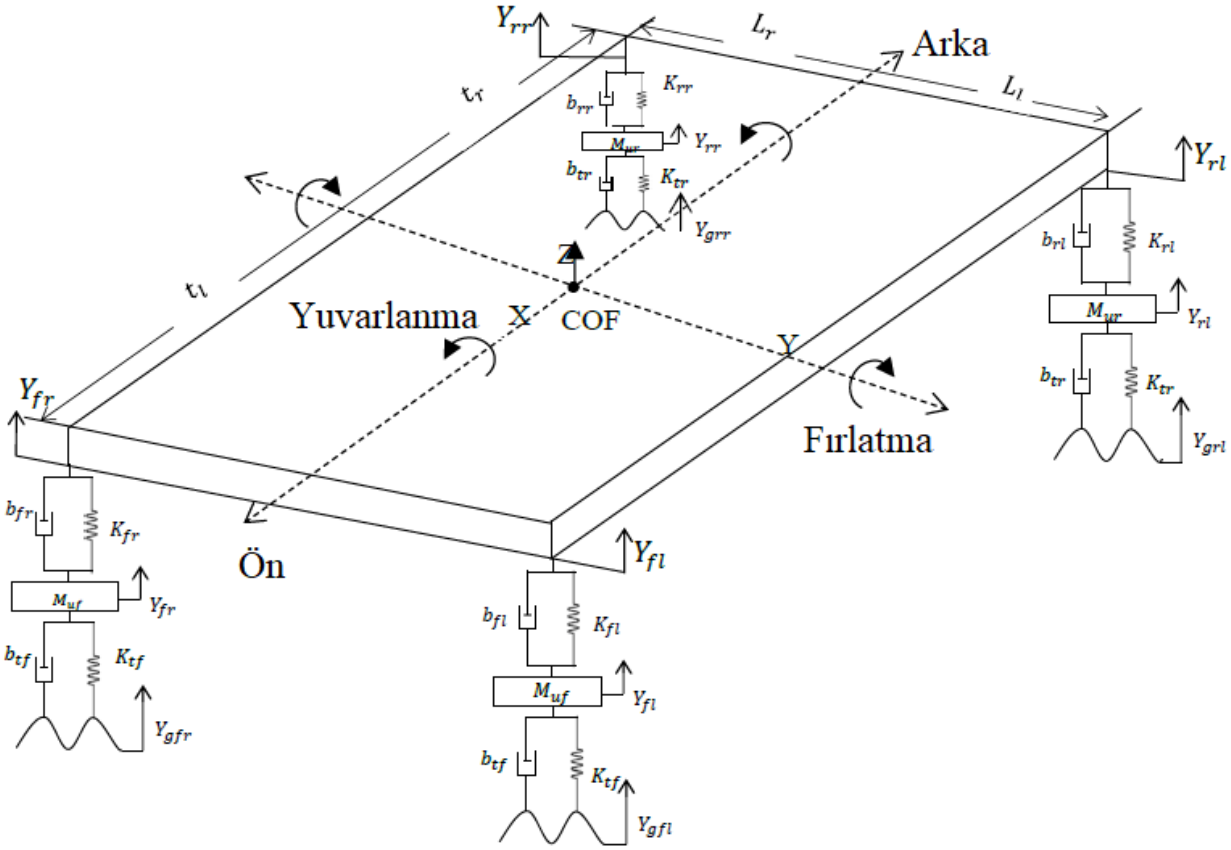


Şekil 2.96: MRA'lar ve çelik çerçeveli yarım araba modelinin deneysel kurulumu [120].

2.7.6.3. Tam Araba Modeli

Tam araba modeli, yuvarlanma hareketi nedeniyle yedi serbestlik derecesine sahiptir. Tipik bir tam araba modeli, şekil 2.98'de gösterildiği gibi çubuklarla birbirine bağlanan dört özdeş çeyrek araba modelinden yapılır. Yedi serbestlik derecesi, yaysız her bir kütlenin dört dikey hareketi, araba gövdesinin yuvarlanma, yunuslama ve sıçrama hareketleridir.

Tam araba modelleri genellikle araba sürüş kalitesi, konfor, yol tutuşu ve diğer performansları kapsamlı bir şekilde analiz etmek ve incelemek için kullanılır. Operatör veya yolcunun tümsek üzerindeki hız, süspansiyonun seyahat mesafesi gibi sürüş konforunu ve kalitesini incelemek için, dikey hızlanmanın ortalama karesi (RMS) ve yol tutuşu dikkate alınmalıdır. Tablo 2.11 [121]'de sunulan dikey ivme RMS'nin uluslararası standartlaştırılmış ölçütleri vardır.



Şekil 2.97: Tam araba modeli (yedi serbestlik derecesi).

Tablo 2.11: Sürüş kalitesi kriterleri [121].

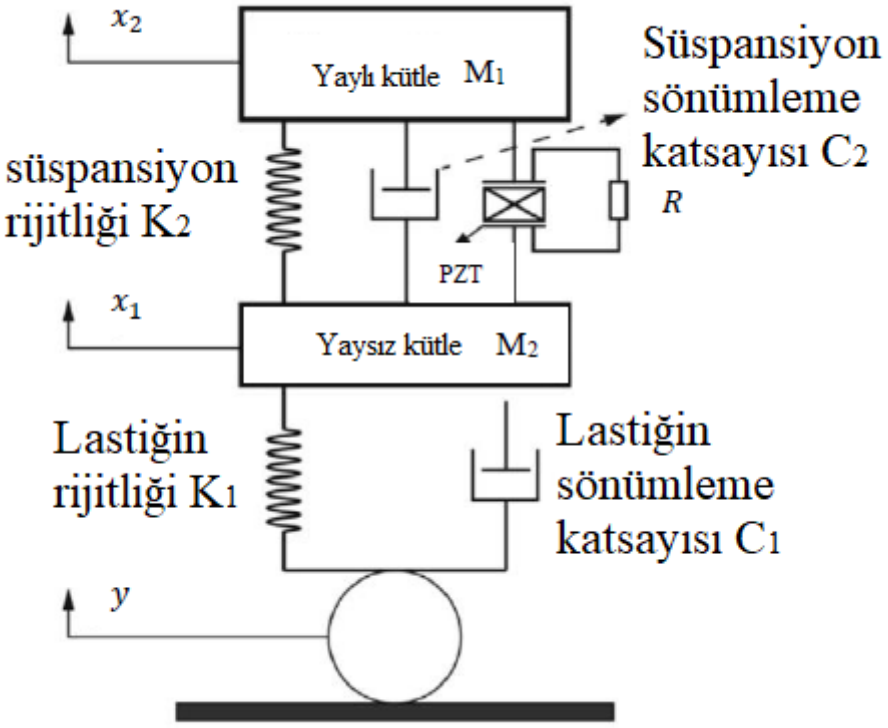
Dikey ivmenin ağırlıklı RMS'si (m/s^2)	**kabul edilebilirlik**
>0.315	rahatsız değil
0.315-0.63	biraz rahatsız
0.5-1	oldukça rahatsız
0.8-1.6	Rahatsız
1.25-2.5	Çok rahatsız
<2	Son derece rahatsız

Hiçbir laboratuvarda hiçbir deneysel tam araba modeli tasarlanmamıştır. Bu nedenle, tam ve yarım araba modellerini kullanan enerji toplama sistemleri üzerine çok az sayıda çalışma, genellikle deneysel kurulumları yaygın olarak bulunan çeyrek araba modeli ile karşılaştırılır. Mahala et al. [122] simülasyon tekniklerini kullanarak çeyrek, yarım ve çeyrek araba modelinin tepkilerini değerlendirmek için bir araştırma çalışması yürütmüştür. Çalışmanın sonuçları, serbestlik derecesi sayısının arttırılmasının simülasyon süresini artırdığı ve analiz sonuçlarının doğruluğunu iyileştirdiğiydi.

Iyer et al. [123], maksimum sürüş kalitesi ve konforu sağlamak için süspansiyon yay ve amortisör katsayısının optimum değerlerini belirlemek için tam bir araba modeli üzerinde bir çalışma yapmıştır. Bu analizlerin sonuçları, 8300 N/m'lik optimum rijitlik katsayısının ve 700 N.s/m'lik sönümleme katsayısının, maksimum sürüş kalitesi ve araç kullanımı elde etmek için optimum parametreler olduğunu ortaya koydu. Dahası; Mitra ve diğerleri [124] tarafından tam araba modeli üzerinde yürütülen bir araştırma çalışmasında, optimum sürüş kalitesi ve konforu için parametrelerin bazı özel değerleri kaydedilmiştir. Bir hız tümseğinden geçerken araç hızı 10 km/s'yi, minimum süspansiyon hareketi 0,127 m'yi ve yol ile lastikler arasındaki bağıl mesafe için yaklaşık 0.0508 m'yi geçmemelidir. Raju ve Venkatachalam [125] tarafından gerçekleştirilen bir analizde, çeşitli bozuklukların süspansiyon sistemi üzerindeki etkisini gözlemlemek ve incelemek için tam araba modelinin hareket denklemi türetilmiştir. Sağ ön tekerlek, önce impuls bozukluklarına, ardından nabız bozukluklarına maruz kaldı. Darbe girişi durumunda, maksimum salınımlar, arka aksın çok az etkisi ile ön aksı etkiledi. Darbe bozukluklarına maruz kaldığında ön aks maksimum salınımlarının, darbe bozukluklarınınkinden çok daha yüksek olduğu bulundu.

2.8. SÜSPANSİYON ENERJİ TOPLAMA

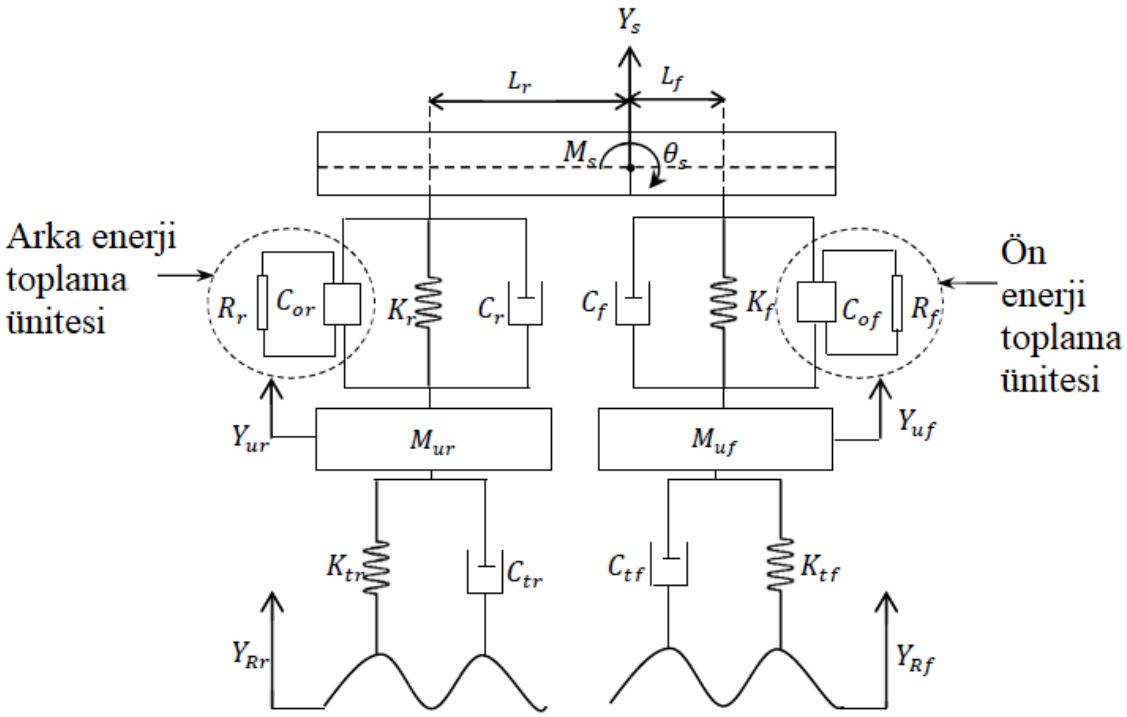
Süspansiyon sisteminde ısı yoluyla büyük miktarda enerji kaybedilir. Çok sayıda enerji toplama mekanizması kullanılarak dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir. Piezoelektrik malzeme, yaylar, amortisörler ve hatta lastikler gibi çeşitli bileşenlerde süspansiyon sistemleriyle birleştirilebilir. Xiao et al. [126] piezoelektrik enerji hasadı üzerine hem teorik hem de deneysel çalışmalar yürütmüştür. Şekil 2.99, yayların ve piezoelektrik yığınlarının paralel olarak bağlandığı tasarlanmış çeyrek araba modelini göstermektedir.



Şekil 2.98: Paralel bağlı piezoelektrik malzeme ile tasarlanmış çeyrek araba modellenmiştir [126].

Simülasyonda, iki serbestlik dereceli model (çeyrek araba modeli), 9.8 m/s^2 (1 g) genliğe sahip sinüzoidal bir girdi kullanılarak uyarıldı. Piezoelektrik elemanlardan elde edilen maksimum kaydedilen güç ve voltaj sırasıyla 2,84 W ve 274,62 V idi. Çıkış gücünü ve voltajını etkileyen ana parametreler, sönümleme katsayıları, lastik ve süspansiyon rijitliğiydi. Deneysel çalışma sonuçları teorik olanın sonuçlarını doğruladı. Deney düzeneğine 1.5 m/s^2 genlikli bir sinüs dalgası uygulandı. Zuo ve Zhang [127] tarafından yürütülen bir başka araştırma çalışmasında, potansiyel toplanabşilir gücün 46 ila 7500 W aralığında olduğu bildirilmiştir.

Yarım araba modelini de kullanan araç süspansiyon sistemlerinin enerji toplama potansiyeli üzerinde daha önce çalışmalar yapılmıştır. Al-Yafeai et al. [128], Şekil 2.100'de gösterildiği gibi hem ön hem de arka süspansiyonlara paralel bağlanmış piezoelektrik malzemelerle bir yarım araba modelini modellemiştir.



Şekil 2.99: Paralel bağlı piezoelektrik elemanlara sahip yarım araba modeli [128].

Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, çeyrek araba modelinden toplanan güç ve voltajın, yarım araba modelinden toplananlere göre daha düşük olduğunu ortaya koydu. Yarım araba modelinden elde edilen güç ve voltaj sırasıyla %57 ve %77 daha yüksekti. Bununla birlikte, hem çeyrek hem de yarım araba modelleri için piezoelektrik malzeme k_p'nin rijitliği dikkate alınmadan hesaplamalar yapılmıştır. Piezoelektrik rijitlik dikkate alınırsa, toplanan güç ve voltaj büyük ölçüde etkilenecektir. Piezoelektrik malzemeler süspansiyon sistemlerine bağlanırken 6250 kN/m'lik eşdeğer bir piezoelektrik rijitlik katsayısı varsayılmıştır. Çeyrek araba modelinin genel sistem rijitlik katsayısı aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanmıştır:

$$K_{eq} = K_s + K_p \tag{2.121}$$

Burada, K_{eq}, eşdeğer rijitlik katsayısıdır

K_s, süspansiyonun rijitlik katsayısıdır,

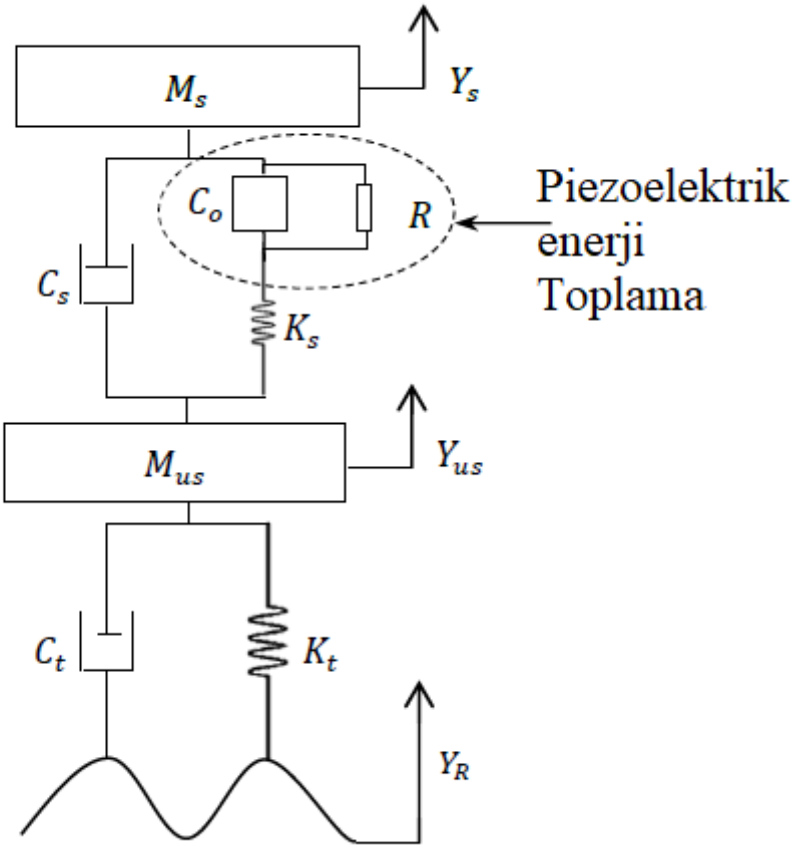
K_p, piezo elektrik malzemesinin rijitlik katsayısıdır.

Piezoelektrik malzeme rijitliği hesaba katıldığında, genel rijitlik artar. Nitekim sistemin rijitlik katsayısı arttığında daha az deformasyona uğrar. Bu nedenle sistemin rijitliği arttıkça toplanan voltaj ve güç azalır.

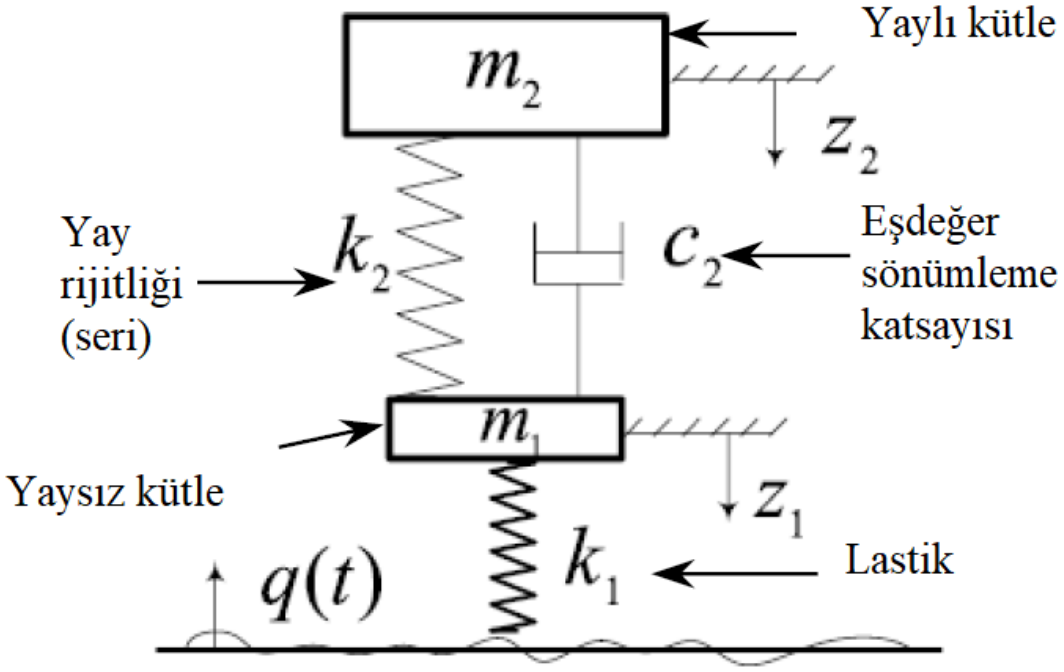
Piezoelektrik malzeme Şekil 2.101'de gösterildiği gibi seri olarak bağlandığında, piezoelektrik malzemenin rijitliği toplanan voltajı veya gücü etkilemez çünkü toplam eşdeğer rijitlik katsayısı aşağıdaki ilişki ile açıklandığı gibi süspansiyon rijitliğine yaklaşık olarak eşittir:

$$K_{eq} = \frac{K_s + K_{piezo}}{K_s \times K_{piezo}} \approx K_s \qquad (2.122)$$

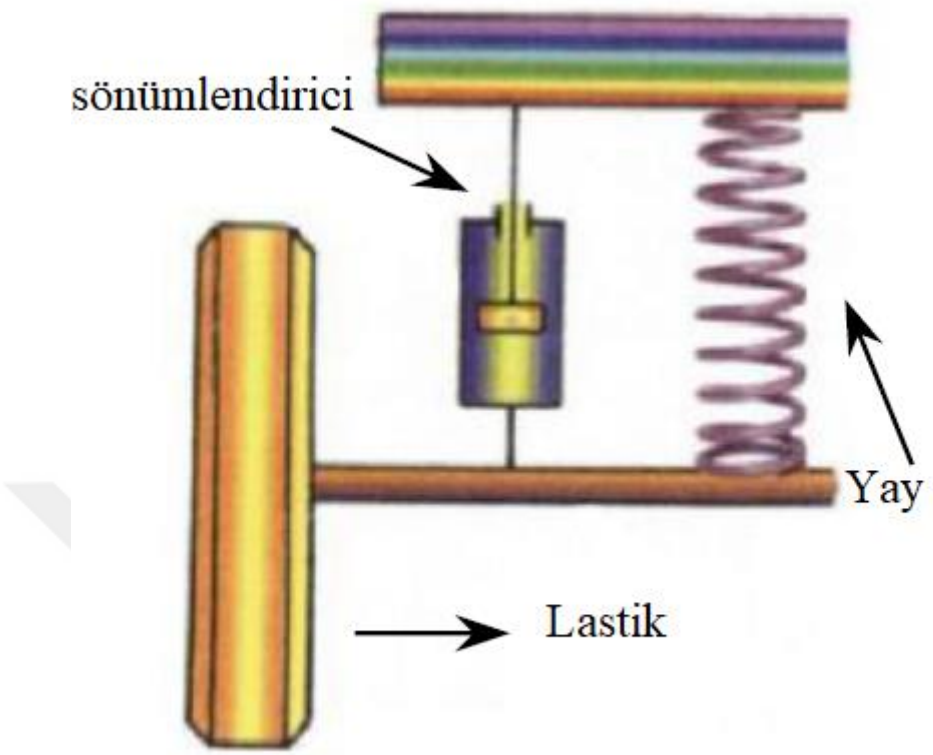
Araç lastiklerinin deformasyonundan enerji hasadı konusunda bazı araştırmalar yapılmıştır. Araç lastiklerinin deformasyonu elektrik üretecek olan piezoelektrik malzemenin gerilmesine yol açacaktır. Xie ve Wang [28], Şekil 2.102 ve Şekil 2.103'te gösterildiği gibi bir çift kütleli piezoelektrik toplama makinesini çeyrek araba modeliyle birleştirdi. Piezoelektrik toplama sistemi esas olarak 1,5 cm genişlik ve 10 cm yükseklik boyutlarında kurşun zirkonat titanat PZT4 çubuktan yapılmıştır. Model, çok düzgün yoldan çok bozuk yola kadar değişen üç farklı yol profili ile rastgele bozuk yol uyarılarına maruz bırakılmıştır. Yineleme yöntemi uygulanarak ve sisteme dörtten fazla özdeş piezoelektrik çubuk takılarak, 35 m/s'lik bir araba hızında D yol profilinden maksimum 738 W güç değeri elde edilebilir. Çubukların yüksekliği ve genişliği sırasıyla 10 cm ve 1.5 cm'dir. Araba hızı ve piezoelektrik çubuk genişliği gibi parametreler, toplanan güç ve voltaj üzerinde büyük bir etkiye sahipti.



Şekil 2.100: Seri bağlı piezoelektrik malzeme ile tasarlanmış çeyrek araba modellenmiştir.



Şekil 2.101: Bir lastiğe monte edilmiş çift kütleli piezoelektrik enerji toplama sistemi.



Şekil 2.102: Araba lastiği piezoelektrik enerji toplama sisteminin çeyrek araba modeli.

Ayrıca, Zhao ve ark. [129] süspansiyon sistemine uygulanan bir piezoelektrik toplama makinesini modelledi. Model rastgele ve darbeli uyarmalara maruz bırakıldı. 30 km/s'lik bir araba hızında, rastgele ve darbe uyarımı için sırasıyla 18.83 ve 102.24 W'lık toplanmış güç değerleri kaydedildi. Sonuçlar, toplanan güç değerinin esas olarak araç hızı ve piezoelektrik malzeme kesit alanı gibi parametrelerden etkilendiğiydi.

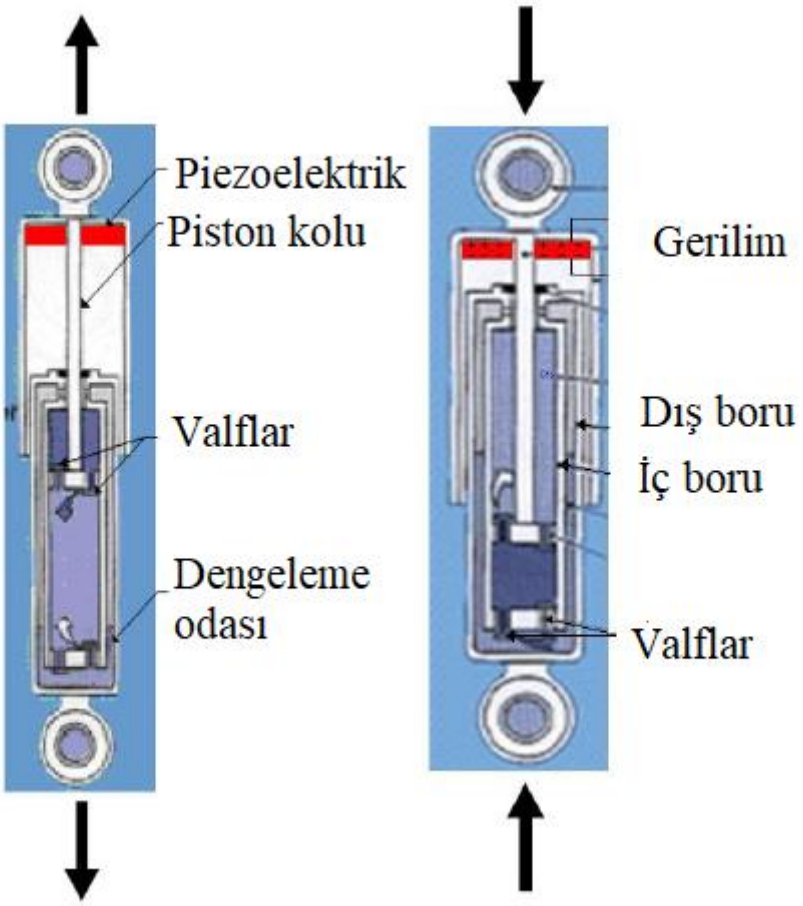
Behera [119] araştırma çalışmasında, lastiğin iç yüzeyinde seri halinde üç kurşun zirkonat titanat PZT5A piezoelektrik malzemeyi birleştirdi. 40 km/s'lik bir araba hızında, model 14 mW'lık bir güç sağlayabilir. Ayrıca Lafarge ve ark. [131], üzerinde PZT 27 tipi bir kurşun zirkonat titanat piezoelektrik konsol kirişin bulunduğu süspansiyon tekerlekleri üzerinde bir analiz gerçekleştirdi. Simülasyonda, çeyrek araba modeli, farklı yük dirençleriyle ilk doğal frekansa uyarlandı. 222 kΩ ve 22 kΩ'luk iki direnç kullanılarak toplanan güç, sırasıyla 1.4 mW ve 1 mW idi. Daha sonra gerçek bir vaka çalışması yapmak için piezoelektrik ışın yaysız kütleye gömüldü. 10 km/s'lik bir araba hızında, toplanan güç 0,001 mW ile 0,021 mW arasında değişiyordu. Araç hızı 30 km/saate çıkarıldığında menzil 0,01 mW ve 0,07 mW'a taşındı.

Piezoelektrik enerji toplama sistemi, lastiğin merkezine de yerleştirilebilir. Lastiğin dönme hareketi sisteme bir miktar enerji sağlar. Toplanan güç miktarını optimize etmek için, piezoelektrik enerji toplayıcının doğal frekansı ile lastik devirlerinin frekansını eşleştirmek gerekir. Hu et al. [132] 30 m/s^2 hızlanma ve 12 mm hareket mesafesi için 1,5 cm x 0,5 cm boyutlarında bir nano jeneratör kullanılarak 1,5 V'luk bir çıkış voltajının elde edilebileceğini belirtmiştir. Nanojeneratörün rolü, piezoelektrik film bükücü kullanarak lastik dönme mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektir. Deneysel model, denklemi basitleştirmek için gerçek lastik yerine bir bisiklet lastiği kullandı. Toplanan güç, çeşitli amaçlar için bir pil veya kapasitörde saklanabilir. Analiz, araba hızı ve seyahat mesafesi gibi parametrelerin çıkış voltajını ve gücünü büyük ölçüde etkilediğini ortaya koydu.

Zhang et al. [133] bir seramik piezoelektrik toplama makinesini tek biçimli bir konsol kirişi olarak basitleştirdi ve onu dönen araba lastiğinin merkezine yerleştirdi. Deneysel analizler 7 cm x 1.5 cm x 1.5 cm boyutlarında bir piezoelektrik tabaka üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde uyarımlar, frekansı 0 – 2000 Hz arasında değişen bir çalkalayıcı tarafından sağlanmıştır. Yaklaşık 0.032 mW'lık bir güç, 252 kΩ'luk bir direnç kullanılarak model tarafından toplandı. Test, 10 km/saat, 20 km/saat, 30 km/saat ve 40 km/saat'lik farklı araç hızlarında gerçekleştirildi. Çalışma, araba hızı arttıkça toplanan gücün arttığını ortaya koydu. Yine de sisteme stokastik bir rezonans girişi sağlandığında en yüksek ortalama güç 20 km/h araba hızında elde edilmiştir.

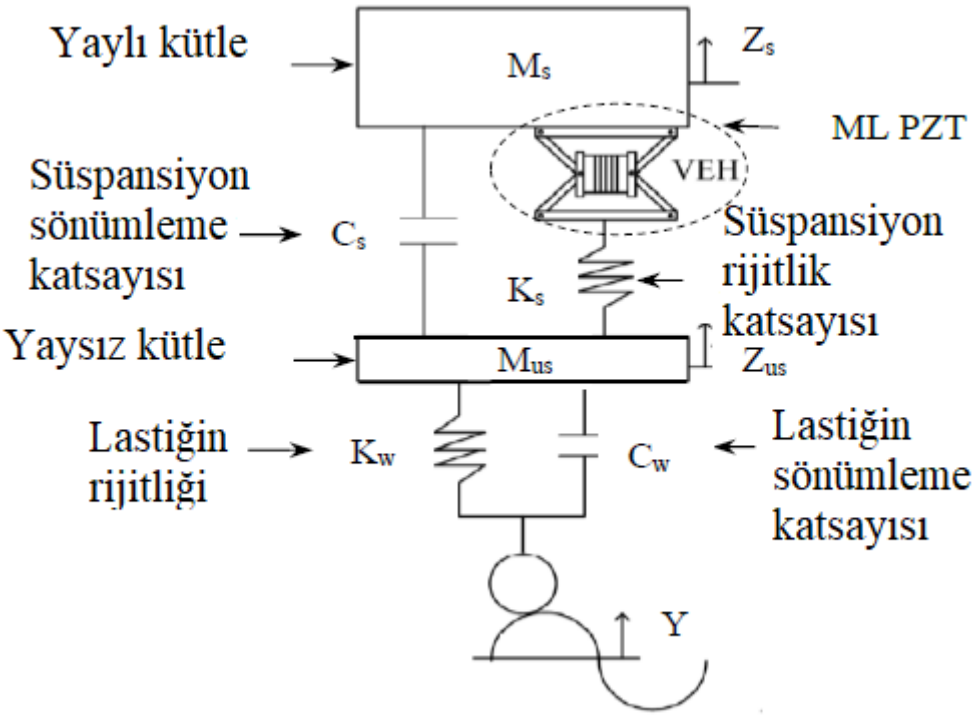
Makki ve Pop-Iliev [134] analizlerini üç farklı piezoelektrik malzeme ile gerçekleştirmiştir. Bunlar PVDF ince levha, lastik boncuğu üzerinde PVDF şerit ve lastiğin iç yüzeyine yerleştirilmiş PZT unimorph'tur. Çalışmanın sonuçları, iç lastik yüzeyine takılan PZT'nin 8 km/s hızda en büyük toplanan güç değerini (4,6 mW) sağladığını ortaya çıkardı. Ayrıca PZT, PVDF ile karşılaştırıldığında ucuzdur ve ısıya karşı yüksek direnç gösterir. Apollo projesi [135] tarafından, araç lastiğinin iç yüzeyine yerleştirilmiş 8 cm x 8 cm boyutlarında bir piezoelektrik PVDF film ile bir enerji toplama modeli tasarlandı. Model, 80 km/s'lik bir araba hızında 0,9 mW'lık bir güç üretebilir. Çalışmanın bulguları ışığında, elde edilen gücün lineer olarak araba hızına, PVDF film alanına ve tekerlek yüküne bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Piezoelektrik malzeme, araba süspansiyon sistemleri için amortisör olarak şekillendirilebilir. Örneğin. Ali ve Adhhikari [136] elektrik devresine akuple edilmiş tek serbestlik dereceli piezoelektrik amortisörü, elektrik direnci ve kapasitanstan yapılmış yapmışlardır. Çalışmada kullanılan uyarım, sabit frekanslı sinüzoidal dalga girişidir. Madhav ve Ali [137] benzer bir model

tasarladılar ancak bunun yerine onu rastgele girdi uyarımına maruz bıraktılar. Lee et al. [138] iki piezoelektrik katmandan oluşan bir rejeneratif amortisör tasarladı. Süspansiyon titreşimlere maruz kaldığında elektrik enerjisi üretildi. Arizti [139] amortisör olarak çok katmanlı bir piezoelektrik yığın kullanmıştır. Piezoelektrik malzeme, Şekil 2.104'te gösterildiği gibi pistonun üstüne yerleştirildi. Araba bir tümsek üzerinden geçerken sistemden toplanan voltaj 17.69 mV idi.



Şekil 2.103: Amortisörün içine yerleştirilmiş çok katmanlı piezoelektrik yığın [139].

Ayrıca Hendrowati ve ark. [140], çeyrek araba modellerinde, süspansiyon yayı ile seri olarak bağlanmış 15 katmandan oluşan çok katmanlı (ML PZT VEH) bir piezoelektrik yığın kullanmıştır (Şekil 2.105). Mekanizmanın amacı, piezoelektrik yığına uygulanan yay kuvvetini arttırmak için süspansiyon sisteminin dikey titreşimlerini yatay yer değiştirmeye dönüştürmekti. Bu model, doğrudan kurulum konfigürasyonundan 7,17 kat daha yüksek bir toplanan güç değerine ulaşılmasına izin verdi. Hesaplamalar için piezoelektrik yığının rijitlik katsayısı dikkate alınmıştır.



Şekil 2.104: Yay [140] ile seri olarak bağlanmış çok katmanlı (ML PZT VEH) piezoelektrik yığınlı çeyrek araba modeli.

Ana piezolekrik enerji hasadının bir karşılaştırması Tablo 2.12'de özetlenmiştir.

Tablo 2.12: Ana piezolekrik enerji toplama sistemlerinin karşılaştırılması.

Piezoelektrik malzeme ve konumu	**Araba modeli**	**Uyarma, hız, yol girişi, hızlanma, frekans**	**Güç yoğunluğu, toplanan güç/gerilim**
Süspansiyon tekerleklerinde PZT 4 plaka	Çeyrek araba modeli	35 km/s, rastgele bozuk yol sınıfları B, C ve D	NA
Süspansiyonlu tekerleklerde PZT 4	Çeyrek araba modeli	30 km/s, B sınıfı rastgele yol	NA
iki PZT 27 katman	Çeyrek araba modeli	Rastgele bozuk yol, simülasyon (30 km/sa), deney (91 Hz; 10 km/sa ve 30 km/sa)	Simülasyon (2V; 0.02W), Deney (13V; 1.4mW)
Süspansiyon yaylarına paralel bağlı PZT	Çeyrek araba modeli	Harmonik, 1.45 Hz	274.62 V; 2.48 W
Süspansiyon yaylarına paralel bağlı PZT	Yarım araba modeli	Harmonik, 1.45 Hz	486 V; 3.9 W
Lastiğin iç yüzeyinde piezoelektrik filmler bükücü	N/A	30 m/s^2	1.5 V; 70 µW/cm2
PVDF iç lastik yüzeyinde	N/A	80 km/ saate	0.9 mW

Lastiğin merkezinde ultra ince tek biçimli seramik piezoelektrik konsol	N/A	Rastgele yol gürültüsü, deney (6Hz), gerçek test (20km/s)	Deney (0.032 mW), gerçek araba testi (0.017 mW)
32 PZT-5A, iç lastiklerin çevresinde üç şerit halinde düzenlenmiştir.	N/A	40 km/h	14 mW
Amortisörde iki paralel PZT 4 kaplama	1 serbestlik derecesi	10 Hz	20 V; 1.2 mW
Amortisöre takılı piezoelektrik yığın	Çeyrek araba modeli	sinüzoidal uyarma	6.5 (normalleştirilmiş güç)
Piezoelectric stack installed in the shock absorber	Çeyrek araba modeli	rastgele uyarma	2.4 (normalleştirilmiş güç)
Amortisöre takılı piezoelektrik yığın	Çeyrek araba modeli	30 km/saate	6 mW (mod d33) ; 3 mW (mod d31)
Amortisöre yerleştirilmiş PZT yığını	N/A	N/A	17.69 mV
Amortisörde bulunan PZT yığını	Çeyrek araba modeli	Harmonic excitation, 43.2 km/ saate	6.23V; 1.6 mW

2.9. LASTİK BASINÇ GÖZETİM SİSTEMİ

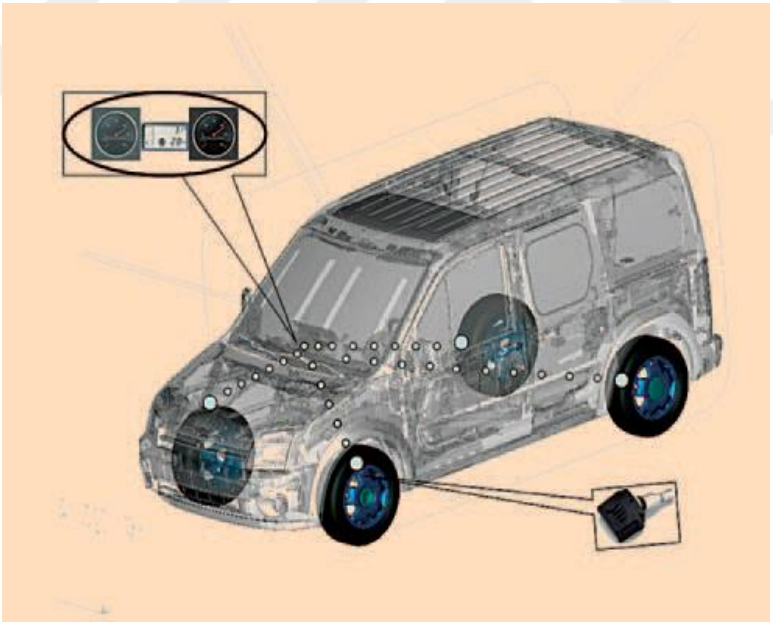
Damperli kamyon lastikleri uygun şekilde şişirildiğinde, operatör tarafından fren mesafesinin azaltılması, yakıt ekonomisinin artması ve araç kullanımı gibi birçok parametre iyileştirilir. Lastiklerin uygun şekilde şişirilmesinin bir başka avantajı, aşırı şişirilmiş veya düşük şişirilmiş lastiklere kıyasla daha uzun ömürleridir. Wingert'e [141] göre, dünyadaki araçların yaklaşık 3/4'ü en az havası az lastikle sürülür veya çalıştırılır. Düşük enflasyon esas olarak yol profili ve tehlikelerden, büyük sıcaklık değişimlerinden ve doğal sızıntılardan kaynaklanmaktadır [142]. Yetersiz şişirme bazen görsel olarak belirlenemeyebilir ve meslekten olmayan kişinin lastikleri kontrol etme refleksi yoktur. Piezoelektrik enerji alanındaki son araştırmalar, çeşitli alanlarda gelecekteki çeşitli uygulamalarını öngörmeye izin verdi. Bu uygulamalardan biri, otonom, kendi kendine çalışan bir mekanizma elde etmek ve pil değiştirmeyle ilgili sorunlardan kaçınmak için uzaktan lastik basıncı izleme sistemlerine elektrik gücü sağlamaktır.

Lastik Basıncı İzleme Sisteminin temel amacı, lastik basıncı tavsiye edilen aralığın dışına çıktığında ve bu da güvenli olmayan sürüş koşullarına yol açtığında makine operatörünü bilgilendirmektir. Uygun lastik şişirme için temel olan çok önemli bir sistemdir. Hem aşırı

şişirme hem de düşük şişirme, erken lastik arızasına neden olabilir ve diş aşınmasına neden olabilir. Bir yandan, lastikler aşırı şişirildiğinde, çekiş azalır ve t ve yol etkisini emememe. Aşırı şişirilmiş lastikler, lastik aşınma oranlarının normalin üzerinde olduğu merkezde erken aşınma gösterecektir. Öte yandan, lastikler yetersiz şişirildiğinde, lastik malzemesinde aşırı ısı birikmesinin yanı sıra çok fazla yakıt tüketilir. Yetersiz şişirilmiş bir lastik de aşırı yüklenmeye maruz kalır. İki ana tip lastik basıncı izleme sistemi vardır.

2.9.1. Direkt Lastik Basıncı İzleme Sistemi

Doğrudan konfigürasyonda, basınç düşüşü, basınç sensörleri tarafından iletilen veriler kullanılarak doğrudan hesaplanır. Tipik ve basit bir TPMS, lastik supabı gövdesine takılan ve basınç düştüğünde renk değişikliği yaşayan bir sensörden oluşur. Bu sensör tipi çok hassas değildir ve verileri gösterge paneli gösterge panellerine iletemez. Doğrudan TPMS'nin başka bir alternatifi, Şekil 2.93 [143]'te gösterildiği gibi radyo frekansı vericileri ve alıcısının yanı sıra bir uyarı sistemini içerir.



Şekil 2.105: Doğrudan bir TPMS [143].

Her lastiğin lastik basıncı sensörler tarafından ölçülür ve gösterge panelindeki bir ışık ve sesli bir alarmdan oluşan uyarı sistemini tetiklemek için gösterge paneli alarm sistemine iletilir.

Kolay uygulama için sistemin boyutu dikkate alınmalıdır. Bu amaçla sensör modülü, merkezkaç kuvvetlerinin etkilerini azaltmak için hacimli veya ağır olmamalıdır. Çoğu TPMS modülünün çalışma sıcaklıkları -40 ◦C ile 120 ◦C arasında değişir. Tipik bir sensör modülü, Şekil 2.93'te gösterildiği gibi bir verici, kontrol ünitesi, anten, sensör ve güç enerjisi için uzun ömürlü pilden oluşur. Sensör modülü, lastiğin içinden tekerlek üzerindeki deliklere takılan bir valf gövdesine sahiptir.



Şekil 2.106: Doğrudan TPMS sensör modülü [143].



Şekil 2.107: Tekerleğe doğrudan TPMS sensör modülü takma [143].

Çok sayıda TPMS sensörü, çok düşük enerji tüketimi seviyelerine ulaşmayı sağlayan tamamlayıcı metal oksit yarı iletken (CMOS) teknolojisi kullanılarak üretilmektedir. Ayrıca, lastik basıncı verilerini depolamak için modüle bir analogdan dijitale dönüştürücü ve kalıcı

bellek dahil edilmiştir. Yükseltilmiş versiyonlarda, basınç sensörüne bir sıcaklık sensörü bağlanmıştır. Sensör ve vericinin fonksiyonlarını kontrol etmek için, sensör ve vericiyi kontrol etmek için modüle bir mikro denetleyici yerleştirilmiştir.

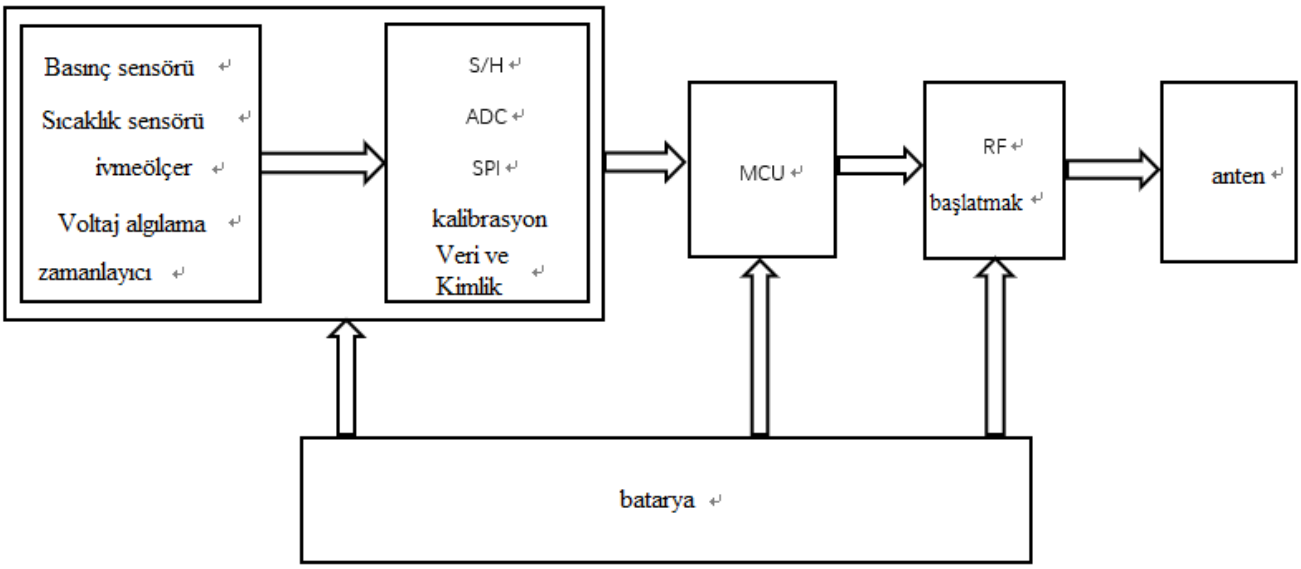
Tipik bir alıcı modülü, bir kontrol ünitesi ve antenden oluşur. Görevi, verileri almak ve gösterge paneli ve uyarı sistemine bağlı merkezi bir işlemciye aktarmaktır. Bir alternatif, iletim frekansı ve protokollerini uygun şekilde ayarlayarak alıcıyı aracın uzaktan anahtarsız giriş sistemiyle entegre etmek olabilir. Temel bir taşınabilir alıcı görüntüleme ünitesi, lastik düşük ve aşırı şişirme olaylarını bildirmek için her bir lastiğe özel bir LED'li renk sembollerinden oluşur (Şekil 2.95).



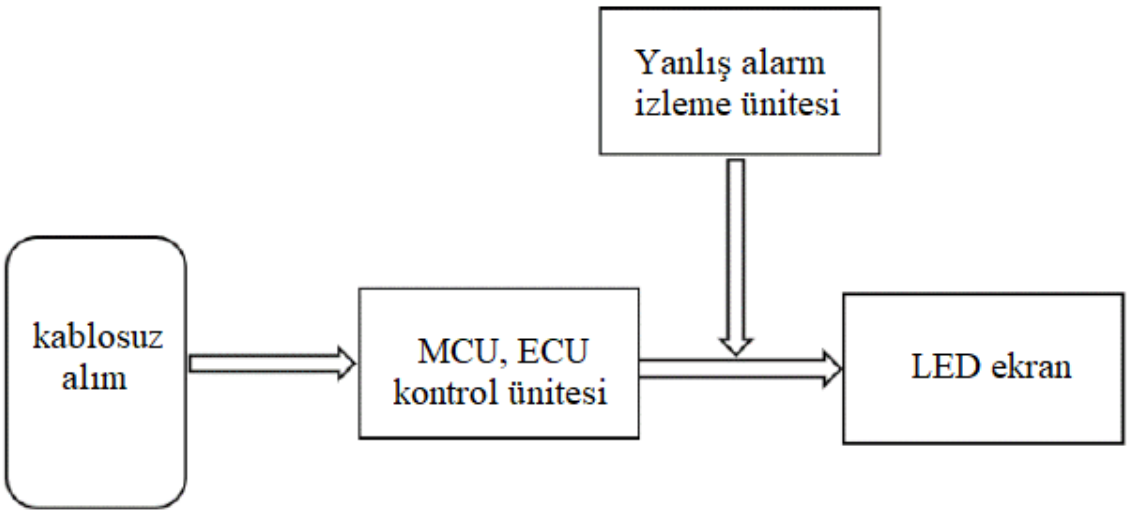
Şekil 2.108: Ekranlı alıcı modülü [143].

2.9.1.1. Aktif TPMS

Aktif TPMS konfigürasyonunda, lastik basınç sensörleri güçlerini kısa ömürlü lityum pillerden alır. Sinyal daha sonra kablosuz bir verici aracılığıyla merkezi alıcı modülüne, anormal seviyeler durumunda görsel ve işitsel bir alarmın tetiklendiği pano küme enstrümanlarına iletilir. Aktif TPMS'nin dezavantajları, lityum pilinin sınırlı ömrü ve maliyeti ile ilgilidir [144].



Şekil 2.109: Aktif TPMS verici şematik diyagramı [144].



Şekil 2.110: Aktif TPMS alıcı şematik diyagramı [144].

2.9.1.2. Pasif TPMS

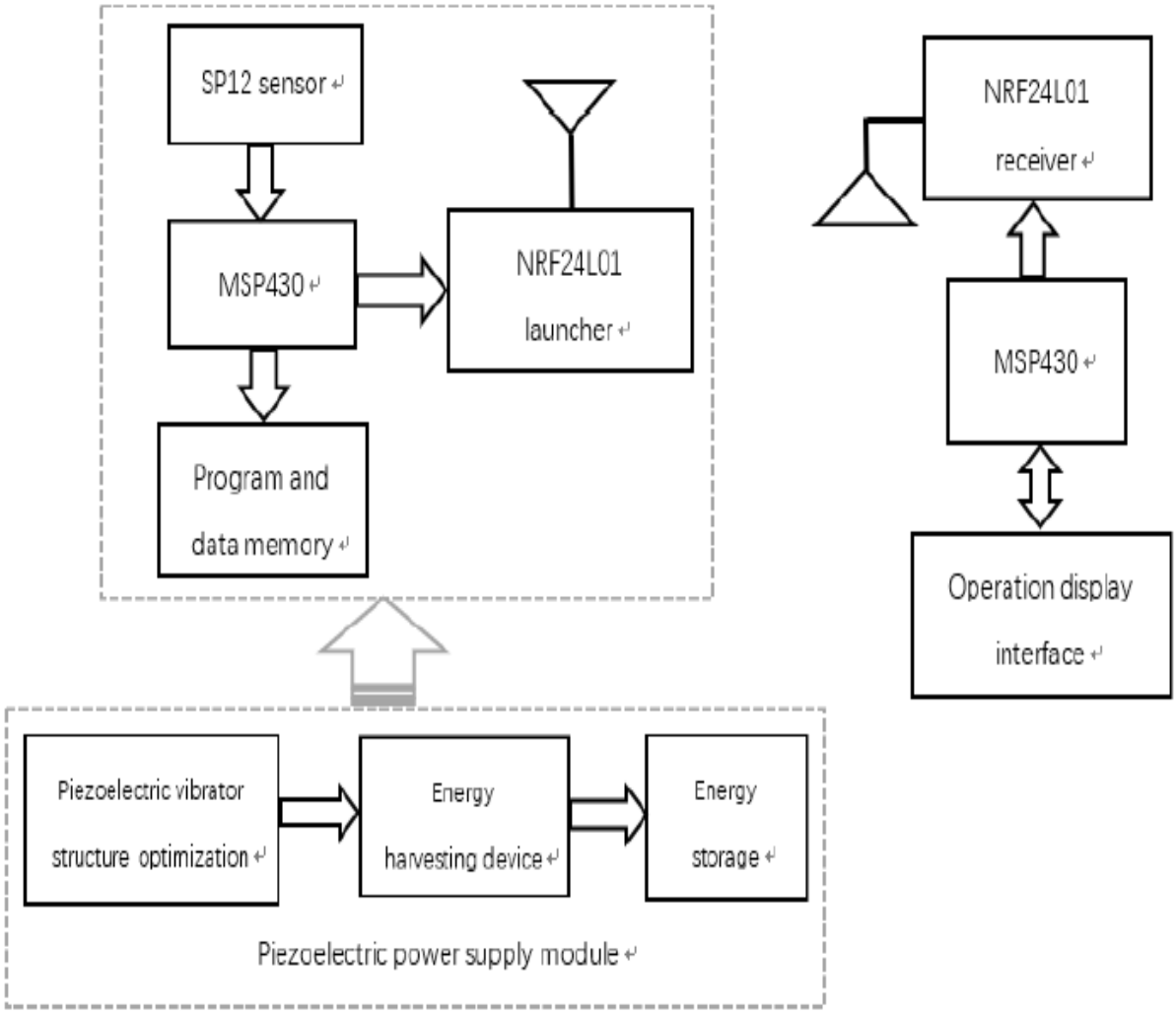
Pasif lastik basıncı izleme sisteminin üç ana türü vardır.

- **Mikro titreşimli güç üretimi TPMS:** Bu tekniğin tasarımı, Çin'de He Cho ngzhong tarafından uygulanan “bir tür mikro titreşim üreteci” patentine dayalı olarak yapılmıştır. Modül, lastik jantına takılmıştır. Aracın titreşimleri, modül içindeki bobinin manyetik indüksiyon hattını kesmesine neden olarak elektromanyetik indüksiyondan daha fazla elektrik enerjisi üretilmesine neden olur. Bu teknik, büyük bir güç üretim kapasitesine sahiptir, ancak lastik iç boşluğunun olmaması nedeniyle titreşim genliği küçüktür. Bu durum düşük enerji üretimine yol açmaktadır.

- **Piezoelektrik Seramik Enerji Üretimi TPMS:** Piezoelektrik seramikler, mekanik strese maruz kaldıktan sonra piezoelektrik üretir. Mikroyapısal olarak, iç negatif ve pozitif yüklerin yer değiştirmesi bir polarizasyona yol açar. Piezoelektrik malzeme kompakt ve küçük boyutlu, hafif ve hassastır (Şekil 2.98).

- **RF pasif TPMS:** Bu teknik, merkezi alıcı-vericili standart bir doğrudan TPMS'deki merkezi alıcıya bir alternatiftir. Bu sistemin sağladığı en büyük avantaj, aktif pilin getirdiği büyük ağırlık ve hacmin taşınmasıdır. Ayrıca çok yüksek hassasiyet ve geniş çalışma özelliğine sahiptir. Bununla birlikte, böyle bir sistemin devre tasarımı karmaşıktır ve uygulanması daha fazla mühendislik gerektirir.

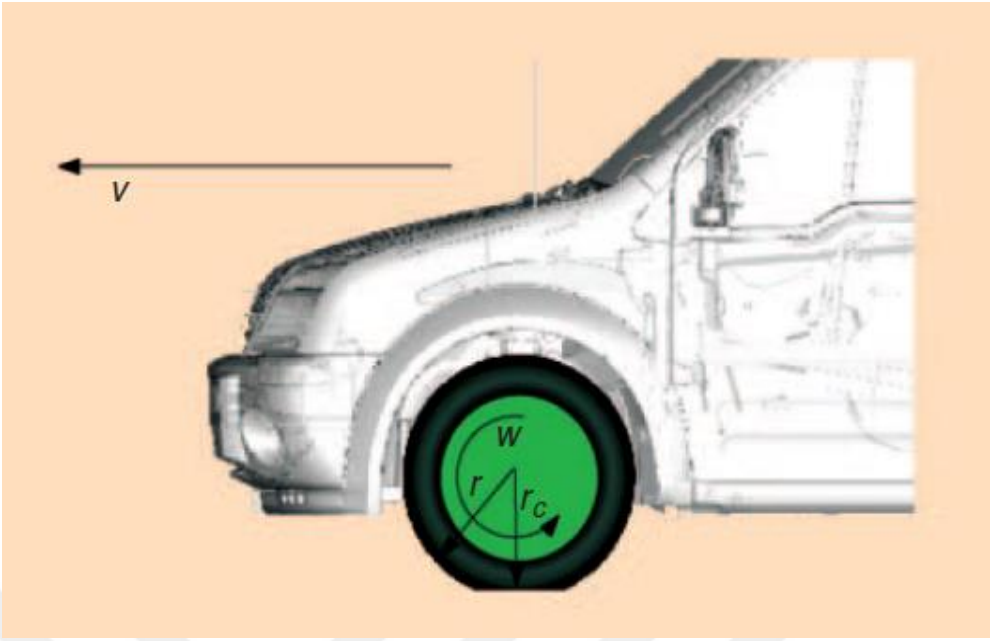
Yukarıda bahsedilen pasif TPMS tekniklerine ek olarak, sıcaklık farkı, akustik TPMS güç üretim yöntemleri gibi diğer yöntemler. Göreceli olarak yüksek üretim maliyetlerini düşürmek ve elektrik üretim potansiyellerini artırmak için bu alternatifleri incelemek için araştırmalar yapılmıştır. Araçların çoğunun aktif TPMS kullandığını belirtmek önemlidir.



Şekil 2.111: Doğrudan TPMS Piezoelektrik seramik güç kaynağı şematik diyagramı [144].

2.9.2. Dolaylı Lastik Basıncı İzleme Sistemi

Dolaylı bir TPMS'nin çalışması için herhangi bir sensör gerekmez. Bir gözlemci ve yazılım kodları kullanarak lastik basıncı değişimlerini tahmin edebilir. Şu anda piyasada bulunan dolaylı TPMS'lerin çoğu tekerlek hızını izler. Lastik basıncının düşmesi durumunda aracın ağırlığı lastiğin çapını azaltır. Dikkate alınması gereken ana parametre, Şekil 2.99'daki sapma gözlemlenerek çıkarılabilen lastik açısal hızıdır ω.



Şekil 2.112: lastik açısal hızı ve araç hızı [143].

Kilitlenme önleyici fren sistemine sahip araçlar, her bir lastiğin dönüş hızını ω merkezi işlemciye iletir. Enflasyon ölçüsünü β izlemek için bir algoritma oluşturulabilir:

$$\beta = \left|\frac{(\omega_{LF}+\omega_{RR})-(\omega_{RF}+\omega_{LR})}{\omega_a}\right| \quad (2.120)$$

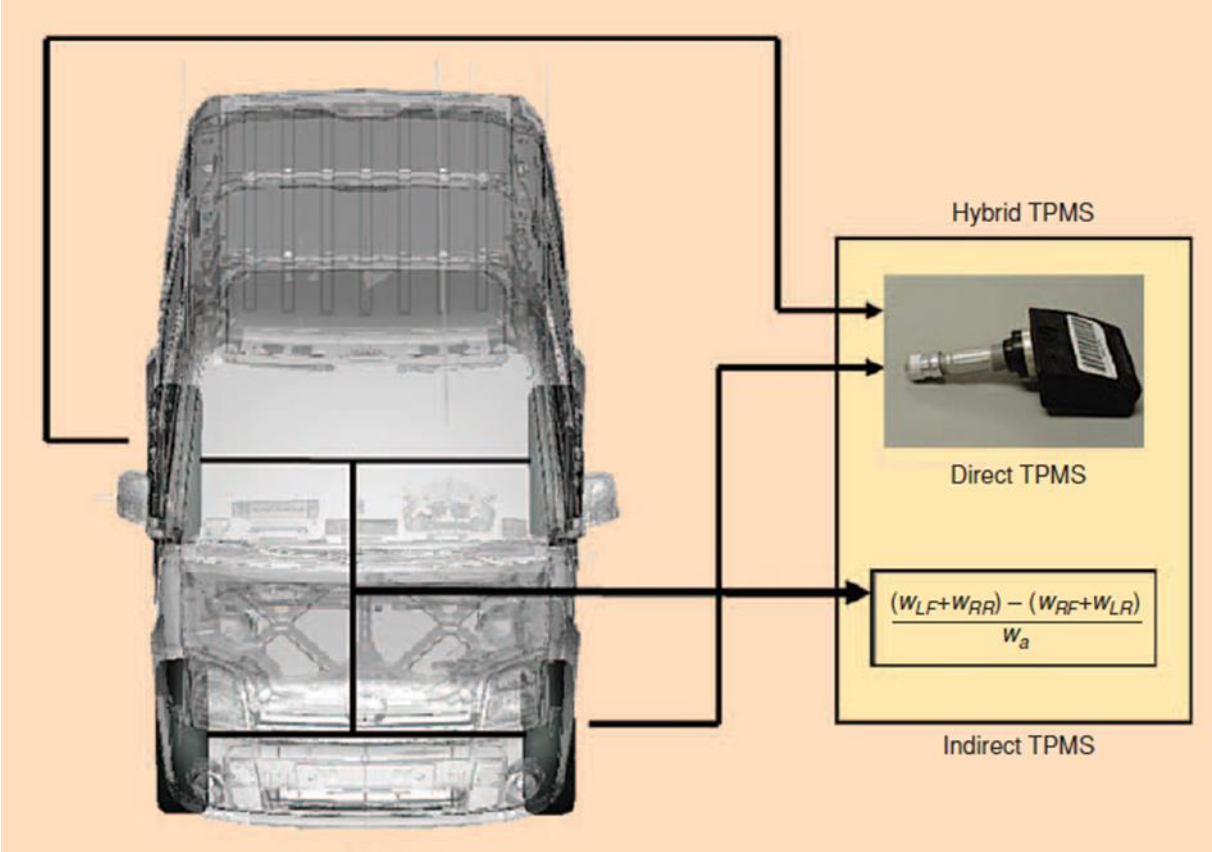
$$\omega_a = \frac{\omega_{LF}+\omega_{RR}+\omega_{RF}+\omega_{LR}}{4} \quad (2.121)$$

$\omega_{LF}, \omega_{RR}, \omega_{RF}, \omega_{LR}$ sol ön, sağ arka, sağ ön ve sol arka tekerlek açısal hızlarını temsil ederken ω_a ortalama açısal hızdır. Lastik uygun şekilde şişirildiğinde, β sıfıra yakın olmalıdır. Başka bir deyişle, dolaylı bir TPMS'yi uygulamak için yalnızca bir yazılıma ihtiyaç vardır. Dolaylı TPMS'nin bir dezavantajı, her bir lastiğin gerçek basıncını sağlamamasıdır. Ayrıca, sadece araç çalıştırıldığında işlevseldir.

2.9.3. Hibrit Lastik Basıncı İzleme Sistemi

Hibrit TPMS, hem doğrudan hem de dolaylı TPMS yöntemlerini birleştiren sistemlerdir. Sensörler ekleyerek dolaylı TPMS'lerin boşluklarını doldurmak için tasarlanmıştır. Bu yöntem, iki çapraz lastik konumuna takılan basınç sensörleri ile dolaylı bir TPMS'ye dayanmaktadır. Tipik bir hibrit TPMS, esas olarak çapraz yerleştirilmiş lastiklere takılan iki basınç sensörü ile birleştirilmiş dolaylı bir TPMS algoritmasından oluşur (Şekil 2.100) [143].

Basınç sensörlerinin varlığı sayesinde gerçek zamanlı basınç değeri izleme sorunu giderilir. Bu nedenle, dolaylı TPMS'ye kıyasla algılama yeteneği ve güvenilirliği geliştirilmiştir. Bununla birlikte, izlenen her iki çapraz lastik aynı anda yetersiz şişirildiğinde, sistem tarafından muhtemelen yalnızca birinin tanımlanacağı gerçeğinden dolayı uygulaması yaygın değildir. Bu nedenle, belirli koşullar altında hibrit sistemin güvenilirliği çok yüksek değildir.



Şekil 2.113: Hibrit TPMS [143].

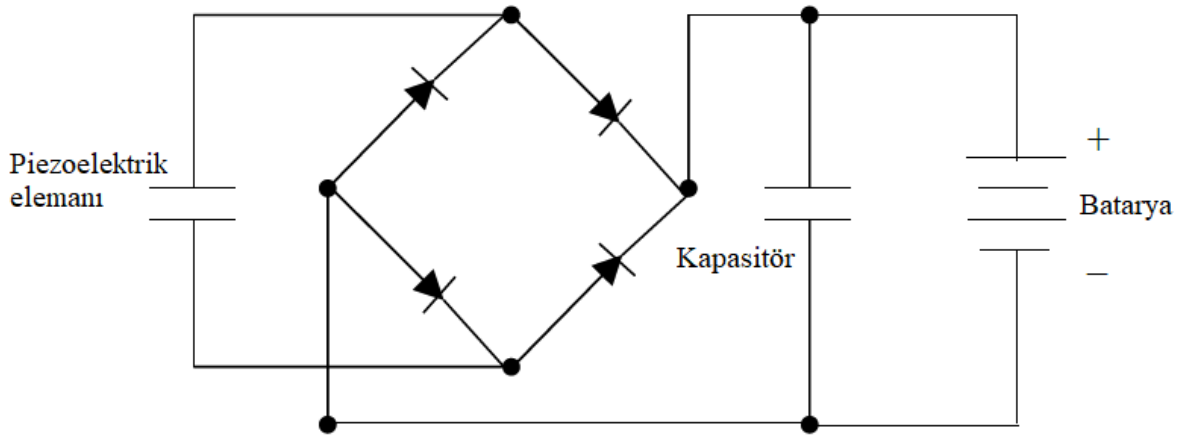
Özetle, dolaylı lastik basıncı izleme sistemleri herhangi bir sensör veya çok fazla donanım gerektirmez ve doğrudan lastik basıncı izleme sistemlerinden farklı olarak ABS sisteminde tekerlek hız sensörünü kullanarak girdi sinyalleri sağlar. Çok düşük maliyetlidir ancak düşük hassasiyetleri, düşük güvenilirlikleri ve sistemin araç çalışma durumuna bağımlı olması gibi birçok dezavantaja sahiptir. Hibrit TPMS'ler, çapraz olarak yerleştirilmiş iki lastiğe takılan iki sensörün uygulanması sayesinde dolaylı TPMS'lerin bazı eksikliklerini giderir. Bununla birlikte, hibrit sistemlerin duyarlılığı, doğrudan olanlara kıyasla düşük kalmaktadır. Doğrudan TPMS, gerçek zamanın çok yüksek doğruluğunu sağlar. Maliyetli olsa da şu anda araçlarda kullanılan en yaygın TMPS'dir.

Piezoelektrik enerji toplayıcıların matematiksel modelleri ve lastik parametrelerinin tahmini, doğrudan TPMS'lerin maliyetini optimize etmek ve hibrit olanların eksikliklerinin üstesinden gelmek için gereklidir [145].

3. YÖNTEM

3.1. SÜSPANSİYON SİSTEMİ PIEZOELEKTRİK ENERJİ HARVESTER CRICUITRY

Süspansiyon sisteminden elde edilen enerji, mini cihazlara güç sağlamak için kullanılabilir. Bununla birlikte, bu enerjinin de yeniden kullanılabilmesi için biriktirilmesi ve depolanması gerekir. Enerjiyi depolamadan önce, piezo elemanlardan gelen AC dalga formu voltajını kapasitörler ve piller kullanılarak kolayca depolanabilen DC voltajına dönüştürmek için bir doğrultucu gereklidir. Tipik ve basit doğrultucu devresinin bir örneği, [146-149]'da açıklanan diyot köprüsüdür. Devrenin şematik diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Devre esas olarak bir diyot köprüsü, bir yumuşatma akümülatörü ve bir pilden oluşur. Toplanan voltaj, büyük kapasitör aracılığıyla biriktirilmeden önce ilk önce rektifiye edilecektir. Kondansatör, enerjiyi depolaması gereken aküye paralel olarak bağlanır. Düzeltme işleminden sonra voltaj regülatörlerinin devreye uygulanması üzerine çeşitli araştırma çalışmaları yapılmıştır. Enerji toplama devresinde kullanılan ana jeneratör türleri, kademeli ve kademeli regülatörlerdir. voltaj regülatörleri, bir yükseltici veya düşürücü dönüştürücü olabilir.



Şekil 3.1: Piezoelektrik enerji toplayıcı şarj devresinin şeması.

Otman ve ark. [150], AC-DC dönüşümü için bir doğrultucu, bir kapasitör ve bir pilden oluşan bir toplama devresi üzerinde bir çalışma yürütmüştür. Ayrıca, aküye giden enerji akışını kontrol etmek için devreyi bir anahtar modlu DC-DC düşürücü dönüştürücü ile birleştirdiler. Bu anahtarlamalı DC-DC dönüştürücü, anahtarlama frekansını değiştirmeye ve aküye giden akım akışını artırmaya izin veren bir kontrol sağlar. Ayrıca kontrol, görev döngüsünün ayarlanmasına

yardımcı olur. Sonuç olarak, Hofmann ve ark. [151], toplanan gücü en üst düzeye çıkarmak için devrelerini sabit bir görev döngüsü ile tasarladı. Sonuçlar, toplanan gücün, pilin doğrudan şarj gücünün yaklaşık üç katı olan 30.66 mW'a yükseldiğini ortaya koydu.

Kondansatörler, yüksek güç yoğunlukları nedeniyle çok hızlı bir şekilde şarj olur ve boşalır. Bu nedenle hızlı enerji transfer sistemleri için uygundurlar. Bununla birlikte, enerjiyi depolamak için elektrokimyasal piller tercih edilir. Sodano ve diğerleri [152], kapasitör ve pil olan iki farklı depolama cihazı kullanarak plakalardan yapılmış bir piezoelektrik toplama makinesi üzerinde testler gerçekleştirdi. Çalışma bulguları ışığında en verimli depolama seçeneğinin depolama olduğu belirtilmiştir. Gerçekten de, pil, hızlı boşalmaları nedeniyle kapasitörlere kıyasla daha çeşitli cihazlara güç sağlayabilir. Pillerin dezavantajlarından biri, Chen ve diğerleri tarafından belirtildiği gibi sınırlı sayıda şarj döngüsüne sahip olmalarıdır. [153]. Nitekim Kurşun asit, Nikel-Kadmiyum, Sodyum Kükürt, Lityum-İyon pillerin devir sayıları sırasıyla 500 – 1000, 2000 – 2500, 2500 devir, 10000 devirdir.

Ultra kapasitörler olarak da bilinen süper kapasitörler, geleneksel kapasitör veya bataryaya alternatif depolama cihazlarıdır [154-156]. Özel özellikleri, geleneksel kapasitörlerden önemli ölçüde daha yüksek kapasitans ve enerji depolama kabiliyetine sahip olmalarıdır. Ayrıca, elektrokimyasal pillerden daha yüksek olan yaklaşık 106 döngülük bir çevrim ömrü sağlayabilirler [157]. Daha yüksek güç çıkışları elde etmek için Tolentino ve Talampas [158] tarafından belirtildiği gibi süper kapasitörleri şarj edilebilir pillerle birleştirmek mümkündür. Deneylerinde, birincil depolama birimi olarak bir Lityum-İyon pil ve ikincil olarak bir süper kapasitör yerleştirdiler. Bu, yalnızca birinin özel kullanımından daha büyük performanslar elde etmelerini sağladı.

3.2. MATEMATİKSEL MODELLERİN BÜNYE DENKLEMLERİ

Aşağıdaki kısımlar saf mekanik sistem matematiksel modellerini kapsar. Mekanik sistem modellemesi tartışılacaktır.

3.2.1. Piezoelektrik Malzeme Hariç Matematiksel Modeller

3.2.1.1. Piezoelektrik Malzeme Hariç Çeyrek Araba Modeli

Çeyrek araba modeli, bir arabayı modellemenin en basit ve en temel yoludur. Arabanın çeyreğini temsil eder ve özellikle erken tasarım amacıyla sıçrama olarak da bilinen araba gövdesinin dikey yer değiştirmesini (titreşimleri) tartışır. Model esas olarak, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi yaysız ve yaylı kütleler ve süspansiyon olarak bilinen iki kütleden yapılmıştır. Yaysız kütle Mus bir lastik grubunu temsil ederken, yaylı kütle Ms araba gövdesinin dörtte birini temsil eder. Süspansiyon desteği, Ks rijitlik katsayısına sahip bir yaydan ve bs sönüm katsayısına sahip doğrusal viskoz damperden oluşur. Süspansiyon payandaları yaylı kütlenin tabanına bağlanırken, tekerlek tertibatını temsil eden yaysız kütle, sırasıyla lastik rijitliği Kus ve emicilik otobüsünü gösteren bir yay ve amortisör vasıtasıyla yol yüzeyi ile doğrudan temas halindedir. Uyarım, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi araba gövdesinin yanı sıra lastiğin yus'unun dikey yer değiştirmesine yol açan yol uyarımı yR tarafından sistem arabasına sağlanır. Çeyrek araba modelini modellemek için Newton'un 2. yasasından yararlanılabilir. İki serbestlik derecesinden iki denklem çıkarılabilir:

- Yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -K_s(y_s - y_{us}) - b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) \tag{3.1}$$

- Yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{us}\ddot{y}_{us} = K_s(y_s - y_{us}) + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) - K_{us}(y_{us} - y_R) - b_{us}(\dot{y}_{us} - \dot{y}_R) \tag{3.2}$$

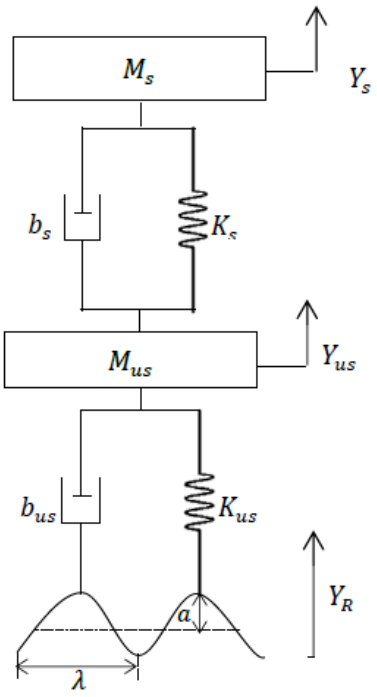
$\dot{y}_R$ yolun hızıdır,

$\dot{y}_{us}$ yaysız kütlenin hızıdır,

$\dot{y}_s$, yaylı kütlenin hızıdır,

$\ddot{y}_{us}$,yaysız kütlenin ivmesi,

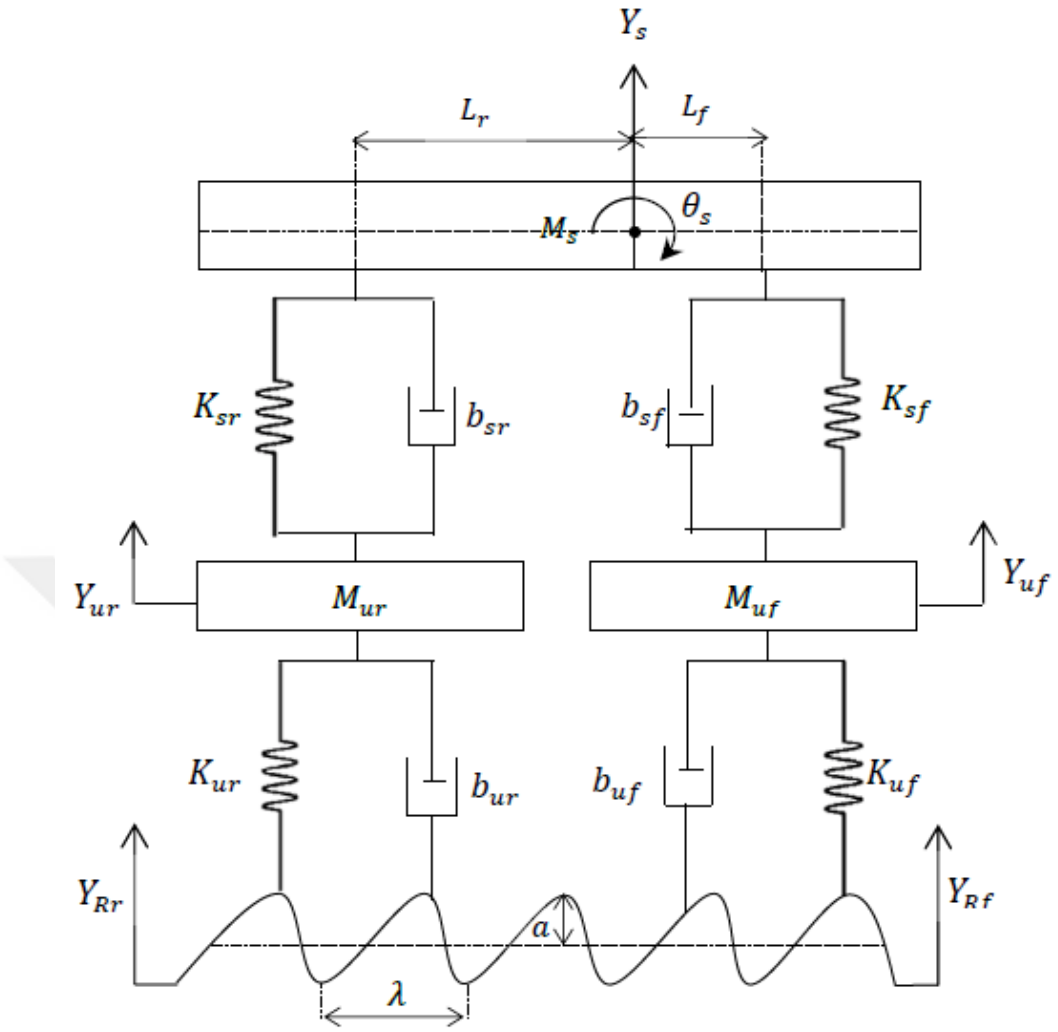
$\ddot{y}_s$, yaylı kütlenin ivmesidir.



Şekil 3.2: Çeyrek araba modeli şematik diyagramı.

3.2.1.2. Piezoelektrik Malzeme Hariç Yarım Araba Modeli

Yarım araba modeli, bir ön ve bir arka lastik tertibatı ile aracın arabasının bir temsilidir. Bu model, ön yuf ve arka dingillerin dikey hareketleri, araç gövdesinin eğim θs ve sıçrama ys ve eğim hareketleri olmak üzere dört serbestlik derecesinden oluşur. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, yarı araba gövdesi ön ve arka lastiklere bağlanmıştır. Sırasıyla ön ve arka yaysız Muf ve Mur kütleleri, yarı araba gövdesi etrafında dikey olarak sıçramakta serbesttir. Oysa yaylı kütle Ms zıplamakta ve yalpalamakta serbesttir. Ön ve arka süspansiyon sistemleri, K_{sf} ve K_{sr} rijitlik katsayılarına sahip lineer yayların yanı sıra bsf ve bsr lineer viskoz amortisörlerden yapılmıştır. Lastikler, K_{uf} ve K_{ur} rijitlik katsayılarının lineer yayları ve ayrıca buf ve bur sönümleme katsayılarının lineer amortisörleri olarak temsil edilir.



Şekil 3.3: Yarım araba modeli şematik diyagramı.

Yarım araba modelinin dört serbestlik derecesinden dört hareket denklemi türetilebilir:

- Ön yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{uf}\ddot{y}_{uf} = K_{uf}(y_{uf} - y_{Rf}) - b_{uf}(\dot{y}_{uf} - \dot{y}_{Rf}) + K_{sf}(y_s - L_f\theta_s - y_{uf}) + b_{sf}(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}) \quad (3.3)$$

- Ön yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{ur}\ddot{y}_{ur} = K_{ur}(y_{ur} - y_{Rr}) - b_{ur}(\dot{y}_{ur} - \dot{y}_{Rr}) + K_{sr}(y_s + L_r\theta_s - y_{ur}) + b_{sr}(\dot{y}_s - L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) \quad (3.4)$$

- Yaylı kütlenin açısal hareketinin denklemi:

$$I_s\dot{\theta}_s = L_f\left[K_{sf}\left(y_s - L_f\theta_s - y_{uf}\right) + b_{sf}\left(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}\right)\right] - L_r\left[K_{sr}(y_s + L_r\theta_s - y_{ur}) + b_{sr}\left(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}\right)\right] \quad (3.5)$$

- Yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -K_{sf}\left(y_s - L_f\theta_s - y_{uf}\right) - b_{sf}\left(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}\right) - K_{sr}(y_s + L_r\theta_s - y_{ur}) - b_{sr}\left(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}\right) \quad (3.6)$$

θ_s açısal yer değiştirmedir (rad),

I_s eylemsizlik momentini (kg.m2) temsil eder,

L_f, ön dingil mesafesini (m) temsil eder,

L_r arka dingil mesafesini (m) temsil eder,

$\ddot{y}_{uf}$ ön yaysız kütlenin (ön lastik) dikey ivmesini temsil eder,

$\ddot{y}_{ur}$, arkaya asılan kütlenin (arka lastik) dikey ivmesini temsil eder,

$\ddot{y}_s$, yaylı kütlenin (araç gövdesi) ivmesini temsil eder,

$\dot{\theta}_s$, yaylı kütlenin açısal hızını temsil eder,

$\dot{y}_{uf}$ ön yaysız kütlenin dikey hızını temsil eder,

$\dot{y}_{ur}$ arka yaysız kütlenin dikey hızını temsil eder,

$\dot{y}_{Rf}$, arabanın önündeki yolun dikey hızını temsil eder,

$\dot{y}_{Rr}$, arabanın arkasındaki yolun dikey hızını temsil eder,

Arabanın ön ve arka lastiklerinin harmonik uyarımının yaklaşık bir tahmini, aşağıdaki gecikmeli fonksiyon ile verilmektedir:

$$y_{Rf} = \text{asin}(\omega t) \quad (3.7)$$

$$y_{Rr}(t) = \ddot{Y}_{Rf}(t - \tau) \quad (3.8)$$

ω açısal frekanstır,

a ivme genliğidir,

τ, $\frac{L}{u}$ 'ya eşit olan zaman gecikmesidir; burada L, dingil mesafesi ve u, arabanın hızıdır.

3.2.1.3. Lineer Olmayan Çeyrek Araba Modeli

Süspansiyon sistemi, sürtünme sönümlemesi, bileşenlerin boşlukları ve geri tepmesi, karesel, kübik ve dörtlenik rijitlik gibi çok sayıda doğrusal olmayanlığa tabidir. Bu çalışma için kübik

doğrusal olmayan rijitlik dikkate alınacaktır. Bu durumda yay kuvveti, bu durumda aşağıdaki ifade ile açıklanabilir:

$$f_k = K_4(y_s - y_{us})^4 + K_3(y_s - y_{us})^3 + K_2(y_s - y_{us})^2 + K_1(y_s - y_{us}) \quad (3.9)$$

Burada,

$K_4 = 136150000\ N/m^4$

$K_3 = -24800000\ N/m^3$

$K_2 = -520000\ N/m^2$

$K_1 = 2320000\ N/m$

- Yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -K_4(y_s - y_{us})^4 - K_3(y_s - y_{us})^3 - K_2(y_s - y_{us})^2 - K_1(y_s - y_{us}) - b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) \quad (3.10)$$

- Yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{us}\ddot{y}_{us} = K_4(y_s - y_{us})^4 + K_3(y_s - y_{us})^3 + K_2(y_s - y_{us})^2 + K_1(y_s - y_{us}) + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) - K_{us}(y_{us} - y_R) - b_{us}(\dot{y}_{us} - \dot{y}_R) \quad (3.11)$$

$\dot{y}_R$ yolun hızıdır,

$\dot{y}_{us}$ yaysız kütlenin hızıdır,

$\dot{y}_s$, yaylı kütlenin hızıdır,

$\ddot{y}_{us}$,yaysız kütlenin ivmesi,

$\ddot{y}_s$, yaylı kütlenin ivmesidir.

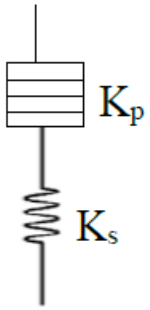
3.2.2. Piezoelektrik Malzeme İçeren Matematiksel Modeller

İlerleyen bölümlerde yaylar ve piezoelektrik yığınlar arasındaki bağlantı seri olarak ele alınacaktır. Elektromekanik sistemin yönetim denklemleri, Laplace dönüşümü kullanılarak hem yarım hem de çeyrek araba modelleri için türetilecektir.

3.2.2.1. Piezoelektrik Malzeme Modeli

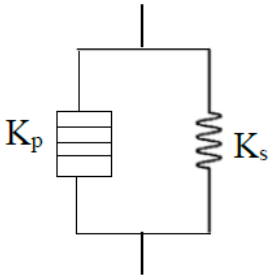
Toplanan güç voltajını önemli ölçüde etkileyen faktörlerden biri, süspansiyon sistemindeki piezoelektrik yığının konumu ve bağlantı şeklidir. Süspansiyon yayı ile piezoelektrik malzeme

arasındaki seri bağlantı, sistemin mekanik özelliklerini ve performansını etkilemeyeceği için bu çalışmada tercih edilmiştir. Denklem (3.12) ve Denklem (3.13)'da gösterildiği gibi süspansiyon yayı ile piezoelektrik yığını arasında paralel bağlantı olması durumunda eşdeğer sistem rijitliği artar ve sürüş konforu olumsuz etkilenir.



Şekil 3.4: Süspansiyon yayı ve piezoelektrik yığın arasındaki seri bağlantı.

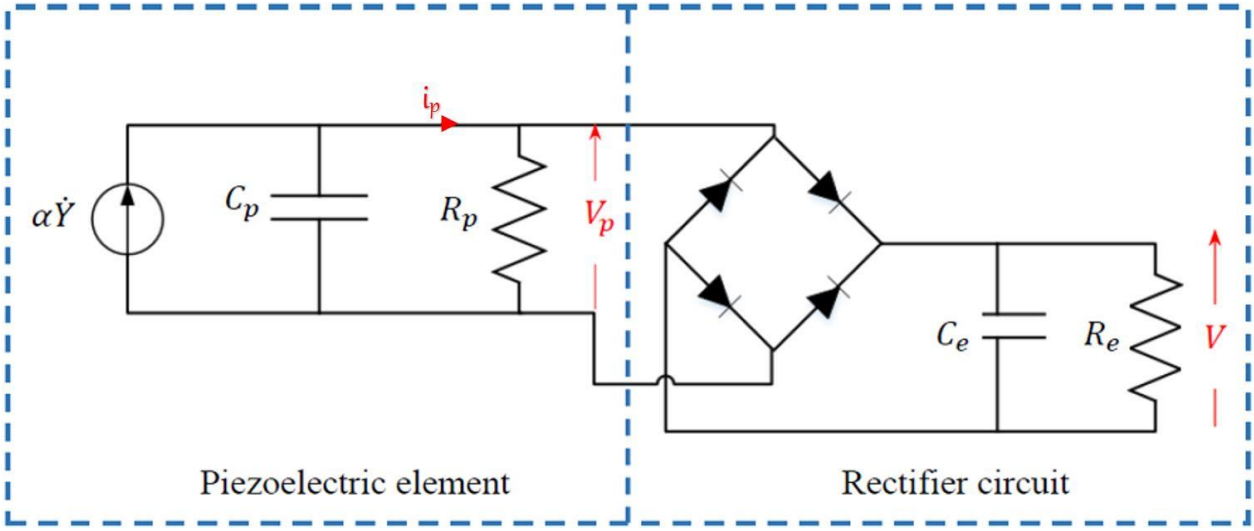
$$K_{eq} = \frac{K_s + K_{piezo}}{K_s \times K_{piezo}} \approx K_s \tag{3.12}$$



Şekil 3.5: Süspansiyon yayı ve piezoelektrik yığın arasındaki paralel bağlantı.

$$K_{eq} = K_s + K_p \tag{3.13}$$

Piezoelektrik eleman, piezoelektrik sönümlemenin etkileri ihmal edilerek piezoelektrik malzemedeki başvuru kuvveti ve çıkış akımı i_p olarak modellenebilir. Bu başvuru kuvveti, bir mekanik bileşen ve bir elektrik bileşeninden oluşur. Elektrik devresi, toplanan enerjinin toplanması ve depolanmasında rol oynar. Devrede, piezoelektrik yığın bir direnç Rp ve bir kapasitans C_p olarak modellenebilir. Çıkış AC voltajı V_p, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi elektrik devresine sağlanır.



Şekil 3.6: Piezoelektrik yığını ve elektrik devresi seti.

Elektrik devresi, AC voltajın DC'ye doğrultulması için dört (04) ideal silikon diyotlu bir köprü doğrultucudan, bir harici yol Re'den ve çıkış sinyalinin dalgalanmalarını azaltmak için bir yumuşatma kapasitansından C_e'den yapılmıştır.

Piezoelektrik yığının mekanik ve elektriksel değişkenleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki ifadelerle verilmektedir:

$$F_p = K_p y_p(t) + \alpha v_p(t) \quad (3.14)$$

$$i_p = \alpha\, \dot{y}_p - C_p \dot{v}_p \quad (3.15)$$

$$K_p = \frac{E_p A_p}{l_p} \quad (3.16)$$

$$\alpha = d_{33} E_p \frac{A_p}{h_p} \quad (3.17)$$

$$C_p = N \frac{\varepsilon_{33} A_p}{h_p} \quad (3.18)$$

K_p, piezoelektrik yığının kısa devre rijitliği olduğunda,

C_p, piezoelektrik kapasitanstır,

Y_p, yaylı ve yaysız kütle arasındaki nispi yer değiştirmedir,

α kuvvet faktörüdür,

A_p yüzey alanıdır,

h_p, piezoelektrik yığının bir tabakasının kalınlığıdır,

Yığının toplam kalınlığı aşağıdaki denklemle verilir:

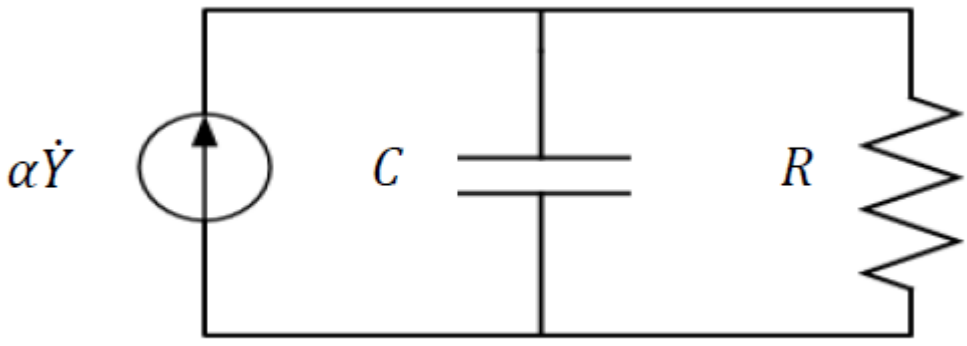
$$l_p = Nh_p \tag{3.19}$$

Geçerli i_p aşağıdaki ilişkilerle tanımlanabilir:

$$i_p = \begin{cases} C_e\dot{v} + \frac{v}{R_e} & if\ v_p = v \\ -C_e\dot{v} - \frac{v}{R_e} & if\ v_p = -v \\ 0 & if\ v_p = 0 \end{cases} \tag{3.20}$$

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi dirençler ve kapasitörler arasındaki bağlantı şekli paraleldir. Piezoelektrik direnç (Rp >> Re) ile karşılaştırıldığında dış yük direnci ihmal edilebilir. Dirençlerin paralel bağlantısında eşdeğer direnç, herhangi bir bireysel dirençten daha küçüktür. Bu nedenle, genel eşdeğer direnç R, neredeyse harici yük direncine eşittir ($R_{eq} \approx R_e$). Ayrıca, piezoelektrik kapasitans C_p, yumuşatma kapasitörü C_e ($C_p << C_e$) ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. Dirençlerin aksine, kapasitörler paralel yerleştirildiğinde, paralel devrede bulunan tüm kapasitörlerin toplamı olan eşdeğer bir kapasite sağlar. Eşdeğer kapasitans, yumuşatma kapasitansına ($C_{eq} \approx C_e$) hemen hemen eşittir. Bu nedenle, DC doğrultulmuş voltajın bir döngü [159, 160] boyunca sabit olduğu varsayılabilir. Ek varsayımlar olarak, dört diyot ideal davranışı sergiler (diyot düşüşü ihmal edilebilir) ve harici yük sabit bir akım kaynağı olarak modellenir. Eşdeğer elektrik devresi Şekil 3.7'de gösterilmiştir:

$$\frac{V}{R} = \alpha\dot{y}(t) - C_p\dot{v}(t) \tag{3.21}$$



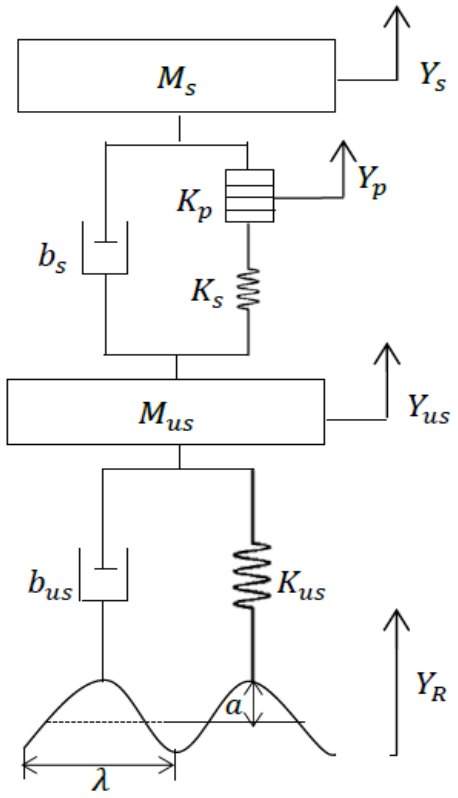
Şekil 3.7: Piezoelektrik yığına eşdeğer elektrik devresi ve elektrik devresi seti.

Tablo 3.1: Malzemenin piezoelektrik parametreleri (PZT).

Parameter	Value
ε_{33}	39.975 (nF/m)
d_{33}	600 pm/V
E_{33}	53 (GPa)

3.2.2.2. Piezoelektrik Malzeme (PZT) İçeren Çeyrek Araba Modeli.

Piezoelektrik yığını olan çeyrek araba modeli, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi süspansiyon yayı ile seri olarak bağlanan piezoelektrik toplama sisteminin yanında bir lastik olan arabanın çeyreğini temsil eder.



Şekil 3.8: Piezoelektrik yığınlı çeyrek araba modeli.

Bu modelden türetilen hareket denklemleri ve bunların Laplace dönüşümleri aşağıdaki bölümlerde tartışılacaktır:

- Yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) - K_p(y_s - y_p) - \alpha v_p \quad (3.22)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_s s^2 + b_s s + K_p]Y_s = (b_s s)Y_{us} + (K_p)Y_p - (\alpha)V_p \quad (3.23)$$

Yaylı kütlenin dikey yer değiştirmesi:

$$Y_s = B_1 Y_{us} + B_2 Y_p + B_3 V_p \quad (3.24)$$

Burada,

$$B_1 = \left[\frac{b_s s}{M_s s^2 + b_s s + K_p}\right] \quad (3.25)$$

$$B_2 = \left[\frac{K_p}{M_s s^2 + b_s s + K_p}\right] \quad (3.26)$$

$$B_3 = \left[\frac{\alpha}{M_s s^2 + b_s s + K_p}\right] \quad (3.27)$$

- Yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{us}\ddot{y}_{us} = -K_{us}(y_{us} - y_R) - b_{us}(\dot{y}_{us} - \dot{y}_R) + K_s(y_p - y_{us}) + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) \quad (3.28)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_{us}s^2 + (b_{us} + b_s)s + (K_{us} + K_s)]Y_{us} = (b_{us}s + K_{us})Y_R + (b_s s)Y_s + (K_s)Y_p \quad (3.29)$$

Yaysız kütlenin düşey yer değiştirmesi şu şekilde yazılabilir:

$$Y_{us} = B_4 Y_R + B_5 Y_s + B_6 Y_p \quad (3.30)$$

Burada,

$$B_4 = \left[\frac{b_{us}s+K_{us}}{M_{us}s^2+(b_{us}+b_s)s+(K_{us}+K_s)}\right] \quad (3.31)$$

$$B_5 = \left[\frac{b_s s}{M_{us}s^2+(b_{us}+b_s)s+(K_{us}+K_s)}\right] \quad (3.32)$$

$$B_6 = \left[\frac{K_s}{M_{us}s^2+(b_{us}+b_s)s+(K_{us}+K_s)}\right] \quad (3.33)$$

- Piezoelektrik elemanın denklemi:

$$M_p\ddot{y}_p = -K_s(y_p - y_{us}) + K_p(y_s - y_p) + \alpha v_p \quad (3.34)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_p s^2 + K_s + K_p]Y_p = (K_s)Y_{us} + (K_p)Y_s + (\alpha)V_p \quad (3.35)$$

Piezoelektrik elemanın dikey yer değiştirmesi şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$Y_p = B_7 Y_{us} + B_8 Y_s + B_9 V_p \quad (3.36)$$

Burada,

$$B_7 = \frac{K_s}{M_p s^2+K_s+K_p} \quad (3.37)$$

$$B_8 = \frac{K_p}{M_p s^2+K_s+K_p} \quad (3.38)$$

$$B_9 = \frac{\alpha}{M_p s^2+K_s+K_p} \quad (3.39)$$

- Eşdeğer elektrik sisteminin yönetim denklemi (3.21) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$v = \alpha R(\dot{y}_s - \dot{y}_p) - CR\dot{v} \quad (3.40)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$(CRs + 1)V = (\alpha Rs)Y_s - (\alpha Rs)Y_p \quad (3.41)$$

Toplanan voltaj şu şekilde ifade edilebilir:

$$V = B_{10}Y_s - B_{10}Y_p \quad (3.42)$$

Burada,

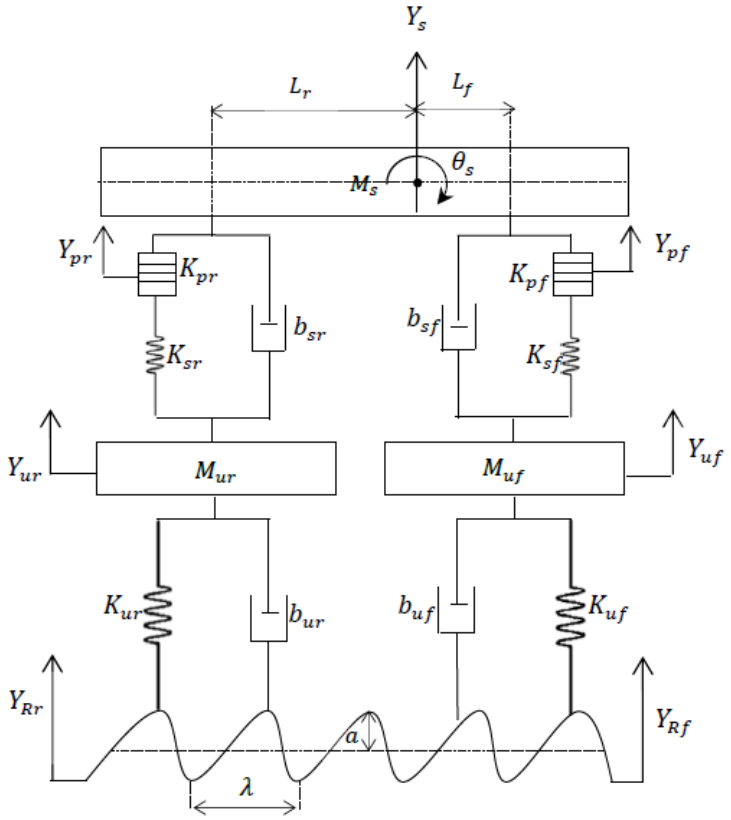
$$B_{10} = \left[\frac{\alpha Rs}{CRs+1}\right] \quad (3.43)$$

Toplanan güç şu şekilde ifade edilebilir:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.44)$$

3.2.2.3. Piezoelektrik Malzeme PZT Dahil Yarım Araba Modeli.

Piezoelektrik yığınlı yarım araba modeli, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi bir ön lastik ve bir arka lastik ile yarım arabaya dahil edilen piezoelektrik yığınları temsil eder.



Şekil 3.9: Piezoelektrik yığınlı yarım araba modeli.

Bünye denklemleri:

- Ön yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{uf}\ddot{y}_{uf} = -b_{uf}\left(\dot{y}_{uf} - \dot{y}_{Rf}\right) - K_{uf}\left(y_{uf} - y_{Rf}\right) + b_{sf}\left(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}\right) + K_{sf}\left(y_{pf} - y_{uf}\right) \quad (3.45)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$\left[M_{uf}s^2 + \left(b_{sf} + b_{uf}\right)s + \left(K_{sf} + K_{uf}\right)\right]Y_{uf} = \left(b_{uf}s + K_{uf}\right)Y_{Rf} + \left(b_{sf}s\right)Y_s - \left(b_{sf}L_fs\right)\Theta_s + \left(K_{sf}\right)Y_{pf} \quad (3.46)$$

Ön yaysız kütlenin dikey yer değiştirmesi şu şekilde yazılabilir:

$$Y_{uf} = B_{11}Y_{Rf} + B_{12}Y_S - B_{13}\Theta_s + B_{14}Y_{pf} \quad (3.47)$$

Burada,

$$B_{11} = \left[\frac{b_{uf}s + K_{uf}}{M_{uf}s^2 + \left(b_{sf} + b_{uf}\right)s + \left(K_{sf} + K_{uf}\right)}\right] \quad (3.48)$$

$$B_{12} = \left[\frac{b_{sf}s}{M_{uf}s^2+(b_{sf}+b_{uf})s+(K_{sf}+K_{uf})}\right] \quad (3.49)$$

$$B_{13} = \left[\frac{b_{sf}L_fs}{M_{uf}s^2+(b_{sf}+b_{uf})s+(K_{sf}+K_{uf})}\right] \quad (3.50)$$

$$B_{13} = \left[\frac{K_{sf}}{M_{uf}s^2+(b_{sf}+b_{uf})s+(K_{sf}+K_{uf})}\right] \quad (3.51)$$

- Arka yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{ur}\ddot{y}_{ur} = -b_{ur}(\dot{y}_{ur} - \dot{y}_{Rr}) - K_{ur}(y_{ur} - y_{Rr}) + b_{sr}(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) + K_{sr}(y_{pr} - y_{ur}) \quad (3.52)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_{ur}s^2 + (b_{sr} + b_{ur})s + (K_{sr} + K_{ur})]Y_{ur} = (b_{ur}s + K_{ur})Y_{Rr} + (b_{sr}s)Y_s + (b_{sr}L_rs)\Theta_s + (K_{sr})Y_{pr} \quad (3.53)$$

Arka yaysız kütlenin dikey yer değiştirmesi şu şekilde yazılabilir:

$$Y_{ur} = B_{15}Y_{Rr} + B_{16}Y_S + B_{17}\Theta_s + B_{18}Y_{pr} \quad (3.54)$$

Burada,

$$B_{15} = \left[\frac{b_{ur}s+K_{ur}}{M_{ur}s^2+(b_{sr}+b_{ur})s+(K_{sr}+K_{ur}}\right] \quad (3.55)$$

$$B_{16} = \left[\frac{b_{sr}s}{M_{ur}s^2+(b_{sr}+b_{ur})s+(K_{sr}+K_{ur}}\right] \quad (3.56)$$

$$B_{17} = \left[\frac{b_{sr}L_rs}{M_{ur}s^2+(b_{sr}+b_{ur})s+(K_{sr}+K_{ur}}\right] \quad (3.57)$$

$$B_{18} = \left[\frac{K_{sr}}{M_{ur}s^2+(b_{sr}+b_{ur})s+(K_{sr}+K_{ur}}\right] \quad (3.58)$$

- Yarı yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -b_{sf}(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}) - b_{sr}(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) - K_{pf}(y_s - L_f\theta_s - y_{pf}) - K_{pr}(y_s + L_r\theta_s - y_{pr}) - (\alpha)v_{pf} - (\alpha)v_{pr} \quad (3.59)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_ss^2 + (b_{sf} + b_{sr})s + (K_{pf} + K_{pr})]Y_s = [(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s + (k_{pf}L_f - K_{pr}L_r)]\Theta_s + (b_{sf}s)Y_{uf} + (b_{sr}s)Y_{ur} + (K_{pf}s)Y_{pf} + (K_{pr}s)Y_{pr} - (\alpha)V_{pf} - (\alpha)V_{pr} \quad (3.60)$$

Bu ifade şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$Y_s = B_{19}\Theta_s + B_{20}Y_{uf} + B_{21}Y_{ur} + B_{22}Y_{pf} + B_{23}Y_{pr} - B_{24}V_{pf} - B_{24}V_{pr} \quad (3.61)$$

Burada,

$$B_{19} = \left[\frac{(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s + (k_{pf}L_f - K_{pr}L_r)}{M_s s^2 + (b_{sf}+b_{sr})s + (K_{pf}+K_{pr})}\right] \quad (3.62)$$

$$B_{20} = \left[\frac{b_{sf}s}{M_s s^2 + (b_{sf}+b_{sr})s + (K_{pf}+K_{pr})}\right] \quad (3.63)$$

$$B_{21} = \left[\frac{b_{sr}s}{M_s s^2 + (b_{sf}+b_{sr})s + (K_{pf}+K_{pr})}\right] \quad (3.64)$$

$$B_{22} = \left[\frac{K_{pf}s}{M_s s^2 + (b_{sf}+b_{sr})s + (K_{pf}+K_{pr})}\right] \quad (3.65)$$

$$B_{23} = \left[\frac{K_{pr}s}{M_s s^2 + (b_{sf}+b_{sr})s + (K_{pf}+K_{pr})}\right] \quad (3.66)$$

$$B_{24} = \left[\frac{\alpha}{M_s s^2 + (b_{sf}+b_{sr})s + (K_{pf}+K_{pr})}\right] \quad (3.67)$$

- Yarı yaylı kütlenin açısal hareketinin denklemi:

$$I_s\ddot{\theta}_s = L_f\left(b_{sf}\left(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}\right) + K_{pf}\left(y_s - L_f\theta_s - y_{pf}\right) + \alpha v_{pf}\right) - L_r\left(b_{sr}\left(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}\right) + K_{pr}\left(y_s + L_r\theta_s - y_{pr}\right) + \alpha v_{pr}\right) \quad (3.68)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$\left[I_s s^2 + \left(b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2\right)s + \left(K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2\right)\right]\Theta_s = \left[\left(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r\right)s + \left(k_{pf}L_f - K_{pr}L_r\right)\right]Y_s - \left(b_{sf}L_f s\right)Y_{uf} + \left(b_{sr}L_r s\right)Y_{ur} - \left(K_{pf}L_f s\right)Y_{pf} + \left(K_{pr}L_r s\right)Y_{pr} + \left(\alpha L_f\right)V_{pf} - \left(\alpha L_r\right)V_{pr} \quad (3.69)$$

Açısal yer değiştirme şu şekilde yazılabilir:

$$\Theta_s = B_{25}Y_s - B_{26}Y_{uf} + B_{27}Y_{ur} - B_{28}Y_{pf} + B_{29}Y_{pr} + B_{30}V_{pf} - B_{31}V_{pr} \quad (3.70)$$

Burada,

$$B_{25} = \left[\frac{(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s + (k_{pf}L_f - K_{pr}L_r)}{I_s s^2 + \left(b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2\right)s + (K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2)}\right] \quad (3.71)$$

$$B_{26} = \left[\frac{b_{sf}L_f s}{I_s s^2 + \left(b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2\right)s + (K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2)}\right] \quad (3.72)$$

$$B_{27} = \left[\frac{b_{sr}L_r s}{I_s s^2 + \left(b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2\right)s + (K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2)}\right] \quad (3.73)$$

$$B_{28} = \left[\frac{K_{pf}L_f s}{I_s s^2 + \left(b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2\right)s + (K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2)}\right] \quad (3.74)$$

$$B_{29} = \left[\frac{K_{pr}L_r s}{I_s s^2 + \left(b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2\right)s + (K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2)}\right] \quad (3.75)$$

$$B_{30} = \left[\frac{\alpha L_f}{I_s s^2 + \left(b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2\right)s + (K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2)}\right] \quad (3.76)$$

$$B_{31} = \left[\frac{\alpha L_r}{I_s s^2 + \left(b_{sf} L_f^2 + b_{sr} L_r^2\right) s + (K_{pf} L_f^2 + K_{pr} L_r^2)}\right] \quad (3.77)$$

- Arka piezoelektrik yığının denklemi:

$$M_{pr} \ddot{y}_{pr} = -K_{sr}\left(y_{pr} - y_{ur}\right) + K_{pr}\left(y_s + L_r \theta_s - y_{pr}\right) + (\alpha) v_{pr} \quad (3.78)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$\left[M_{pr} s^2 + (K_{sr} + K_{pr})\right] Y_{pr} = (K_{sr}) Y_{ur} + \left(K_{pr}\right) Y_s + \left(k_{pr} L_r\right) \Theta_s + (\alpha) V_{pr} \quad (3.79)$$

Arka piezoelektrik yığının dikey yer değiştirmesi şu şekilde yazılabilir:

$$Y_{pr} = B_{32} Y_{ur} + B_{33} Y_s + B_{34} \Theta_s + B_{35} V_{pr} \quad (3.80)$$

Burada,

$$B_{32} = \left[\frac{K_{sr}}{M_{pr} s^2 + (K_{sr} + K_{pr})}\right] \quad (3.81)$$

$$B_{33} = \left[\frac{K_{pr}}{M_{pr} s^2 + (K_{sr} + K_{pr})}\right] \quad (3.82)$$

$$B_{34} = \left[\frac{k_{pr} L_r}{M_{pr} s^2 + (K_{sr} + K_{pr})}\right] \quad (3.83)$$

$$B_{35} = \left[\frac{\alpha}{M_{pr} s^2 + (K_{sr} + K_{pr})}\right] \quad (3.84)$$

- Ön piezoelektrik yığının denklemi

$$M_{pf} \ddot{y}_{pf} = -K_{sf}\left(y_{pf} - y_{uf}\right) + K_{pf}\left(y_s - L_f \theta_s - y_{pf}\right) + (\alpha) V_{pf} \quad (3.85)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$\left[M_{pf} s^2 + (K_{sf} + K_{pf})\right] Y_{pf} = \left(K_{sf}\right) Y_{uf} + \left(K_{pf}\right) Y_s + \left(k_{pf} L_f\right) \Theta_s + (\alpha) V_{pf} \quad (3.86)$$

- Ön piezoelektrik yığının dikey yer değiştirmesi şu şekilde yazılabilir:

$$Y_{pf} = B_{32} Y_{uf} + B_{33} Y_s + B_{34} \Theta_s + B_{35} V_{pf} \quad (3.87)$$

Burada,

$$B_{36} = \left[\frac{K_{sf}}{M_{pf}s^2+(K_{sf}+K_{pf}}\right] \quad (3.88)$$

$$B_{37} = \left[\frac{K_{pf}}{M_{pf}s^2+(K_{sf}+K_{pf}}\right] \quad (3.89)$$

$$B_{38} = \left[\frac{k_{pf}L_f}{M_{pf}s^2+(K_{sf}+K_{pf}}\right] \quad (3.90)$$

$$B_{39} = \left[\frac{\alpha}{M_{pf}s^2+(K_{sf}+K_{pf}}\right] \quad (3.91)$$

Arka süspansiyonun eşdeğer elektrik sisteminin bünye denklemi Denklem (3.21)'den çıkarılabilir:

$$v_r = \alpha R(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{pf}) - CR\dot{v}_r \quad (3.92)$$

Benzer şekilde, ön süspansiyon eşdeğer elektrik sisteminin kurucu denklemi Denklem (3.21)'den çıkarılabilir:

$$v_f = \alpha R(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{pf}) - CR\dot{v}_f \quad (3.93)$$

Laplace dönüşümünün hem arka hem de ön denklemlere uyguladiktan sonra:

$$V_r = B_{40}Y_s + B_{41}\Theta_s - B_{40}Y_{pr} \quad (3.94)$$

$$P_r = \frac{V_r^2}{R} \quad (3.95)$$

$$V_f = B_{40}Y_s - B_{41}\Theta_s - B_{42}Y_{pf} \quad (3.96)$$

$$P_f = \frac{V_f^2}{R} \quad (3.97)$$

Burada,

$$B_{40} = \left[\frac{\alpha Rs}{CRs+1}\right] \quad (3.98)$$

$$B_{41} = \left[\frac{L_r\alpha Rs}{CRs+1}\right] \quad (3.99)$$

$$B_{42} = \left[\frac{L_f\alpha Rs}{CRs+1}\right] \quad (3.100)$$

Bir sonraki bölümde, hem çeyrek hem de yarım kamyon modellerinin davranışlarını incelemek için hareket denklemleri ve Laplace eşdeğerleri kullanılarak simülasyon yapılacaktır.

3.2.2.4. Piezoelektrik Malzeme (PZT) İçeren Lineer Olmayan Çeyrek Araba Modeli

Bu durumda dörtlenik doğrusal olmayan yay rijitliği tartışılmaktadır:

- Yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) - K_p(y_s - y_p) - \alpha v_p \quad (3.101)$$

- Yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{us}\ddot{y}_{us} = -K_{us}(y_{us} - y_R) - b_{us}(\dot{y}_{us} - \dot{y}_R) + K_4(y_p - y_{us})^4 + K_3(y_p - y_{us})^3 + K_2(y_p - y_{us})^2 + K_1(y_p - y_{us}) + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) \quad (3.102)$$

Burada,

$K_4 = 136150000\ N/m^4$

$K_3 = -24800000\ N/m^3$

$K_2 = -520000\ N/m^2$

$K_1 = 2320000\ N/m$

- Piezoelektrik elemanın denklemi:

$$M_p\ddot{y}_p = -K_4(y_s - y_{us})^4 - K_3(y_s - y_{us})^3 - K_2(y_s - y_{us})^2 - K_1(y_s - y_{us}) + K_p(y_s - y_p) + \alpha v_p \quad (3.103)$$

Eşdeğer elektrik sisteminin yönetim denklemi (3.21) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$v = \alpha R(\dot{y}_s - \dot{y}_p) - CR\dot{v} \quad (3.104)$$

Hasat edilen güç şu şekilde ifade edilebilir:

$$P = \frac{v^2}{R} \quad (3.105)$$

4. BULGULAR

4.1. PIEZOELEKTRİK YIĞIN VE KAMYON PARAMETRELERİ

Piezoelektrik seramikler, sensörler (doğrudan etki) ve aktüatörler (konvers etki) gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Sistem rezonans frekanslarında çalışmaları maksimum miktarda gerinim üretir. Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) en yaygın piezo seramiklerden biridir. Bu simülasyon için, bulunabilirliği, ekonomik maliyeti ve yüksek piezoelektrik sabiti d_{33} değeri, bulunabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle PZT-5H kullanıldı.

Çeyrek araba modelinde, yaylı kütle kamyon kasasının dörtte birini temsil ederken, yarım araba modelinde 777F araba gövdesi ağırlığının yarısını temsil eder. Yaysız kütle, bir tekerlek grubunun kütlesini temsil eder.

Tablo 4.1: Piezoelektrik yığının çeyrek araba modeli özellikleri.

Özellik	Değer	Birim	Sembol
Piezoelektrik sabiti	600	pm/V (10^{-12}m/V)	d_{33}
Elastik sabit	50	GPa	E_{33}
Dielektrik sabiti	30.975	nF/m	ε_{33}
Kütle	1300	g	M_p
Kuvvet faktörü	30000	N/V	α
Yoğunluk	7.8	g/cm^3	ρ
Elektromekanik kuplaj katsayısı	0,65	N/A	k
Kapasitans	4,5	μF	C_p
Rijitlik katsayısı	51	MN/m	K_p
İç direnç	20	kΩ	R_p

Tablo 4.2: Çeyrek araba modeli parametreleri (777F Offroad Madencilik Damperli Kamyon).

Parametre	**Değer**	**Birim**	**Sembol**
Yaylı kütle (Araba gövdesi)	22500	Kg	M_s
Yaysız kütle (lastik)	3500	kg	M_{us}
Süspansiyon yay rijitliği	2300000	N/m	K_s
Lastik rijitliği	11000000	N/m	K_s
Süspansiyon sönümleme katsayısı	46000	Ns/m	b_s
Lastik sönümleme katsayısı	26573	Ns/m	b_{us}

Tablo 4.3: Yarım araba modeli piezoelektrik yığın özellikleri.

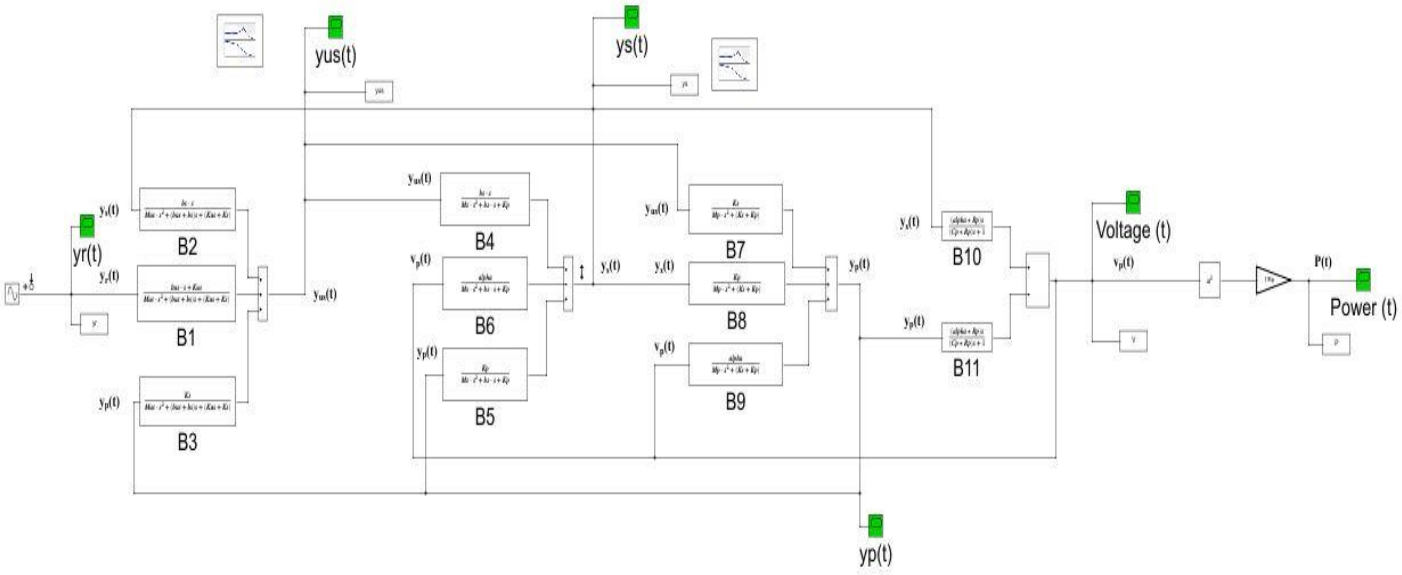
Özellik	**Değer**	**Birim**	**Sembol**
Piezoelektrik sabiti	600	pm/V (10^{-12}m/V)	d_{33}
Elastik sabit	50	GPa	E_{33}
Dielektrik sabiti	30.975	nF/m	ε_{33}
Ön ve arka piezoelektrik yığın kütlesi	1300	g	M_{pf}, M_{pr}
Yoğunluk	7.8	g/cm^3	ρ
Kuvvet faktörü	30000	N/V	α
Elektromekanik kuplaj katsayısı	0,65	N/A	k
Kapasitans	4,5	μF	C_p
Ön ve arka piezoelektrik yığın rijitliği	51	MN/m	K_{pf}, K_{pr}
İç direnç	20	kΩ	R_p

Tablo 4.4: Yarım araba modeli parametreleri (777F Offroad Madencilik Damperli Kamyon).

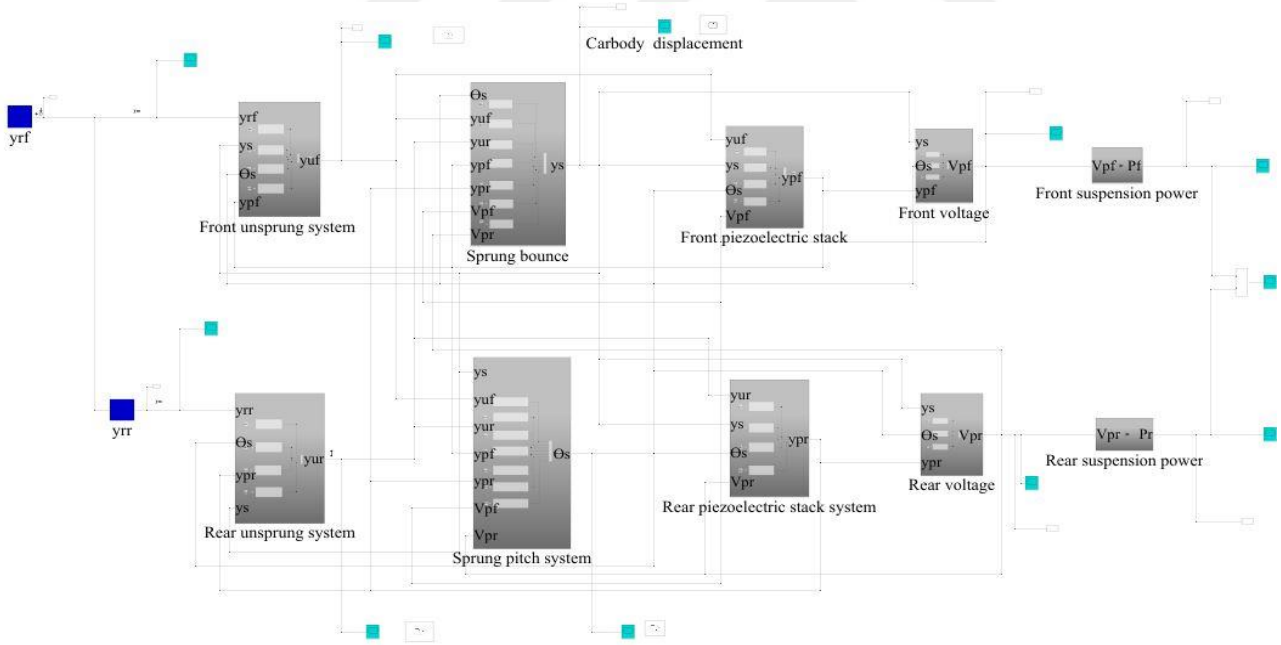
Parametre	Değer	Birim	Sembol
Yarım yaylı kütle (Araba gövdesi)	45000	Kg	M_s
Ön ve arka yaysız kütle (lastik)	3500	kg	M_{uf}, M_{ur}
Ön ve arka süspansiyon yay rijitliği	2300000	N/m	K_{sf}, K_{sr}
Ön ve arka lastik rijitliği	11000000	N/m	K_{uf}, K_{ur}
Ön ve arka süspansiyon sönümleme katsayısı	46000	Ns/m	b_{sf}, b_{sr}
Ön ve arka lastik sönümleme katsayısı	26573	Ns/m	b_{us}, b_{ur}

4.2. STEP GİRİŞ YANITI

Bir step (adım) işlevi (veya merdiven işlevi), farklı aralıklarla (parçalar) sabiti temsil eder. Simülasyon alanındaki en kullanışlı fonksiyonlardan biridir. Basitçe, girişteki bir başlangıç değerinden (genellikle sıfır) t = a zamanında (a bir sabittir) sonlu bir değere değişiklik olarak tanımlanabilir.



Şekil 4.1: Hareket denklemlerinin transfer fonksiyonlarını kullanan ÇAM Simulink gösterimi.

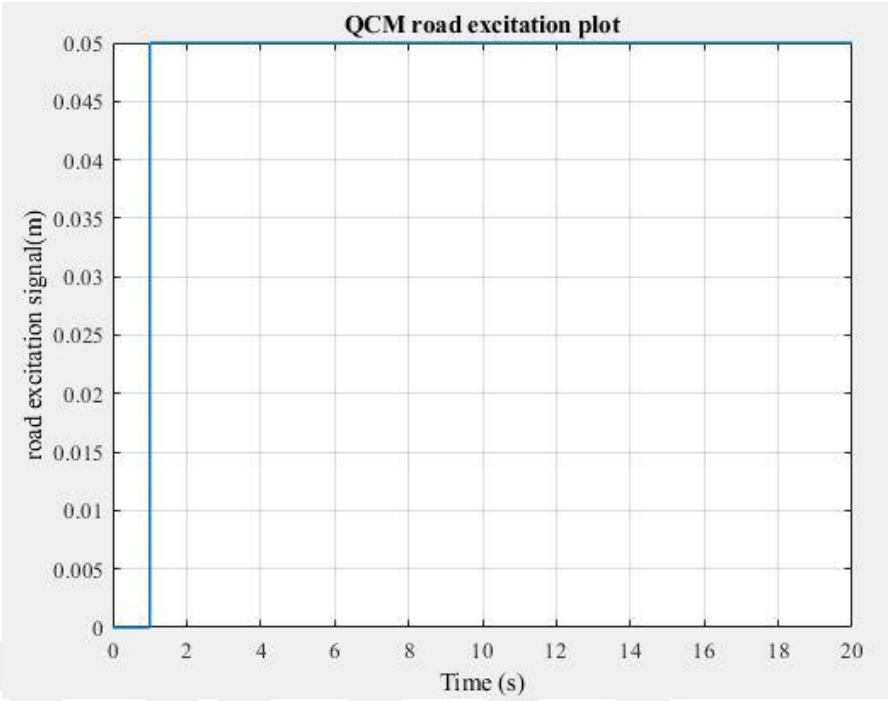


Şekil 4.2: Piezoelektrik yığınlı YAM'nin MATLAB Simulink model gösterimi.

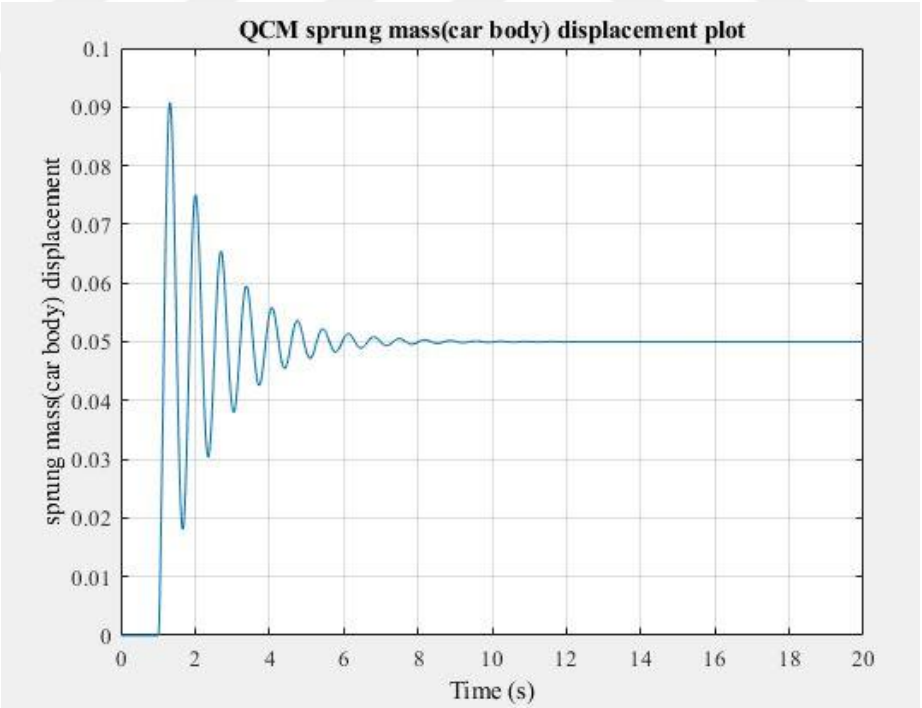
4.2.1. ÇAM Adım Giriş Yanıtı

Bu simülasyonda, aşağıdaki adım fonksiyonu (1s sonra sabit 0.05m) kullanılacaktır:

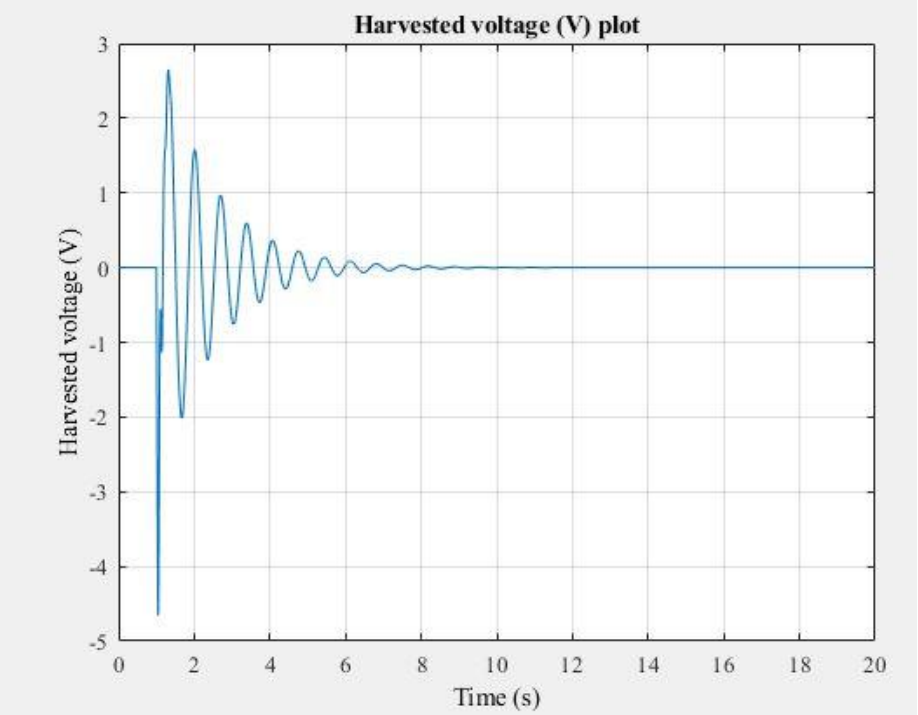
$$\text{Adım Girişi: } y_r = \begin{cases} 0 & for\ \ 0 \le t < 1s \\ 0.05(m) & for\ \ 1 \le t \le 20s \end{cases} \tag{4.1}$$



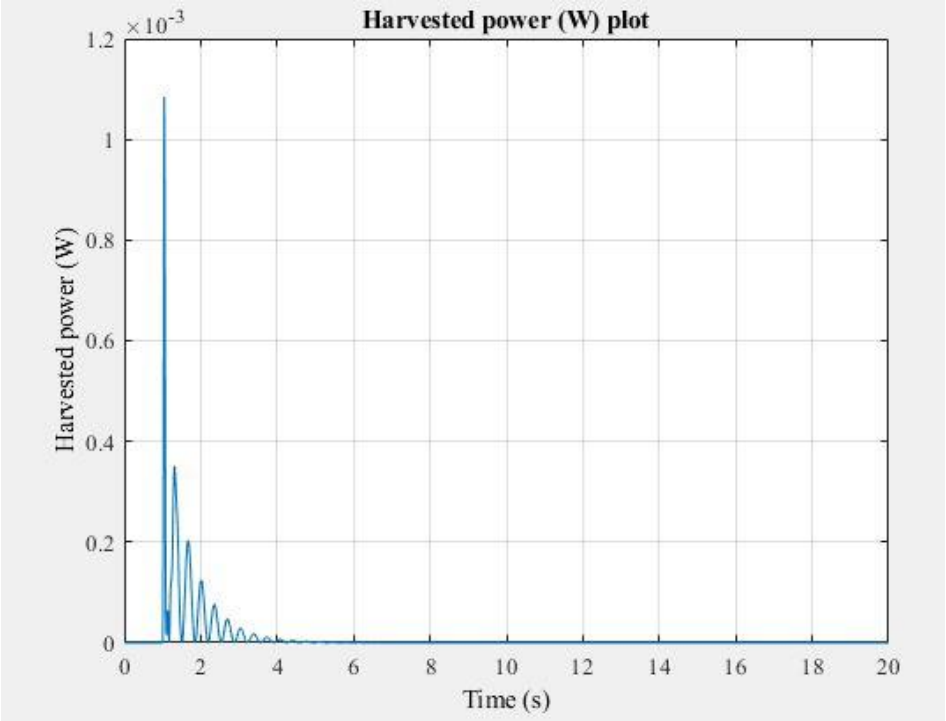
Şekil 4.3: ÇAM adım girişi.



Şekil 4.4: ÇAM adım girişi araba gövdesi yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.5: ÇAM adım girişi toplanan voltaj grafiği (v).



Şekil 4.6: ÇAM adım girişi toplanan güç grafiği (w).

4.2.2. YAM Adım Giriş Yanıtı.

Bir yol üzerinde hareket eden arabanın hızı u, uyarma frekansı f ve yol (doku dalga boyu) dalga boyu λ 'dan etkilenir. Kabin hızı ve uyarma frekansı arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

$$u=\lambda f \tag{4.2}$$

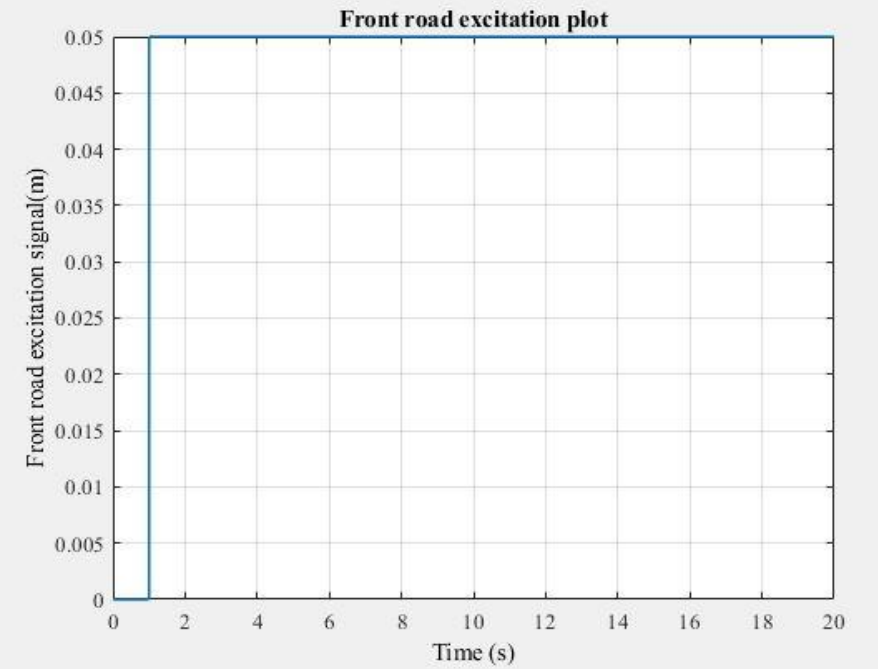
Burada u kabin hızıdır[m/s]; λ yol dalga uzunluğudur[m] ve f frekanstır[Hz].

Bu simülasyonlar için aşağıdaki fonksiyonlar kullanılacaktır:

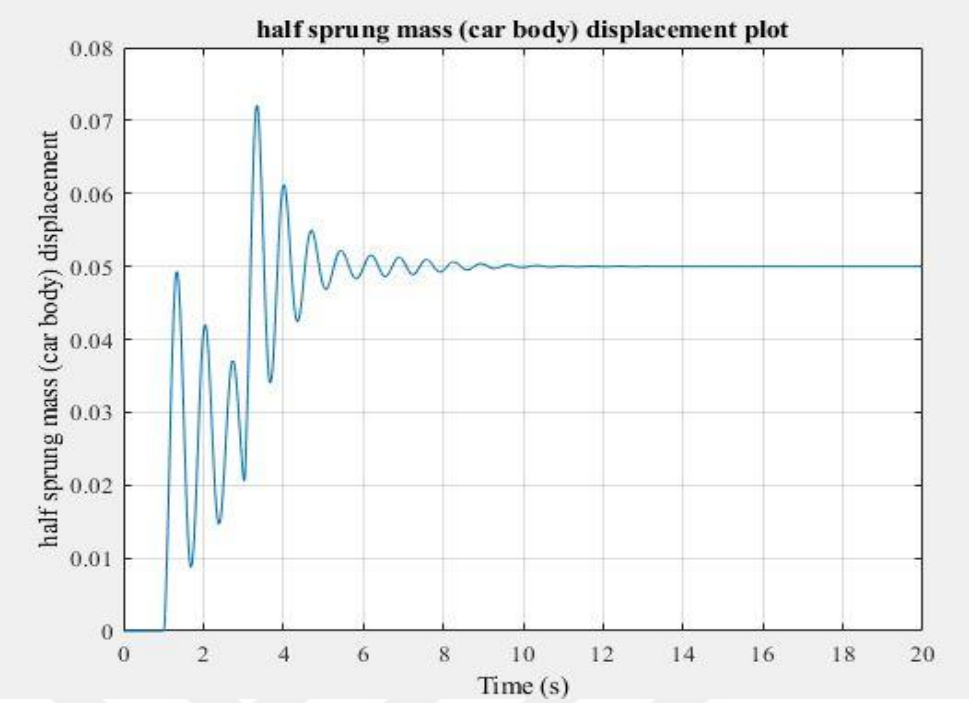
- Ön lastik adım girişi: $y_{Rf} = \begin{cases} 0 & 0 \le t < 1s \; için \\ 0.05(m) & 1s \le t \le 20s \; için \end{cases}$ (4.3)
- Arka lastik adım girişi: $y_{Rr} = y_{Rf}(t-\tau)$. Burada τ arka lastikteki zaman gecikmesidir $\tau = \frac{L\ (Dingil\ açıklığı)}{u\ (araba\ hızı)}$ (4.4)

Bu durumda kamyon hızının u= 7.145 m/s (25.722 km/h) olduğu varsayılır, bu şu anlama gelir:

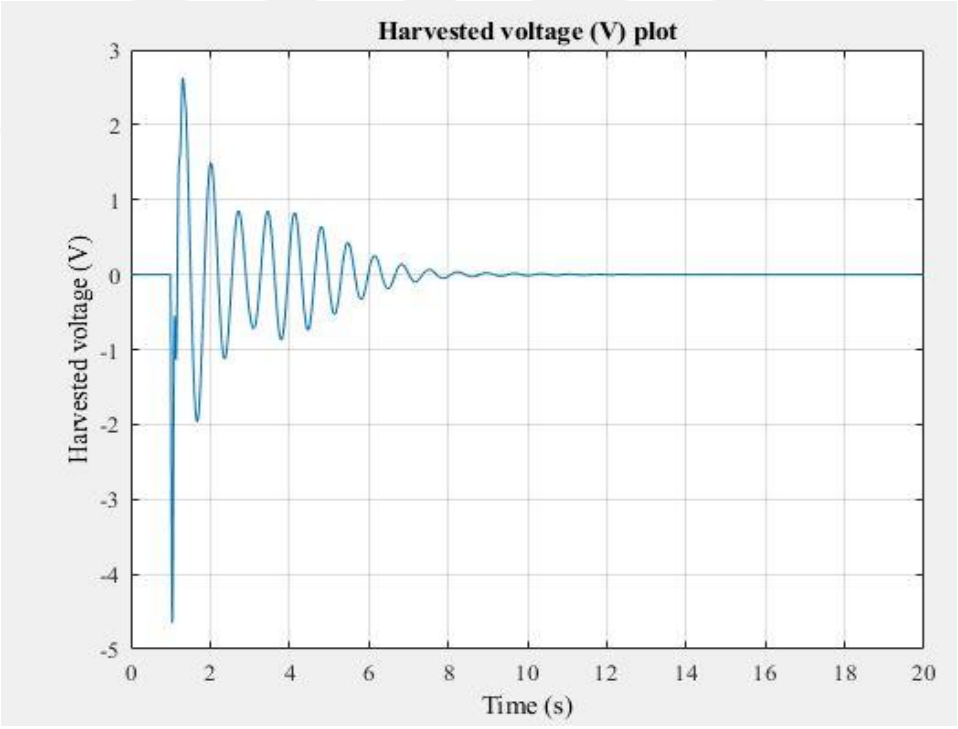
$$\tau = \frac{L\ (Dingil\ açıklığı)}{u\ (araba\ hızı)} = \frac{4.56m}{7.145\ m/s} = 0.64s. \tag{4.5}$$



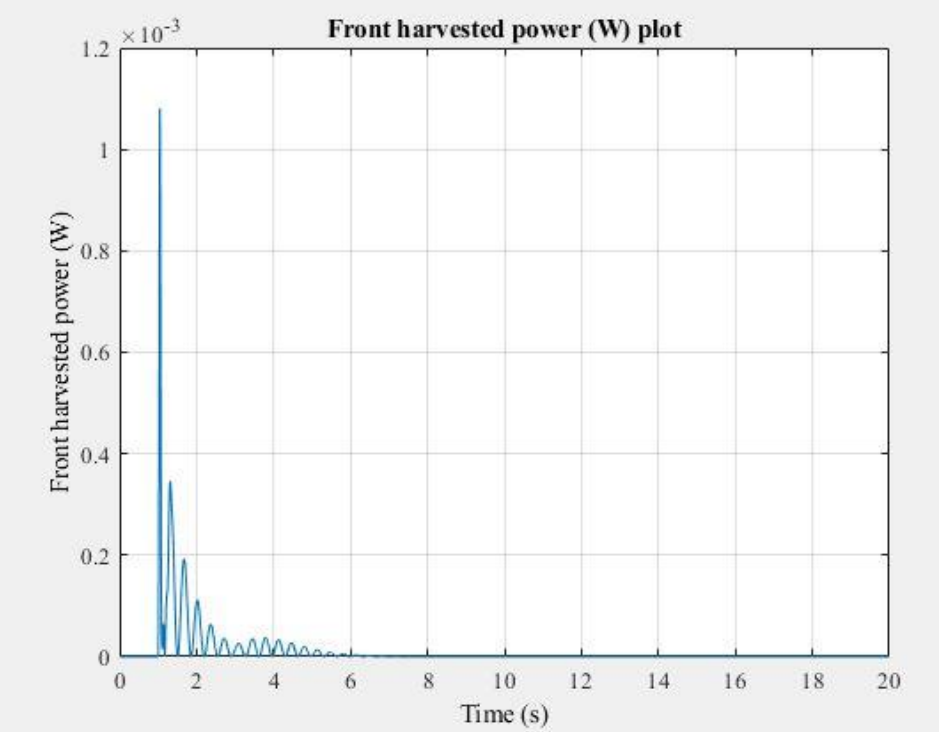
Şekil 4.7: YAM adım girişi.



Şekil 4.8: YAM adım girişi araba gövdesi yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.9: YAM adım girişi toplanan voltaj grafiği.



Şekil 4.10: YAM adım girişi toplanmış güç grafiği.

Tablo 4.5: Adım girişi yanıt özeti.

	Adım giriş genliği (m) ve zaman	Toplanmış voltaj grafiği Tepe değeri (V)	Toplanmış güç grafiği tepe değeri (W)
ÇAM	0.05(1s)	-4.658(at 1.045s)	0.001085(at 1.045s)
YAM (Ön yol girişi ve piezoelektrik yığını)	0.05(1s)	-4.649(at 1.045s)	0.001085(at 1.045s)

4.3. HARMONİK UYARMA TEPKİSİ

Zamanla değişen sinüzoidal yükler aracılığıyla belirli bir frekansta bir sistemin harmonik tepkisi, zorlanmış titreşim altındaki rezonans, yorulma ve diğer etkilere karşı direncini analiz etmeye yardımcı olur. Başka bir deyişle, bir sistemin belirli bir frekansta sinüzoidal bir dış kuvvete maruz kalmasıdır. Rezonans, uyarma frekansı sistemin doğal frekansına/frekanslarına eşit olduğunda meydana gelen bir fenomendir. Harmonik uyarım analizi, az ya da çok uyumlu dalgalı yollarda arabaların davranışlarını belirlemek için mükemmel bir araçtır.

4.3.1. Yol Dalga Boyu Sınıflandırması

Harmnik uyarıda, yol profili dokusu ISO normu 13473-1 [161]'e göre sınıflandırılabilir:

- mikro doku: $\lambda < 0,5$ mm
- makro doku: 0,5 mm$< \lambda <$ 50 mm
- mega doku: 50 mm $< \lambda <$ 0,5m
- düzgünsüzlük: 0,5 m $< \lambda <$ 50 m.

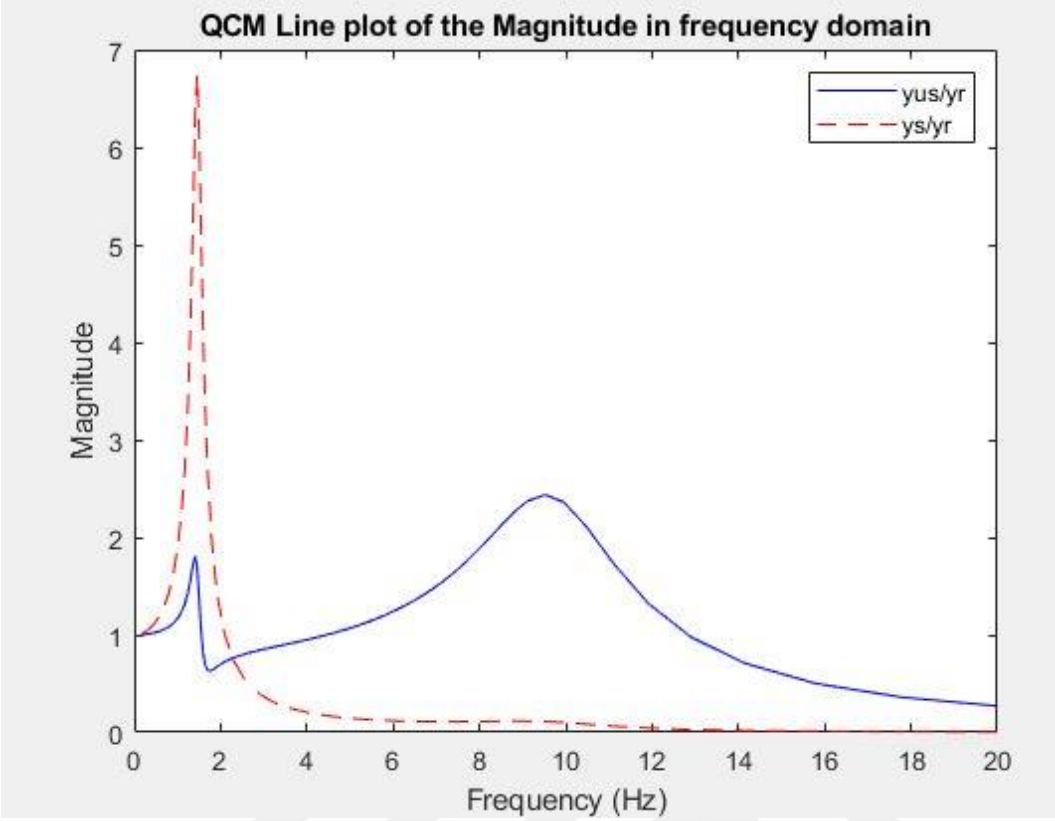
Bu çalışma için düzensiz bir yol dokusu (harmonik simülasyonlar için λ = 5m kullanılacaktır)

4.3.2. Bode Grafikları

Bode grafiği, kontrol teorisi ve kararlılık analizi gibi çeşitli disiplinlerde bir sistemin frekans yanıtını temsil eder. Bir bode grafiği genellikle bir büyüklük ve bir faz grafiğinden oluşur. Büyüklük grafiği, frekans yanıtının büyüklüğünü (mutlak değerler veya desibel cinsinden) temsil ederken, faz grafiği, frekans yanıtı faz kaymasını ifade eder. Bode grafiği, kazanç marjı ve faz marjı gibi önemli bilgiler sağlar. Büyüklük grafiği, sistemin doğal frekansları gibi ilgili bilgileri sağlar.

4.3.2.1. ÇAM'in Bode Büyüklüğü Grafiği

Büyüklükler, yaysız kütle (lastik) yer değiştirmesinin giriş yol uyarısına ve yaylı kütlenin (çeyrek araç gövdesi) giriş yol uyarımına oranını temsil eder. ÇAM'in 2 DoF'si vardır, dolayısıyla 1.454 Hz (süspansiyon yayı) ve 9.529 Hz (lastik) olmak üzere 2 rezonans frekansı sergiler. Bu doğal frekanslar, Şekil 4.9'daki grafiğin tepe noktalarında tanımlanabilir.



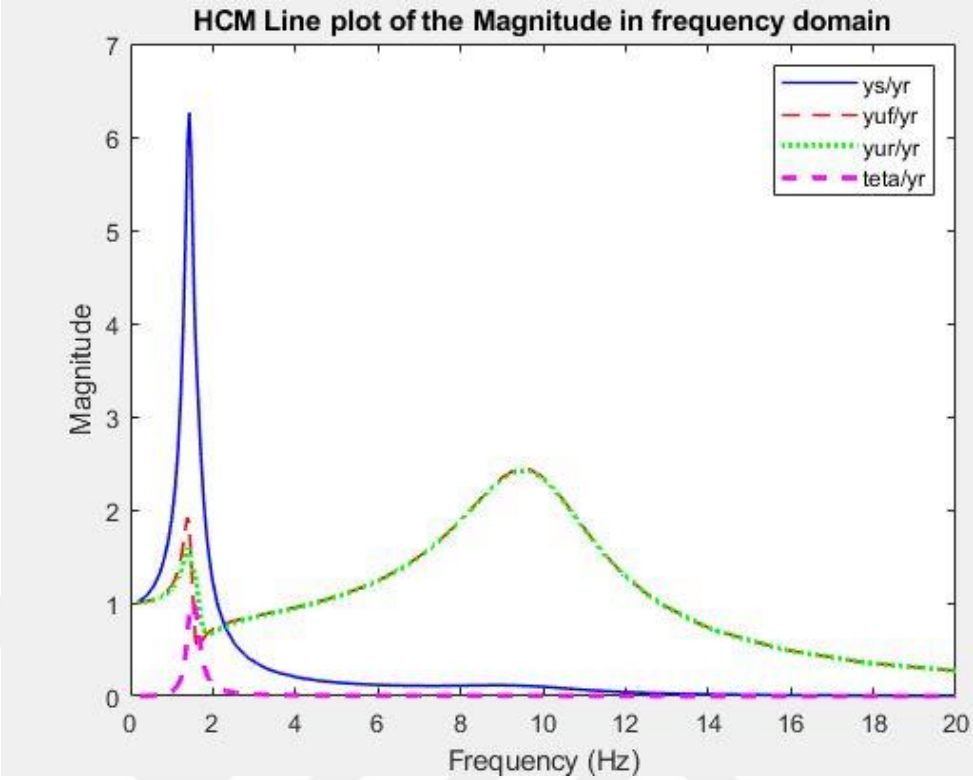
Şekil 4.11: ÇAM'in Bode büyüklük grafiği.

Tablo 4.6: ÇAM doğal frekansları.

ÇAM	Frekans (Hz)	Toplanan voltaj grafiği Tepe değeri (V)	Toplanan güç grafiği tepe değeri (W)
yaylı doğal frekans	1.454	20.63	0.02129
yaysız doğal frekans	9.529	9.606	0.004614

4.3.2.2. YAM'in Bode Büyüklük Grafiği

Büyüklükler, yaysız kütlelerin (lastikler), yaylı kütlenin (yarı araç gövdesi) ve yaylı kütle eğilme giriş yolhareketin uyarma y_r oranını temsil eder. Yarım araba modeli 4 DoF'ye sahiptir, dolayısıyla 4 rezonans frekansı sergiler: 1.429 Hz (yaylı kütle), 1.004 Hz (eğim rezonans frekansı), 9.66 Hz (ön ve arka lastik rezonans frekansları). Bu doğal frekanslar, Şekil 4.10'daki grafiğin tepe noktalarında tanımlanabilir.



Şekil 4.12: YAM'in Bode büyüklük grafiği.

Tablo 4.7: YAM doğal frekansları.

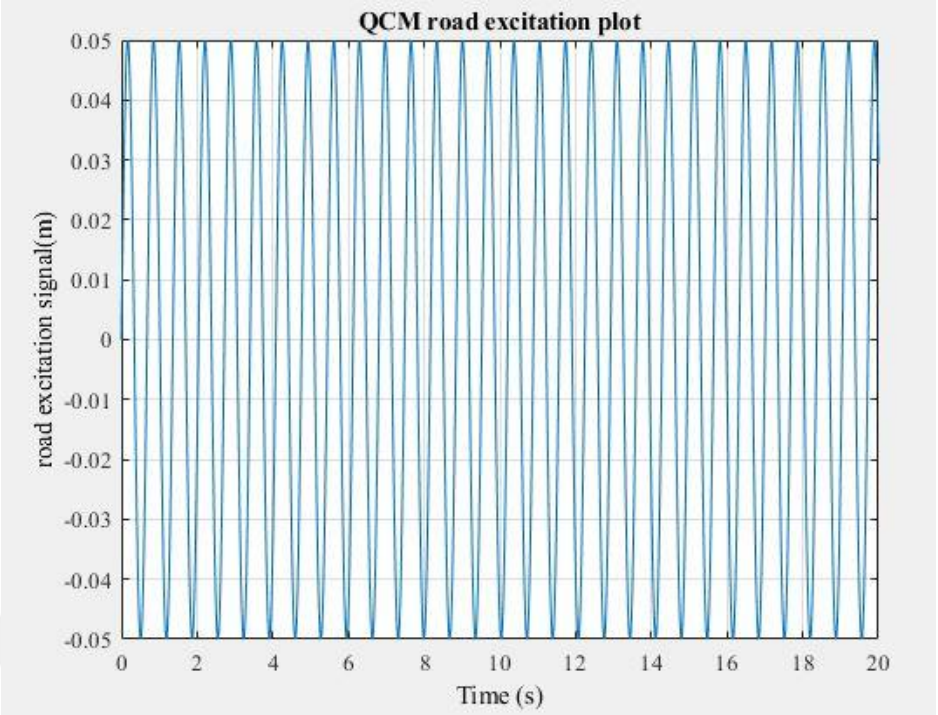
YAM	Frekans (Hz)	Toplanan voltaj grafiği Tepe değeri (V)	Toplanan güç grafiği tepe değeri (W)
yaylı doğal frekans	1.429	24.26	0.02943
Yaylı eğim doğal frekans	1.004	3.138	0.004562
Ön yaysız rezonans frekansı	9.66	9.564	0.0004923
Arka yaysız rezonans frekansı	9.66	9.564	0.004562

4.3.3. ÇAM Harmonik Uyarma Tepkisi

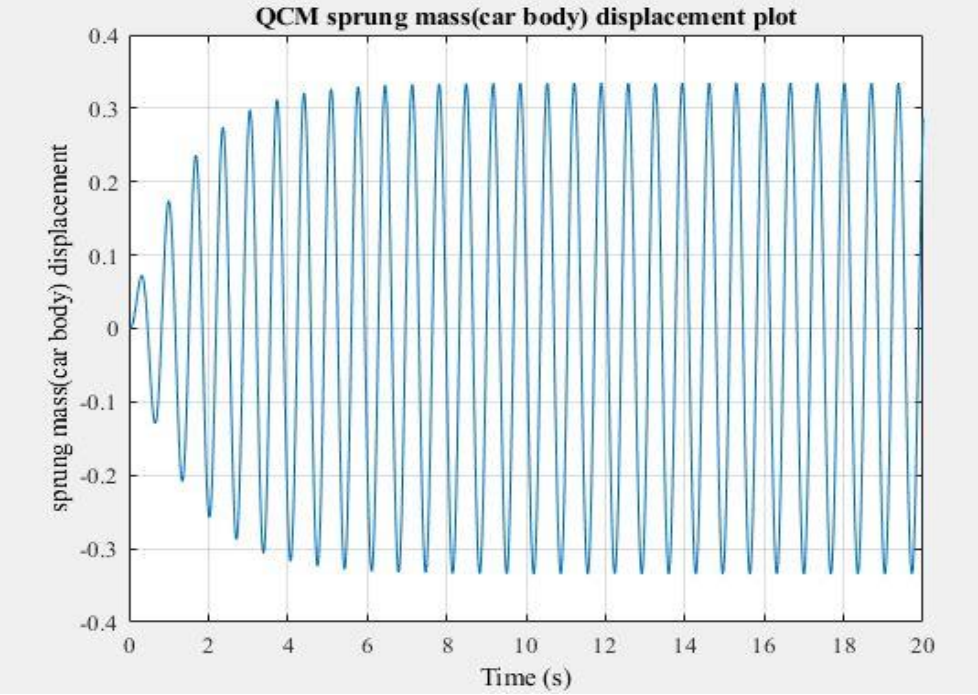
ÇAM, 0,05 m'lik bir genlik ile yaylı rezonans frekansında harmonik olarak uyarılmıştır. Yol girişi y_r şu şekilde ifade edilebilir:

$$y_r = 0.05\sin(1.454 \times 2\pi t) = 0.05\sin(9.1357t) \qquad for \;\; 0 \le t \le 20 \tag{4.6}$$

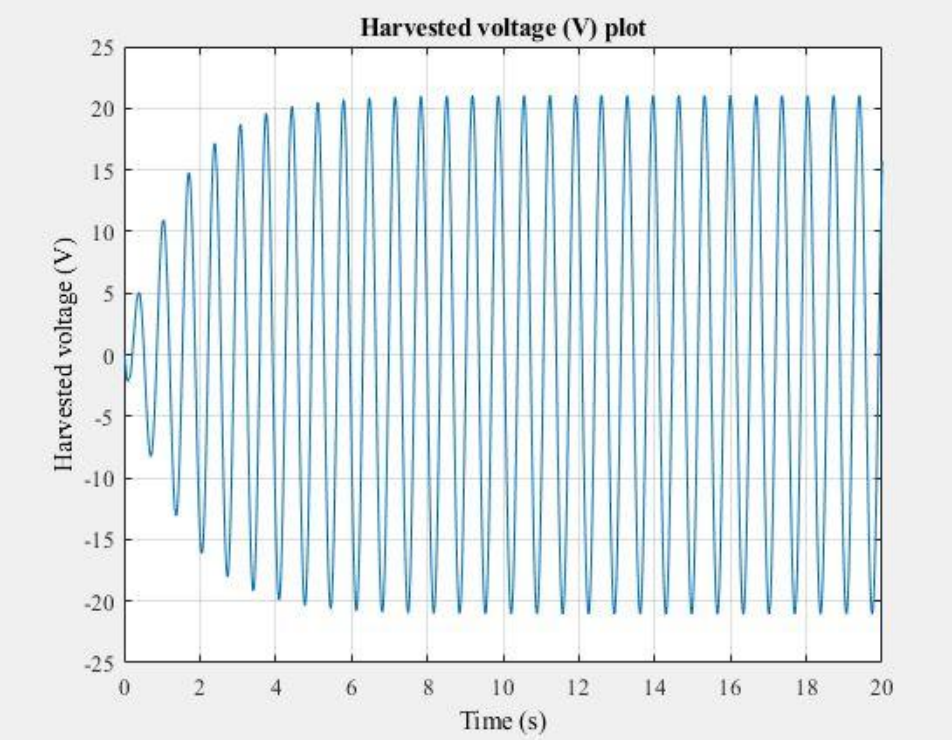
Yaylı doğal frekansta bir uyarım için, ÇAM gövdesi yer değiştirmesinin kaydedilen tepe değeri 0,3 m'dir.



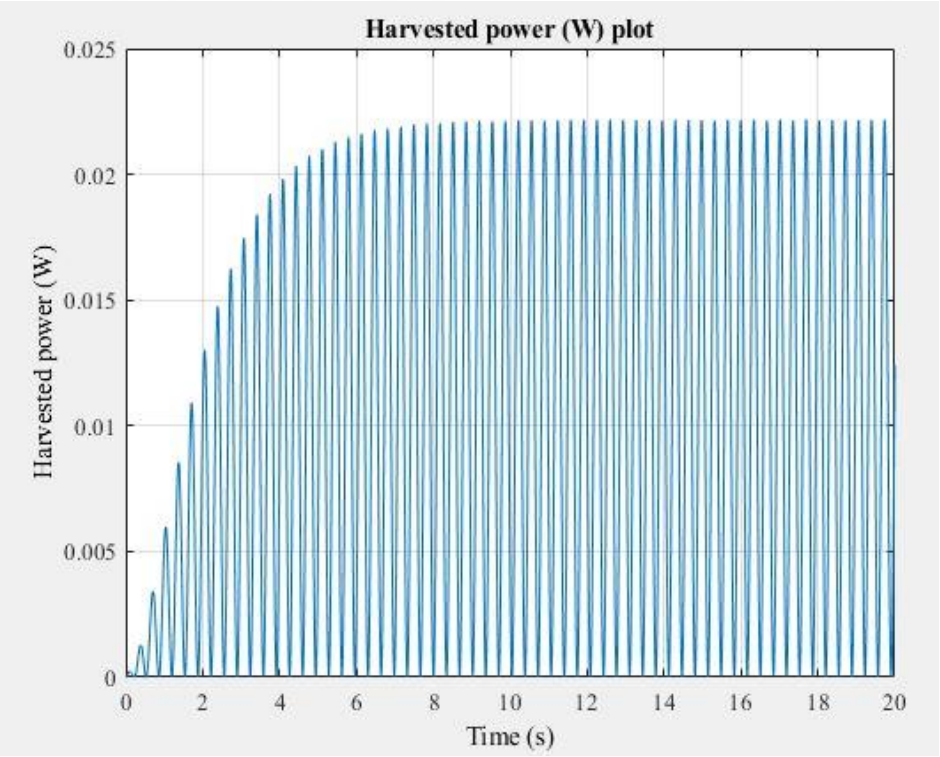
Şekil 4.13: ÇAM harmonik uyarma giriş grafiği.



Şekil 4.14: ÇAM harmonik uyarma araba gövdesi yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.15: ÇAM harmonik uyarma toplanmış voltaj grafiği.



Şekil 4.16: ÇAM harmonik uyarma toplanmış güç grafiği.

Yayılmış doğal frekansta, ÇAM'de bir uyarım için, kaydedilen maksimum toplanan voltaj 20,63V iken maksimum toplanan güç 0,02129 W'dir. Gerilimin tepe değerinin $\sqrt{2}$'ye bölünmesiyle voltajın ortalama karekökü değeri elde edilmiştir. . RMS voltajı ve gücü sırasıyla 14.59V ve 0.0007294'tür.

4.3.4. YAM Harmonik Uyarma Tepkisi

YAM'in yaysız kütleleri, 0,05 m'lik bir genlik ile yaylı rezonans frekansında harmonik olarak uyarıldı.

Ön lastik harmonik uyarımı y_{Rf} şu şekilde ifade edilebilir:

$$y_{Rf} = 0.05\sin(1.429 \times 2 \times \pi\, t) = 0.05\sin(8.97t) \qquad 0 \le t \le 20\ için \tag{4.7}$$

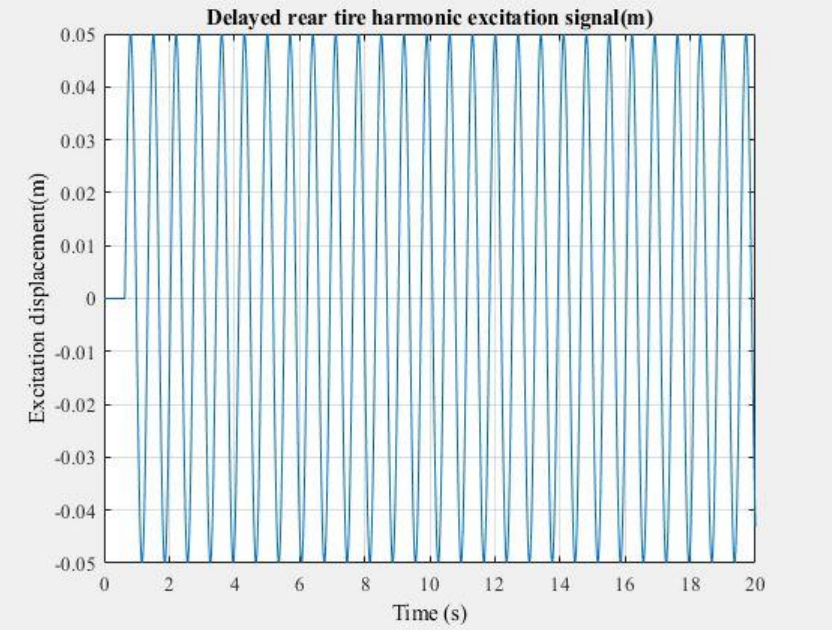
Arka lastik harmonik uyarımı y_{Rr} şu şekilde ifade edilebilir:

$$y_{Rr} = y_{Rf}(t - \tau) \tag{4.8}$$

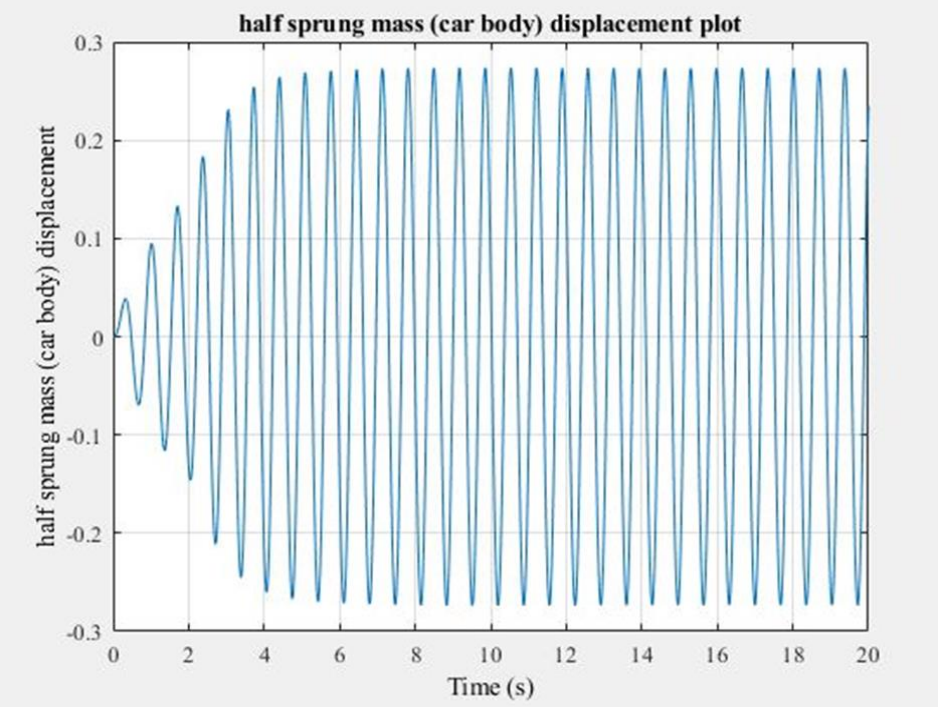
Burada τ arka lastikteki zaman gecikmesidir $\tau = \frac{L\ (Dingil\ açıklığı)}{u\ (araba\ hızı)}$

Yol dalga boyunun 5m olduğu varsayıldığında, yaylı frekans (1.429Hz) araba hızına karşılık gelir u=λf=5m x 1.429Hz =7.145 m/s (25.722 km/s).

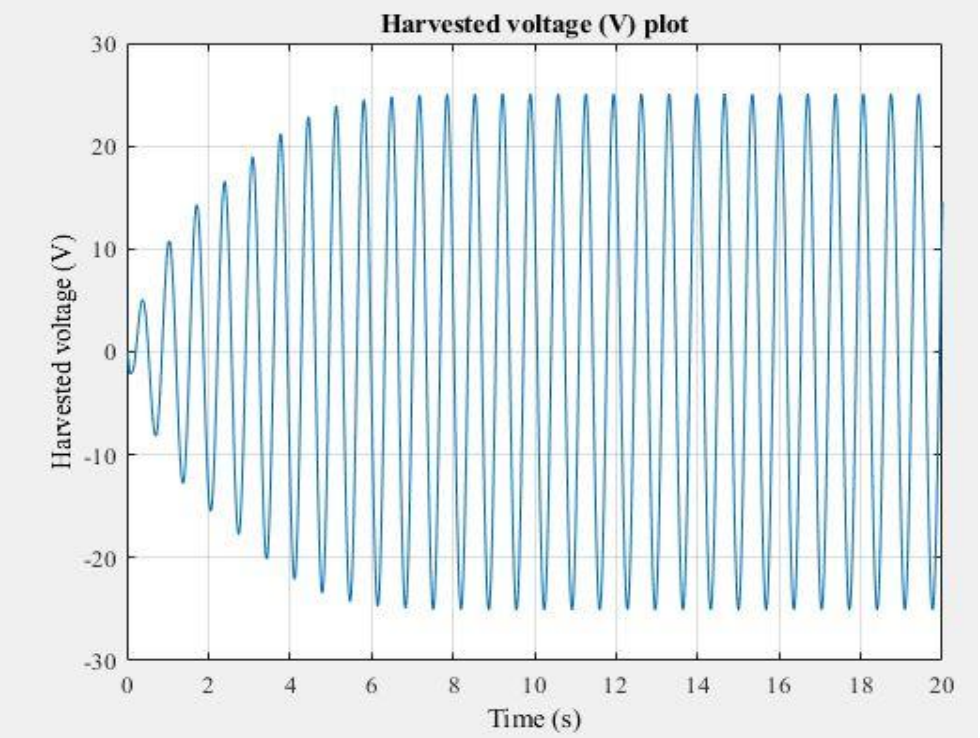
$$\tau = \frac{L\ (Dingil\ açıklığı)}{u\ (araba\ hızı)} = \frac{4.56m}{7.145\ m/s} = 0.64s$$



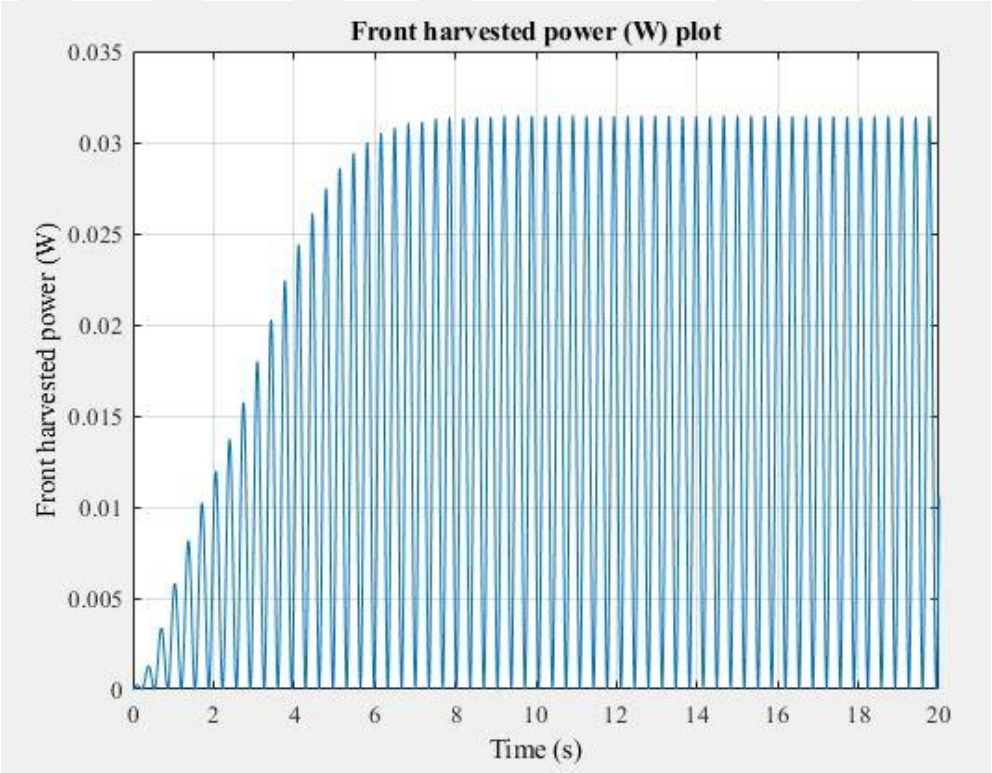
Şekil 4.17: YAM arka lastik harmonik uyarma giriş grafiği.



Şekil 4.18: YAM harmonik uyarma araba gövdesi yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.19: YAM harmonik uyarma ön yığın toplanmış voltaj grafiği.



Şekil 4.20: YAM harmonik uyarma ön yığın toplanmış voltaj grafiği.

Yaylı doğal frekansta YAM'e harmonik bir uyarım uygulayarak, maksimum toplanan voltaj 24,83 V iken, maksimum toplanan güç 0,03082'dir. Gerilimin ortalama karekökü değeri $\sqrt{2}$'ye bölünerek hesaplanmıştır. RMS voltajı ve gücü sırasıyla 17,56 V ve 0,0008779 W'dir. ÇAM'e göre RMS voltaj ve güç değerlerinde %20.36'lık bir artış vardır.

Tablo 4.8: ÇAM harmonik uyarma sonuçları.

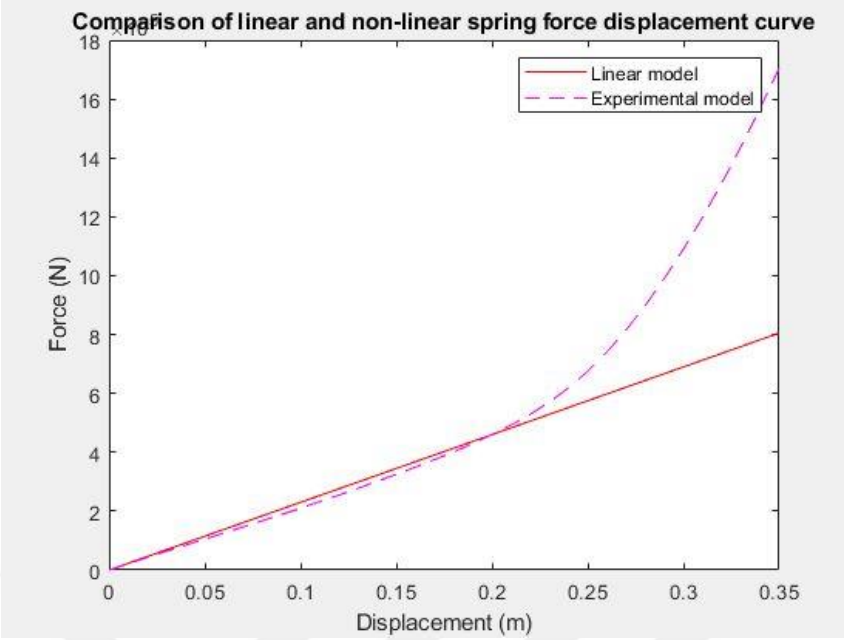
ÇAM	Frekans (Hz)	Toplanan voltaj grafiği Tepe değeri (V)	RMS voltajı (V)	Toplanan güç grafiği tepe değeri (W)	RMS gücü (W)
yaylı rezonans frekansı	1.454	20.63	14.59	0.02129	0.0007294
yaysız rezonans frekansı	9.529	9.606	6.79	0.004614	0.0003396

Tablo 4.9: YAM harmonik uyarma sonuçları.

YAM	Frekans (Hz)	Toplanan voltaj grafiği Tepe değeri (V)	RMS voltajı (V)	Toplanan güç grafiği tepe değeri (W)	RMS gücü (W)
yaylı rezonans frekansı	1.429	24.83	17.56	0.03082	0.0008779
yaylı eğim doğal frekans	1.004	3.138	2.22	0.004562	0.0001109
Ön yaysız doğal frekans	9.66	9.564	6.76	0.0004923	0.0003381
Arka yaysız doğal frekans	9.66	9.564	6.76	0.004562	0.0003381

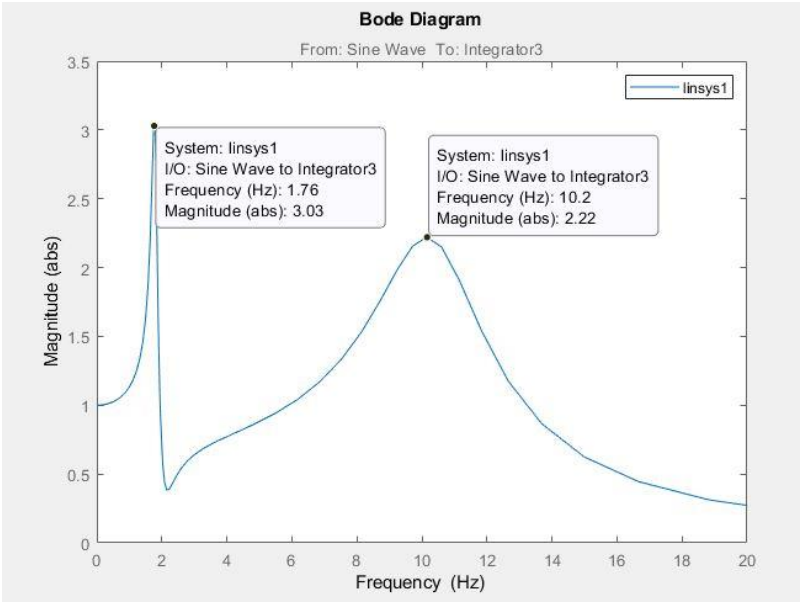
4.3.5. Doğrusal olmayan QCM harmonik Uyarma

Süspansiyon sistemindeki en yaygın doğrusal olmama türleri, ikinci dereceden, kübik ve dörtlenik sertlik, sürtünme sönümlemesi, ve bileşenlerin boşlukları ve geri tepmesidir. Süspansiyon yayının dörtlenik doğrusal olmaması bu çalışmada tartışılmıştır. Teorik olarak, yayın davranışının doğrusal olduğu varsayılır. Pratikte, süspansiyon yayları nispeten küçük ve orta yükler için yarı doğrusal bir davranış sergiler. Yükler yeterince büyük olduğunda, Şekil 4.21'deki örnekte gösterildiği gibi, süspansiyon yaylarında doğrusal olmayan davranışa yol açan yer değiştirme oranı düşer.



Şekil 4.21: Doğrusal ve doğrusal olmayan yayların kuvvet-yer değiştirme eğrisi karşılaştırması.

Sonuç olarak, piezoelektrik yığın daha az strese maruz kalır ve daha az güç üretir. Doğrusal olmayan modeldeki araba gövdesi ve piezoelektrik yığını, Şekil 4.22'de gösterildiği gibi azalır. Bu, lineer modelden daha düşük bir elektrik çıkışına yol açar. Çıktı toplama performanslarını düşürmesine rağmen, doğrusal olmayan model sürüş kalitesini ve konforunu iyileştirir (araç gövdesi titreşim genliği, doğrusal olmayan model için doğrusal modele göre daha düşüktür).



Şekil 4.22: Önerilen doğrusal olmayan modelin Bode genlik grafiği (cardody yer değiştirmesinden harmonik uyarma oranına).

Lineer olmayan model, literatürden deneysel veriler ve MATLAB polinom uydurma yinelemeli araçlar kullanılarak önerildi. Önerilen doğrusal olmayan modeldeki yay kuvveti şu şekilde ifade edilebilir:

$$f_k = K_3(y_s - y_{us})^3 + K_2(y_s - y_{us})^2 + K_1(y_s - y_{us}) + K_0 \times 1m \quad (3.9)$$

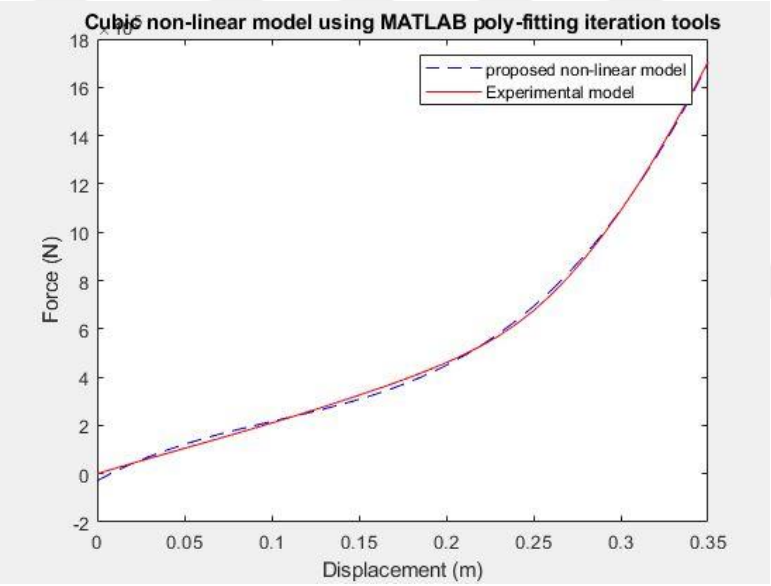
Burada,

$K_3 = 70504000\ N/m$

$K_2 = -21766000 N/m$

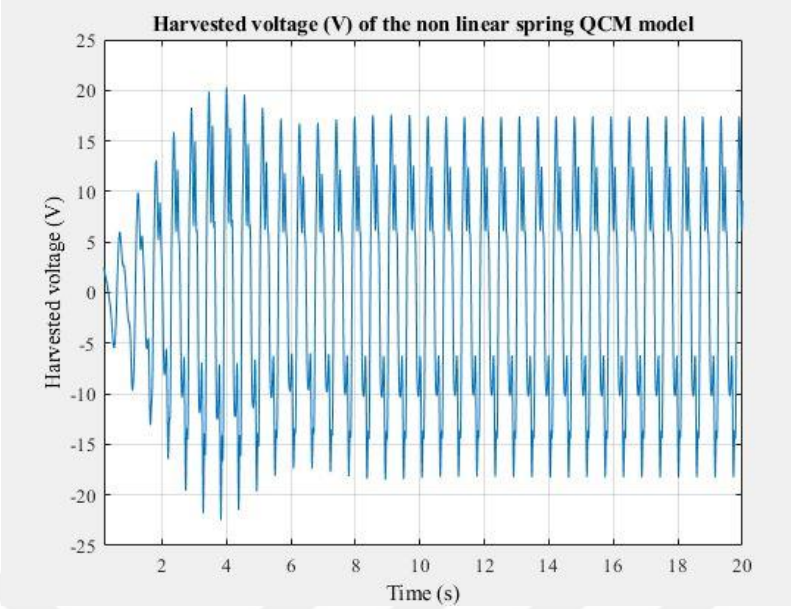
$K_1 = 3920000\ N/m$

$K_0 = -28000\ N/m$



Şekil 4.23: Önerilen doğrusal olmayan model.

Doğrusal olmayan QCM hasat edilmiş voltaj tepe değeri (yaylı rezonans frekansında) 22.7V'dir. Karşılık gelen RMS voltaj değeri 16.05V'dir. Daha düşük titreşim seviyeleri nedeniyle doğrusal olmayan model performansında %9'luk bir düşüş kaydedildi.



Şekil 4.24: Doğrusal olmayan model harmonik uyarmada toplanmış voltaj grafiği.

4.3.6. Frekans Alanı Analizi

Frekans alanı analizi, matematiksel fonksiyonların veya sinyallerin zamandan ziyade frekansa göre gözlemlenmesidir. Frekans alanı analizinin temel amaçlarından biri, sinyalin özelliklerini analiz etmektir. Bu tür bir analiz, uzay veya zaman alanını Laplace veya Fourier dönüşümü yoluyla frekans alanına dönüştürerek yapılabilir. Laplace dönüşümünü kullanmak, değişkeni zamandan s alanına (frekans alanı olarak da bilinir) değiştirmeye izin verir. Bu işlemi tersine çevirmek için ters Fourier dönüşümü kullanılabilir. Zaman alanı analizi, bir sinyalin zaman içinde nasıl değiştiğini açıklarken, bir frekans alanı analizi, bir frekans aralığında bulunan sinyallerin sayısını temsil eder. Osiloskop (skop olarak da bilinir), sinyalleri zamanın fonksiyonları olarak 2B grafiklerde temsil etmek için kullanılan görüntüleme cihazıdır. Spektrum analizörü, sinyalleri frekansın fonksiyonları olarak temsil etmek için kullanılan cihazdır.

4.3.6.1. Frekans Alanı Analizinin Avantajları

Bir zaman alanı analizi kullanılarak birkaç sinyal özelliği gözlemlenmeyebilir veya görülemeyebilir. Frekans alanı sayesinde, bu gizli özellikler kolayca alınabilir. Örneğin, frekans alanı analizi, bir sinyalin döngüsel davranışını kolayca elde etmeyi sağlar. Ayrıca frekans alanında, sistemi tasarlamak ve ayarlamak çok kolaydır. Buna ek olarak, sistem lineer olmasa bile frekans alanı analizi yapılabilir. Gürültüye ve parametre değişimine karşı sistem

hassasiyetini ölçmek için basit, doğru ve çok uygundur. Son olarak, yüksek mertebeden diferansiyel denklemlerin analitik çalışması karmaşıktır. Dolayısıyla frekans alanı daha iyi bir alternatifi temsil eder.

4.3.6.2. ÇAM ve YAM denklemlerinin Laplace Dönüşümü..

Piezoelektrik yığını ile çeyrek araba modeli hareket denklemleri

- Yaylı kütle (araba gövdesi) hareket denklemi:

$$\ddot{y}_s = \frac{1}{M_s}[-b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) - K_p(y_s - y_p) - \alpha v_p] \quad (4.9)$$

- Yaysız kütle (lastik) hareket denklemi:

$$\ddot{y}_{us} = \frac{1}{M_{us}}[-K_{us}(y_{us} - y_R) - b_{us}(\dot{y}_{us} - \dot{y}_R) + K_s(y_p - y_{us}) + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us})] \quad (4.10)$$

- Piezoelektrik yığın denklemi:

$$\ddot{y}_p = \frac{1}{M_p}[-K_s(y_p - y_{us}) + K_p(y_s - y_p) + \alpha v_p] \quad (4.11)$$

- ÇAM voltaj denklemi:

$$v = \alpha R(\dot{y}_s - \dot{y}_p) - CR\dot{v} \quad \Leftrightarrow \quad \dot{v} = \frac{\alpha}{C}(\dot{y}_s - \dot{y}_p) - \frac{1}{CR}v \quad (4.12)$$

Piezoelektrik yığını ile yarım araba modeli hareket denklemleri:

- Ön yaysız kütle (ön lastik) denklemi:

$$M_{uf}\ddot{y}_{uf} = -b_{uf}(\dot{y}_{uf} - \dot{y}_{Rf}) - K_{uf}(y_{uf} - y_{Rf}) + b_{sf}(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}) + K_{sf}(y_{pf} - y_{uf}) \quad (4.13)$$

Arka yaysız kütle (arka lastik) denklemi:

$$M_{ur}\ddot{y}_{ur} = -b_{ur}(\dot{y}_{ur} - \dot{y}_{Rr}) - K_{ur}(y_{ur} - y_{Rr}) + b_{sr}(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) + K_{sr}(y_{pr} - y_{ur}) \quad (4.14)$$

Yarım yaylı kütle (araba gövdesi) denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -b_{sf}(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}) - b_{sr}(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) - K_{pf}(y_s - L_f\theta_s - y_{pf}) - K_{pr}(y_s + L_r\theta_s - y_{pr}) - (\alpha)v_{pf} - (\alpha)v_{pr} \quad (4.15)$$

Yarım yaylı kütle (araba gövdesi) eğim hareketi denklemi:

$$I_s\ddot{\theta}_s = L_f\left(b_{sf}\left(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}\right) + K_{pf}\left(y_s - L_f\theta_s - y_{pf}\right) + \alpha v_{pf}\right) -$$
$$L_r\left(b_{sr}\left(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}\right) + K_{pr}\left(y_s + L_r\theta_s - y_{pr}\right) + \alpha v_{pr}\right) \quad (4.16)$$

Ön piezoelektrik yığın kütle denklemi:

$$M_{pf}\ddot{y}_{pf} = -K_{sf}\left(y_{pf} - y_{uf}\right) + K_{pf}\left(y_s - L_f\theta_s - y_{pf}\right) + (\alpha)V_{pf} \quad (4.17)$$

Arka piezoelektrik yığın kütle denklemi:

$$M_{pr}\ddot{y}_{pr} = -K_{sr}\left(y_{pr} - y_{ur}\right) + K_{pr}\left(y_s + L_r\theta_s - y_{pr}\right) + (\alpha)v_{pr} \quad (4.18)$$

Buradaö θ_s açısal yer değiştirmeyi (rad) temsil eder,

I_s, eylemsizlik (atalet) momentini (kg.m2) temsil eder,

L_f, ön dingil mesafesini (m) temsil eder,

L_r, arka dingil mesafesini (m) temsil eder,

y_s, yarı yaylı kütlenin (yarı araba gövdesi) dikey yer değiştirmesini temsil eder,

y_{uf} ön yaysız kütlenin (ön lastik) dikey yer değiştirmesini temsil eder,

y_{ur} arka yaysız kütlenin (arka lastik) dikey yer değiştirmesini temsil eder,

y_{Rf}, arabanın önündeki yolun dikey uyarılmasını temsil eder,

y_{Rr}, arabanın arkasındaki yolun dikey uyarılmasını temsil eder.

Piezoelektrik yığın olmadan ÇAM Laplace dönüşümü:

- Yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{us}\ddot{y}_{us} = K_s(y_s - y_{us}) + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) - K_{us}(y_{us} - y_R) - b_{us}(\dot{y}_{us} - \dot{y}_R) \quad (4.19)$$

Laplace dönüşümü uygulayarak, değişkenleri zaman alanından s alanına (frekans alanı olarak da bilinir) değiştirebiliriz:

$$[M_{us}s^2 + (b_{us} + b_s)s + (K_{us} + K_s)]Y_{us} = (b_{us}s + K_{us})Y_R + (b_s s + K_s)Y_s \quad (4.20)$$

- Yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -K_s(y_s - y_{us}) - b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) \quad (4.21)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım

$$[M_s s^2 + b_s s + K_s]Y_s = (b_s s + K_s)Y_{us} \quad (4.22)$$

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{us} \\ Y_s \end{pmatrix}; M = \begin{pmatrix} M_{us} & 0 \\ 0 & M_s \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} b_{us} + b_s & -b_s \\ -b_s & b_s \end{pmatrix}; K = \begin{pmatrix} K_{us} + K_s & -K_s \\ -K_s & K_s \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} (b_{us}s + K_{us})Y_R \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Burada:

• Y yer değiştirme matrisidir

• M kütle matrisidir

• B, sönümleme matrisidir

• K rijitilik matrisidir

• F, yol giriş kuvveti matrisidir

$$(M.s^2 + B.s + K).Y = F \quad (4.24)$$

$$\begin{pmatrix} M_{us}s^2 + (b_{us} + b_s)s + (K_{us} + K_s) & -(b_s s + K_s) \\ -(b_s s + K_s) & M_s s^2 + b_s s + K_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{us} \\ Y_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (b_{us}s + K_{us})Y_R \\ 0 \end{pmatrix}$$

<u>Piezoelektrik yığın olmadan YAM'nin Laplace dönüşümü:</u>

Ön yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{uf}\ddot{y}_{uf} = K_{uf}(y_{uf} - y_{Rf}) - b_{uf}(\dot{y}_{uf} - \dot{y}_{Rf}) + K_{sf}(y_s - L_f\theta_s - y_{uf}) + b_{sf}(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}) \quad (4.25)$$

Laplace dönüşümü uygulayarak, değişkenleri zaman alanından s alanına (frekans alanı olarak da bilinir) değiştirebiliriz:

$$[M_{uf}s^2 + (b_{sf} + b_{uf})s + (K_{sf} + K_{uf})]Y_{uf} = (b_{uf}s + K_{uf})Y_{Rf} + (b_{sf}s + K_{sf})Y_s + (-b_{sf}L_f s - K_{sf}L_f)\Theta_s \quad (4.26)$$

- Ön yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{ur}\ddot{y}_{ur} = K_{ur}(y_{ur} - y_{Rr}) - b_{ur}(\dot{y}_{ur} - \dot{y}_{Rr}) + K_{sr}(y_s + L_r\theta_s - y_{ur}) + b_{sr}(\dot{y}_s - L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) \quad (4.27)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_{ur}s^2 + (b_{sr} + b_{ur})s + (K_{sr} + K_{ur})]Y_{ur} = (b_{ur}s + K_{ur})Y_{Rr} + (b_{sr}s + K_{sr})Y_s + (b_{sr}L_r s + K_{sr}L_r)\Theta_s \quad (4.28)$$

- Yaylı kütlenin açısal hareketinin denklemi:

$$I_s\ddot{\theta}_s = L_f\left[K_{sf}\left(y_s - L_f\theta_s - y_{uf}\right) + b_{sf}\left(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}\right)\right] - L_r\left[K_{sr}(y_s + L_r\theta_s - y_{ur}) + b_{sr}\left(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}\right)\right] \quad (4.29)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$\left[I_s s^2 + \left(b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2\right)s + (K_{sf}L_f^2 + K_{sr}L_r^2)\right]\Theta_s = \left[\left(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r\right)s + \left(k_{sf}L_f - K_{sr}L_r\right)\right]Y_s + \left(-b_{sf}L_f s - K_{sf}L_f\right)Y_{uf} + (b_{sr}L_r s + K_{sr}L_r)Y_{ur} \quad (4.30)$$

Yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -K_{sf}\left(y_s - L_f\theta_s - y_{uf}\right) - b_{sf}\left(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}\right) - K_{sr}(y_s + L_r\theta_s - y_{ur}) - b_{sr}\left(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}\right) \quad (4.31)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$\left[M_s s^2 + \left(b_{sf} + b_{sr}\right)s + (K_{sf} + K_{sr})\right]Y_s = \left[\left(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r\right)s + \left(K_{sf}L_f - K_{sr}L_r\right)\right]\Theta_s + \left(b_{sf}s + K_{sf}\right)Y_{uf} + (b_{sr}s + K_{sr})Y_{ur} \quad (4.32)$$

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{uf} \\ Y_{ur} \\ \Theta_s \\ Y_s \end{pmatrix}; M = \begin{pmatrix} M_{uf} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{ur} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_s \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} b_{uf} + b_{sf} & 0 & b_{sf}L_f & -b_{sf} \\ 0 & b_{ur} + b_{sr} & -b_{sr}L_r & -b_{sr} \\ b_{sf}L_f & -b_{sr}L_r & b_{sf}{L_f}^2 + b_{sr}{L_r}^2 & b_{sr}L_r - b_{sf}L_f \\ -b_{sf} & -b_{sr} & b_{sf}L_f - b_{sr}L_r & b_{sf} + b_{sr} \end{pmatrix};$$

$$K = \begin{pmatrix} K_{uf} + K_{sf} & 0 & K_{sf}L_f & -K_{sf} \\ 0 & K_{ur} + K_{sr} & -K_{sr}L_r & -K_{sr} \\ K_{sf}L_f & -K_{sr}L_r & K_{sf}{L_f}^2 + K_{sr}{L_r}^2 & K_{sr}L_r - K_{sf}L_f \\ -K_{sf} & -K_{sr} & K_{sr}L_r - K_{sf}L_f & K_{sf} + K_{sr} \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} \left(b_{uf}s + K_{uf}\right)Y_{Rf} \\ (b_{ur}s + K_{ur})Y_{Rr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Burada:

• Y yer değiştirme matrisidir

• M kütle matrisidir

• B, sönümleme matrisidir

• K rijitilik matrisidir

• F, yol giriş kuvveti matrisidir

$$(M.s^2 + B.s + K).Y = F \quad (4.24)$$

$$\begin{pmatrix} M_{uf}s^2 + (b_{sf} + b_{uf})s + (K_{sf} + K_{uf}) & 0 & b_{sf}L_f s + K_{sf}L_f & -(b_{sf}s + K_{sf}) \\ 0 & M_{ur}s^2 + (b_{sr} + b_{ur})s + (K_{sr} + K_{ur}) & -(b_{sr}L_r s + K_{sr}L_r) & -(b_{sr}s + K_{sr}) \\ -(-b_{sf}L_f s - K_{sf}L_f) & -(b_{sr}L_r s + K_{sr}L_r) & I_s s^2 + (b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2)s + (K_{sf}L_f^2 + K_{sr}L_r^2) & -(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s - (k_{sf}L_f - K_{sr}L_r) \\ -(b_{sf}s + K_{sf}) & -(b_{sr}s + K_{sr}) & -(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s - (K_{sf}L_f - K_{sr}L_r) & M_s s^2 + (b_{sf} + b_{sr})s + (K_{sf} + K_{sr}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{uf} \\ Y_{ur} \\ \Theta_s \\ Y_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (b_{uf}s + K_{uf})Y_{Rf} \\ (b_{ur}s + K_{ur})Y_{Rr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

<u>Piezoelektrik yığın ile ÇAM'in Laplace dönüşümü:</u>

- Yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) - K_p(y_s - y_p) - \alpha v_p \qquad (4.33)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_s s^2 + b_s s + K_p]Y_s = (b_s s)Y_{us} + (K_p)Y_p - (\alpha)V_p \qquad (4.34)$$

- Yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{us}\ddot{y}_{us} = -K_{us}(y_{us} - y_R) - b_{us}(\dot{y}_{us} - \dot{y}_R) + K_s(y_p - y_{us}) + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) \qquad (4.35)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_{us}s^2 + (b_{us} + b_s)s + (K_{us} + K_s)]Y_{us} = (b_{us}s + K_{us})Y_R + (b_s s)Y_s + (K_s)Y_p \quad (4.36)$$

- Piezoelektrik elemanın denklemi:

$$M_p\ddot{y}_p = -K_s(y_p - y_{us}) + K_p(y_s - y_p) + \alpha v_p \quad (4.37)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_p s^2 + K_s + K_p]Y_p = (K_s)Y_{us} + (K_p)Y_s + (\alpha)V_p \quad (4.38)$$

- Eşdeğer elektrik sisteminin yönetim denklemi (3.18) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$v = \alpha R(\dot{y}_s - \dot{y}_p) - CR\dot{v} \quad (4.39)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$(CRs + 1)V = (\alpha Rs)Y_s - (\alpha Rs)Y_p \quad (4.40)$$

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{us} \\ Y_s \\ Y_p \\ V_p \end{pmatrix}; M = \begin{pmatrix} M_{us} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} b_{us} + b_s & -b_s & 0 & 0 \\ -b_s & b_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha R & \alpha R & CR \end{pmatrix};$$

$$K = \begin{pmatrix} K_{us} + K_s & 0 & -K_s & 0 \\ 0 & K_p & -K_p & \alpha \\ -K_s & -K_p & K_s + K_p & -\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} (b_{us}s + K_{us})Y_R \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Burada:

• Y yer değiştirme matrisidir

• M kütle matrisidir

• B, sönümleme matrisidir

• K rijitilik matrisidir

• F, yol giriş kuvveti matrisidir

$$(M.s^2 + B.s + K).Y = F \quad (4.24)$$

$$\begin{pmatrix} M_{us}s^2 + (b_{us} + b_s)s + (K_{us} + K_s) & -b_s s & -K_s & 0 \\ -b_s s & M_s s^2 + b_s s + K_p & -K_p & \alpha \\ -K_s & -K_p & M_p s^2 + K_s + K_p & -\alpha \\ 0 & -(\alpha Rs) & (\alpha Rs) & (CRs + 1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{us} \\ Y_s \\ Y_p \\ V_p \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} (b_{us}s + K_{us})Y_R \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Piezoelektrik Yığın İle YAM'nin Laplace Dönüşümü

- Ön yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{uf}\ddot{y}_{uf} = -b_{uf}(\dot{y}_{uf} - \dot{y}_{Rf}) - K_{uf}(y_{uf} - y_{Rf}) + b_{sf}(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}) + K_{sf}(y_{pf} - y_{uf}) \quad (4.41)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_{uf}s^2 + (b_{sf} + b_{uf})s + (K_{sf} + K_{uf})]Y_{uf} = (b_{uf}s + K_{uf})Y_{Rf} + (b_{sf}s)Y_s - (b_{sf}L_fs)\Theta_s + (K_{sf})Y_{pf} \quad (4.42)$$

- Arka yaysız kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_{ur}\ddot{y}_{ur} = -b_{ur}(\dot{y}_{ur} - \dot{y}_{Rr}) - K_{ur}(y_{ur} - y_{Rr}) + b_{sr}(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) + K_{sr}(y_{pr} - y_{ur}) \quad (4.43)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_{ur}s^2 + (b_{sr} + b_{ur})s + (K_{sr} + K_{ur})]Y_{ur} = (b_{ur}s + K_{ur})Y_{Rr} + (b_{sr}s)Y_s + (b_{sr}L_rs)\Theta_s + (K_{sr})Y_{pr} \quad (4.44)$$

- Yarı yaylı kütlenin dikey hareket denklemi:

$$M_s\ddot{y}_s = -b_{sf}(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}) - b_{sr}(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) - K_{pf}(y_s - L_f\theta_s - y_{pf}) - K_{pr}(y_s + L_r\theta_s - y_{pr}) - (\alpha)v_{pf} - (\alpha)v_{pr} \quad (4.45)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_ss^2 + (b_{sf} + b_{sr})s + (K_{pf} + K_{pr})]Y_s = [(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s + (k_{pf}L_f - K_{pr}L_r)]\Theta_s + (b_{sf}s)Y_{uf} + (b_{sr}s)Y_{ur} + (K_{pf}s)Y_{pf} + (K_{pr}s)Y_{pr} - (\alpha)V_{pf} - (\alpha)V_{pr} \quad (4.46)$$

- Yarı yaylı kütlenin açısal hareketinin denklemi:

$$I_s\ddot{\theta}_s = L_f(b_{sf}(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{uf}) + K_{pf}(y_s - L_f\theta_s - y_{pf}) + \alpha v_{pf}) - L_r(b_{sr}(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{ur}) + K_{pr}(y_s + L_r\theta_s - y_{pr}) + \alpha v_{pr}) \quad (4.47)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[I_ss^2 + (b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2)s + (K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2)]\Theta_s = [(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s + (k_{pf}L_f - K_{pr}L_r)]Y_s - (b_{sf}L_fs)Y_{uf} + (b_{sr}L_rs)Y_{ur} - (K_{pf}L_fs)Y_{pf} + (K_{pr}L_rs)Y_{pr} + (\alpha L_f)V_{pf} - (\alpha L_r)V_{pr} \quad (4.48)$$

- Arka piezoelektrik yığının denklemi:

$$M_{pr}\ddot{y}_{pr} = -K_{sr}(y_{pr} - y_{ur}) + K_{pr}(y_s + L_r\theta_s - y_{pr}) + (\alpha)v_{pr} \quad (4.49)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$[M_{pr}s^2 + (K_{sr} + K_{pr})]Y_{pr} = (K_{sr})Y_{ur} + (K_{pr})Y_s + (k_{pr}L_r)\Theta_s + (\alpha)V_{pr} \quad (4.50)$$

- Ön piezoelektrik yığının denklemi:

$$M_{pf}\ddot{y}_{pf} = -K_{sf}\left(y_{pf} - y_{uf}\right) + K_{pf}\left(y_s - L_f\theta_s - y_{pf}\right) + (\alpha)V_{pf} \quad (4.51)$$

Laplace dönüşümünü uygulayalım:

$$\left[M_{pf}s^2 + (K_{sf} + K_{pf})\right]Y_{pf} = \left(K_{sf}\right)Y_{uf} + \left(K_{pf}\right)Y_s + \left(k_{pf}L_f\right)\Theta_s + (\alpha)V_{pf} \quad (4.52)$$

- Arka süspansiyonun eşdeğer elektrik sisteminin bünye denklemi Denklem (3.18)'den çıkarılabilir:

$$v_r = \alpha R(\dot{y}_s + L_r\dot{\theta}_s - \dot{y}_{pf}) - CR\dot{v}_r \quad (4.53)$$

- Benzer şekilde, ön süspansiyon eşdeğer elektrik sisteminin bünye denklemi Denklem (3.18)'den çıkarılabilir:

$$v_f = \alpha R(\dot{y}_s - L_f\dot{\theta}_s - \dot{y}_{pf}) - CR\dot{v}_f \quad (4.54)$$

Laplace dönüşümünün hem arka hem de ön denklemlere uygulanmasından sonra:

$$(CRs + 1)V_f = (\alpha Rs)Y_s - \left(L_f\alpha Rs\right)\Theta_s - (\alpha Rs)Y_{pf} \quad (4.55)$$

$$(CRs + 1)V_r = (\alpha Rs)Y_s + (L_r\alpha Rs)\Theta_s - (\alpha Rs)Y_{pr} \quad (4.56)$$

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{uf} \\ Y_{ur} \\ \Theta_s \\ Y_s \\ Y_{pf} \\ Y_{pr} \\ V_f \\ V_r \end{pmatrix};\ M = \begin{pmatrix} M_{uf} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{ur} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{pf} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{pr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} b_{sf} + b_{uf} & 0 & b_{sf}L_f & -b_{sf} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{sr} + b_{ur} & -b_{sr}L_r & -b_{sr} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{sf}L_f & -b_{sr}L_r & b_{sf}{L_f}^2 + b_{sr}{L_r}^2 & b_{sr}L_r - b_{sf}L_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_{sf} & -b_{sr} & b_{sr}L_r - b_{sf}L_f & b_{sf} + b_{sr} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_f\alpha R & -\alpha R & \alpha R & 0 & CR & 0 \\ 0 & 0 & -L_r\alpha R & -\alpha R & 0 & \alpha R & 0 & CR \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} K_{sf} + K_{uf} & 0 & 0 & 0 & -K_{sf} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{sr} + K_{ur} & 0 & 0 & 0 & -K_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{pf}{L_f}^2 + K_{pr}{L_r}^2 & K_{pr}L_r - K_{pf}L_f & K_{pf}L_f & -K_{pr}L_r & -\alpha L_f & \alpha L_r \\ 0 & 0 & K_{pr}L_r - K_{pf}L_f & K_{pf} + K_{pr} & -K_{pf} & -K_{pr} & \alpha & \alpha \\ -K_{sf} & 0 & K_{pf}L_f & -K_{pf} & K_{sf} + K_{pf} & 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & -K_{sr} & -K_{pr}L_r & -K_{pr} & 0 & K_{sr} + K_{pr} & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} (b_{uf}s + K_{uf})Y_{Rf} \\ (b_{ur}s + K_{ur})Y_{Rr} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Burada:

• Y yer değiştirme matrisidir

• M kütle matrisidir

• B, sönümleme matrisidir

• K rijitilik matrisidir

• F, yol giriş kuvveti matrisidir

$$(M.s^2 + B.s + K).Y = F \qquad (4.24)$$

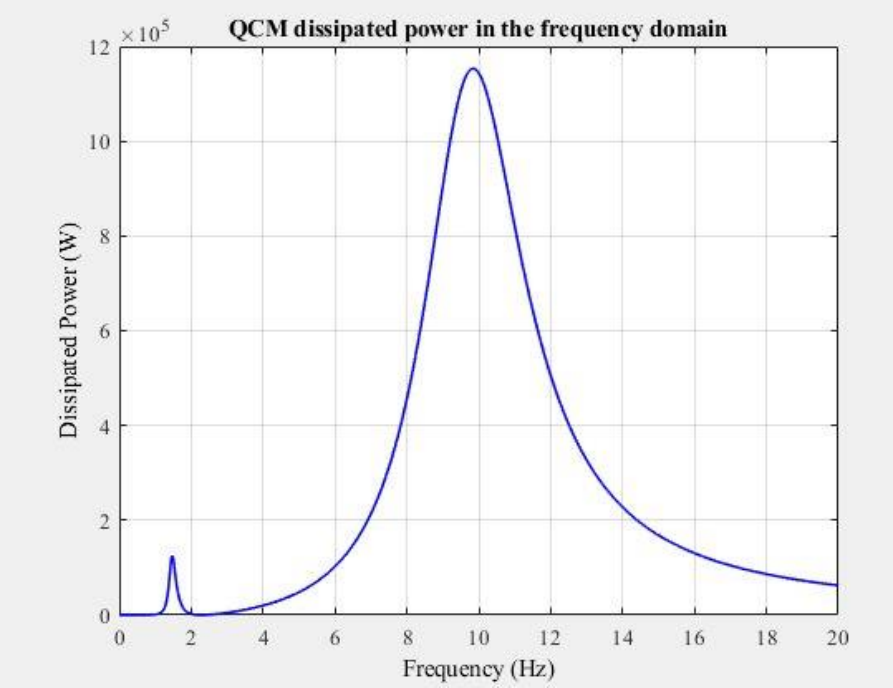
$$\begin{pmatrix} M_{uf}s^2 + (b_{sf} + b_{uf})s + (K_{sf} + K_{uf}) & 0 & b_{sf}L_f s & -b_{sf}s & -K_{sf} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{ur}s^2 + (b_{sr} + b_{ur})s + (K_{sr} + K_{ur}) & -b_{sr}L_r s & -b_{sr}s & 0 & -K_{sr} & 0 & 0 \\ b_{sf}L_f s & -b_{sr}L_r s & I_s s^2 + (b_{sf}L_f^2 + b_{sr}L_r^2)s + (K_{pf}L_f^2 + K_{pr}L_r^2) & -(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s - (k_{pf}L_f - K_{pr}L_r) & K_{pf}L_f s & -K_{pr}L_r & -\alpha L_f & \alpha L_r \\ -b_{sf}s & -b_{sr}s & -(b_{sf}L_f - b_{sr}L_r)s - (k_{pf}L_f - K_{pr}L_r) & M_s s^2 + (b_{sf} + b_{sr})s + (K_{pf} + K_{pr}) & -K_{pf} & -K_{pr} & \alpha & \alpha \\ -K_{sf} & 0 & K_{pf}L_f & -K_{pf} & M_{pf}s^2 + (K_{sf} + K_{pf}) & 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & -K_{sr} & -K_{pr}L_r & -K_{pr} & 0 & M_{pr}s^2 + (K_{sr} + K_{pr}) & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & L_f \alpha R s & -\alpha R s & \alpha R s & 0 & (CR s + 1) & 0 \\ 0 & 0 & -L_r \alpha R s & -\alpha R s & 0 & \alpha R s & 0 & (CR s + 1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{uf} \\ Y_{ur} \\ \Theta_s \\ Y_s \\ Y_{pf} \\ Y_{pr} \\ V_f \\ V_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (b_{uf}s + K_{uf})Y_{Rf} \\ (b_{ur}s + K_{ur})Y_{Rr} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

4.3.7. Frekans Alanında ÇAM Süspansiyon Sisteminden Dağıtılan Güç.

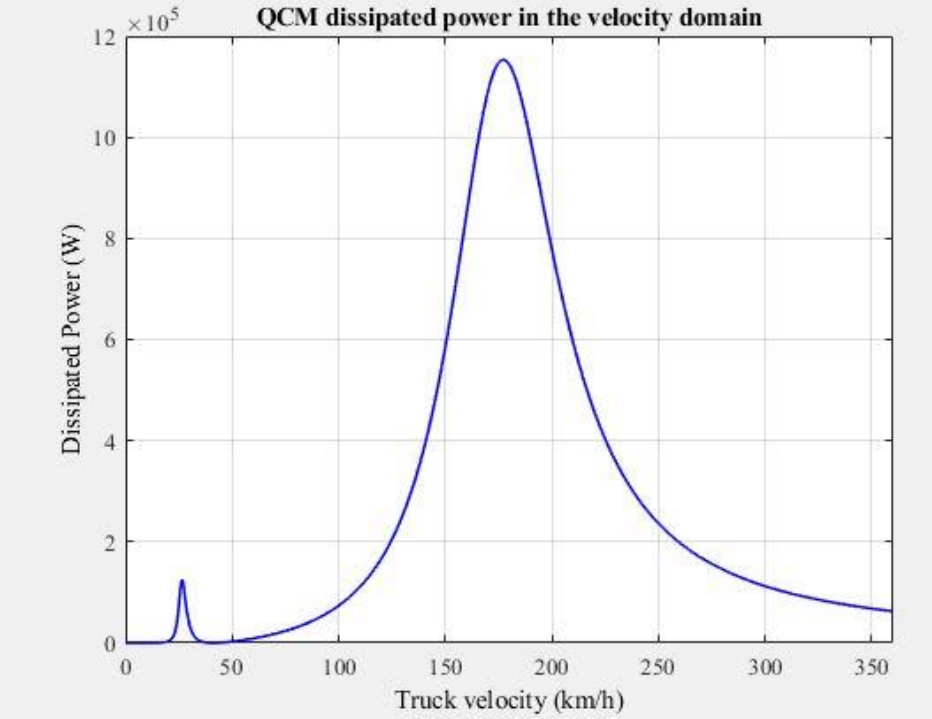
Süspansiyon sistemlerinden elde edilebilecek potansiyel güç, süspansiyonlar tarafından harcanan güçtür [16]. Süspansiyon sistemi tarafından dağıtılan güç, bağıl hız ve sönümleme kuvvetinin ürünü olarak ifade edilebilir:

$$P_{disQCM} = \frac{b_s \omega^2 (y_{s-} y_{us})^2}{2} \qquad (4.57)$$

Yaylı doğal frekansta (1.454 Hz) harcanan güç 1.233 $.10^5$ W ve yaysız doğal frekansta (9.529 Hz) değeri 1.112 $.10^6$ W.



Şekil 4.25: ÇAM süspansiyonundan, frekans alanında dağıtılmış güç.

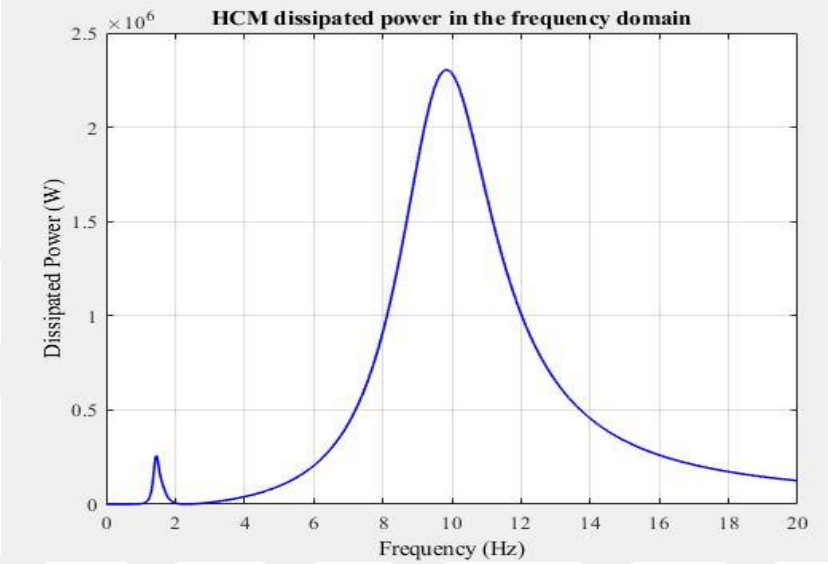


Şekil 4.26: ÇAM süspansiyonundan, kamyon hızına göre dağıtılmış güç.

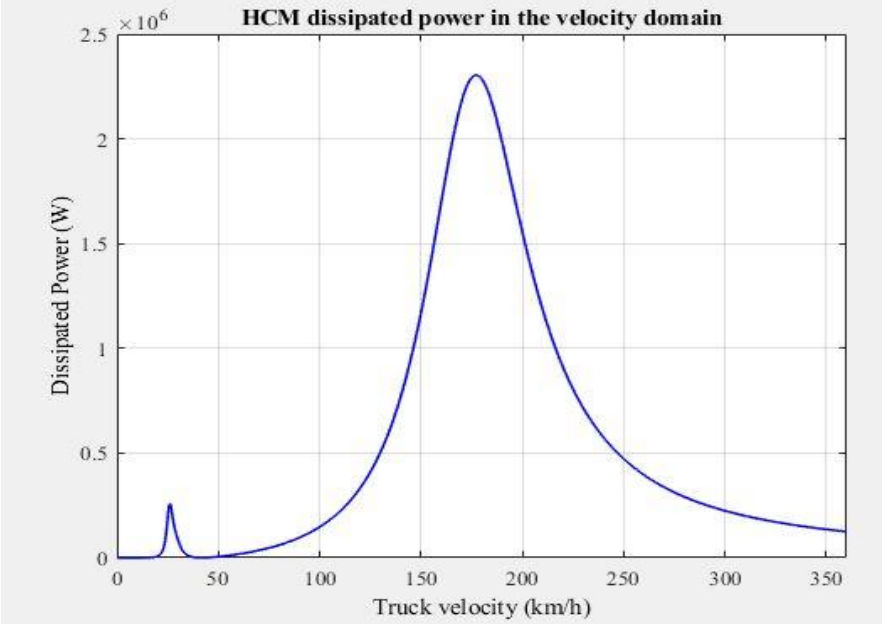
4.3.8. Frekans Alanında YAM Süspansiyon Sisteminden Dağıtılan Güç.

Yarım araba modelinde süspansiyon sistemi tarafından dağıtılan güç, bağıl hız ve bunların sönümleme kuvvetinin çarpımı olarak ifade edilebilir:

$$P_{disHCM} = \frac{b_{sf}\omega^2(y_s - L_f\theta - y_{uf})^2}{2} + \frac{b_{sr}\omega^2(y_s + L_r\theta - y_{ur})^2}{2} \quad (4.58)$$



Şekil 4.27: Frekans alanında YAM süspansiyonundan dağıtılan güç.



Şekil 4.28: Kamyon hızına göre YAM süspansiyonundan dağıtılan güç.

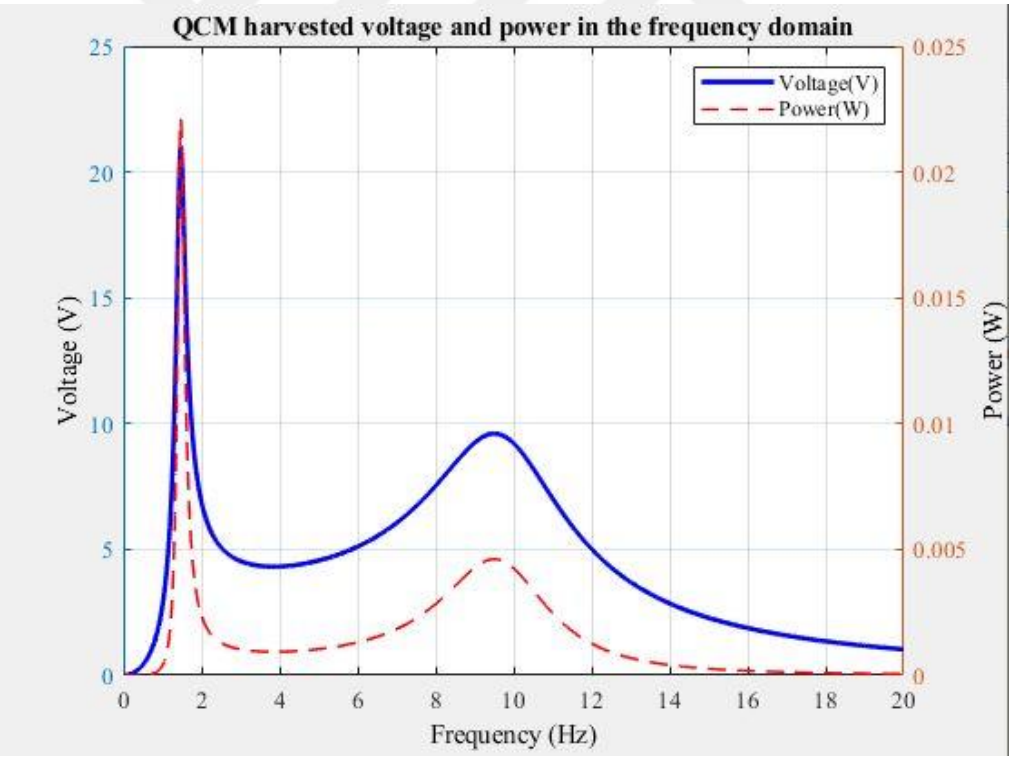
Yaylı doğal frekansta (1.004 Hz), harcanan güç 3695 W'dır. Yaysız doğal frekansta (1.429 Hz) değeri $2.495.10^5$ W'tır. Yayılmamış doğal frekanslarda, harcanan güç $2.274.10^5$ W'tır.

4.3.9. Frekans Alanında ÇAM Toplanan Gerilim ve Güç.

Her iki model için de (ÇAM ve YAM) frekans alanında toplanan voltaj ve güç davranışları da incelenmiştir. Uyarma frekansı değeri [0; 20Hz] ve diğer araba parametreleri olduğu gibi sabit tutuldu. Şekil 29 ve Şekil 30'daki ÇAM ve YAM toplanmış voltaj ve güç grafikleri, yaylı rezonans frekansında maksimum değerlere ulaşıldığını ortaya koydu. Piezoelektrik yığınlarla ÇAM ve YAM'nin hareket denklemlerinin Laplace dönüşümünün aşağıdaki matris gösterimi kullanılabilir:

$$\begin{pmatrix} M_{us}s^2 + (b_{us} + b_s)s + (K_{us} + K_s) & -b_s s & -K_s & 0 \\ -b_s s & M_s s^2 + b_s s + K_p & -K_p & \alpha \\ -K_s & -K_p & M_p s^2 + K_s + K_p & -\alpha \\ 0 & -(\alpha R s) & (\alpha R s) & (CRs + 1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{us} \\ Y_s \\ Y_p \\ V_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (b_{us}s + K_{us})Y_R \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

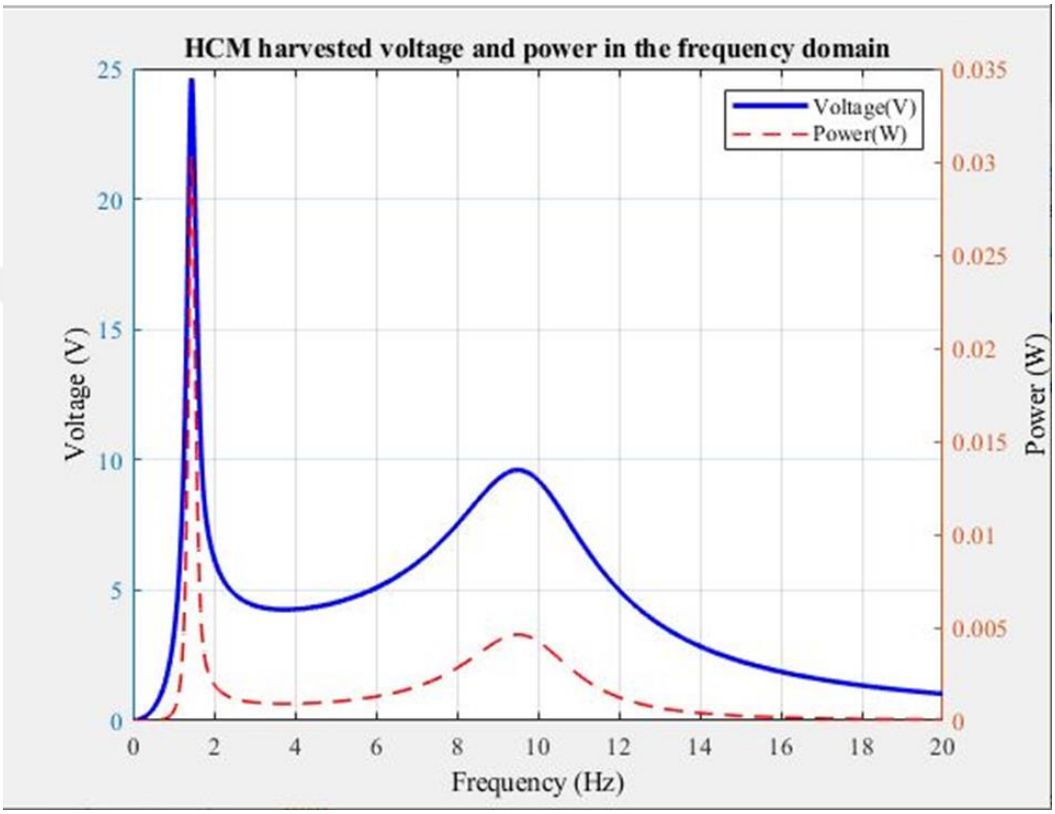
$$(M.s^2 + B.s + K).Y = F \qquad (4.24)$$



Şekil 4.29: Frekans alanı grafiklerinde ÇAM'den maksimum toplanan voltaj ve güç.

4.3.10. Frekans Alanında YAM Toplanan Gerilim ve Güç.

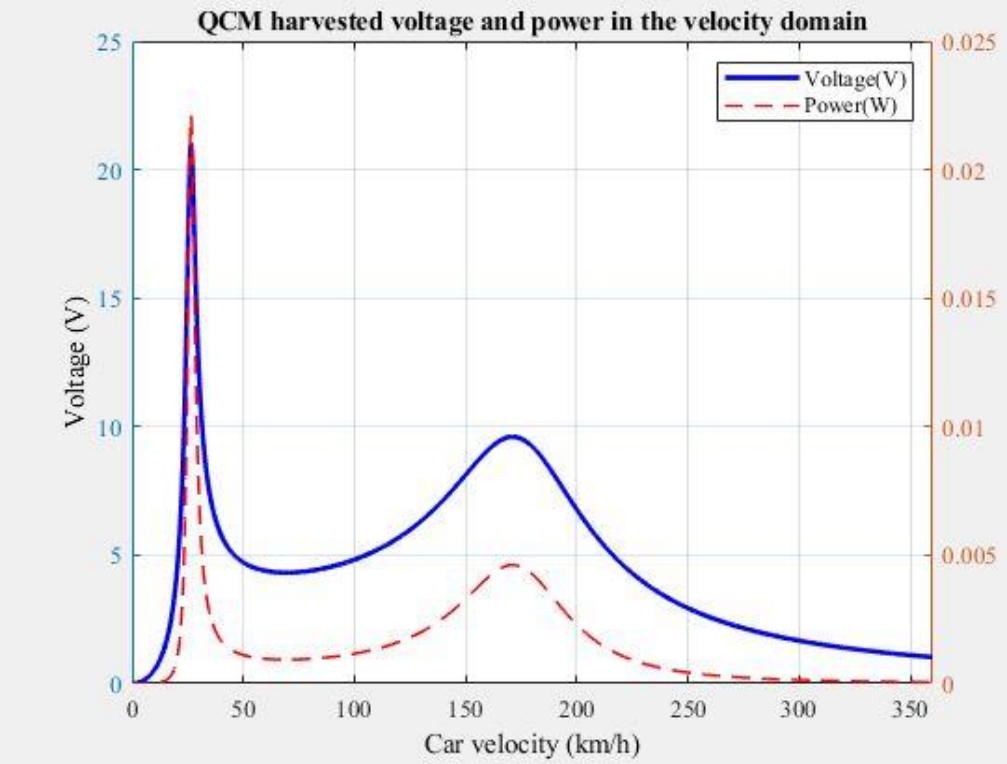
Maksimum toplanan güç ve voltaj, ÇAM için yaylı rezonans frekansında (1.454 Hz) toplandı ve sırasıyla 0.02129 W ve 20.63 V idi. YAM için maksimum toplanan güç ve voltaj, yaylı rezonans frekansında (1.429 Hz) idi ve sırasıyla 0.03082 ve 24.83V idi. YAM için ÇAM'e kıyasla %20,36'lık bir artış kaydedildi.



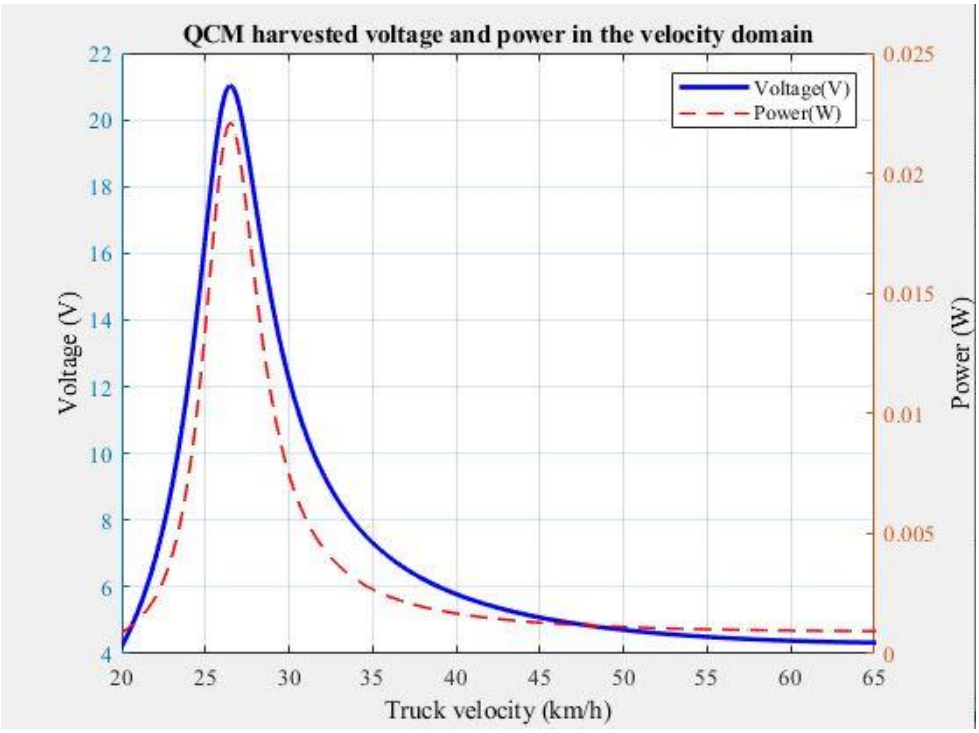
Şekil 4.30: Frekans alanı grafiğinde YAM'den maksimum toplanan voltaj ve güç.

4.3.11. Hız Alanında ÇAM Toplanan Gerilim ve Güç.

Maksimum toplanan voltaj da Denklem (4.2)'deki ($u=\lambda f$) bağıntı kullanılarak araba hızı v'ye göre temsil edildi. Simülasyonlar için düzensiz bir yol dokusu (harmonik simülasyonlar için λ = 5m kullanılacaktır). λ yol dalga uzunluğunu temsil eder. Maksimum toplanan güç ve voltaj, ÇAM için 26.172 km/sa'da toplandı ve sırasıyla 0.02129 W ve 20.63 V idi.

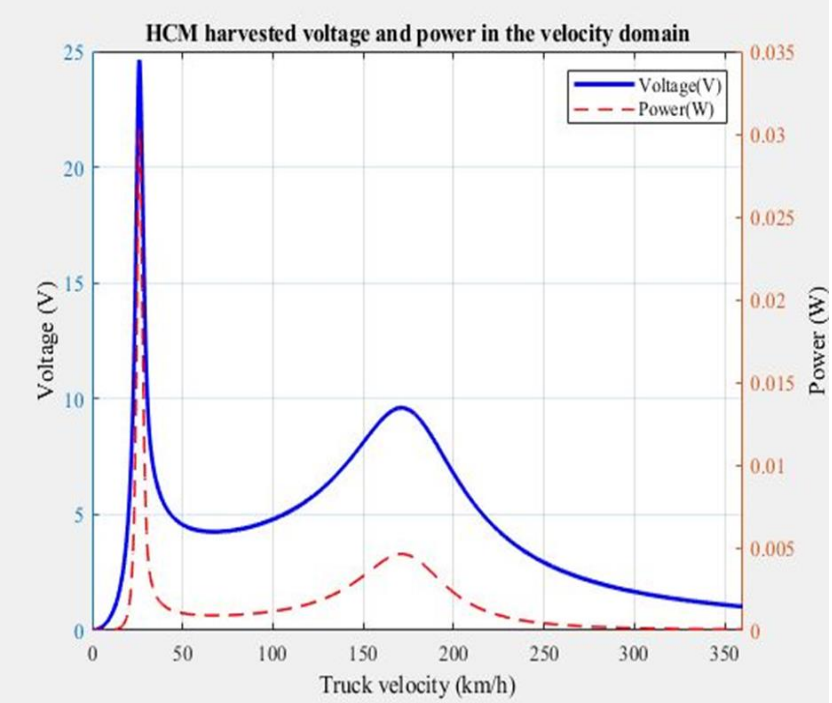


Şekil 4.31: Kamyonun hızına göre ÇAM'den toplanan maksimum voltaj ve güç.



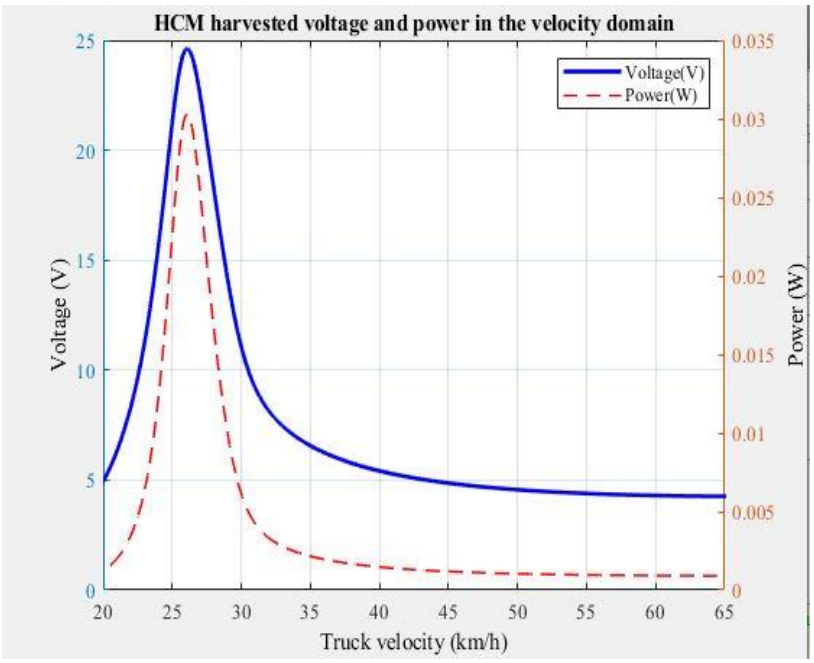
Şekil 4.32: Kamyonun çalışma hızları dahilinde ÇAM'den toplanan maksimum voltaj ve güç.

4.3.12. Hız Etki Alanında YAM Toplanan Gerilim ve Güç.



Şekil 4.33: Kamyonun hızına göre YAM'den toplanan maksimum voltaj ve güç.

YAM için maksimum toplanan güç ve voltaj 25.722 km/sa ve sırasıyla 0.03082 ve 24.83V idi.



Şekil 4.34: Kamyonun çalışma hızları dahilinde YAM'den toplanan maksimum voltaj ve güç.

4.4. RASGELE UYARIMLAR

Bir araba sabit bir hızla hareket ettiğinde, yol pürüzlülüğü Gauss dağılımına tabi tutulan durağan rastgele bir süreç olarak kabul edilir.

Rastgele yol profili, aşağıdaki denklem kullanılarak güç spektral yoğunluğu PSD(power spectral density) cinsinden uzay alanında ifade edilebilir [162]:

$$G(n) = G(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-W} \quad (4.59)$$

Burada:

- n uzaysal frekanstır
- n_0 uzaysal referans frekansıdır (bizim durumumuzda n0=0.1 m^{-1}),
- $G(n_0)$, ISO 8608 normu [162] tarafından uzamsal referans frekansına ve Tablo 4.10'da gösterildiği gibi yol profili derecesine göre verilen yol pürüzlülük katsayısıdır [m^2/m^{-1}],
- W (bu durumda $W = 2$) yol dalga boyunun dalgalılığını, kısalığını veya uzunluğunu temsil eder. Çoğu simülasyon için dalgalanma şu aralıkta olmalıdır: $1.75 \leq W \leq 2.25$ [163].

Aşağıdaki denklem, n[m^{-1}] uzaysal frekansını f [s^{-1}] zaman frekansına dönüştürmeye izin verir:

$$f = u \times n \quad (4.60)$$

Burada:

- u arabanın hızıdır [m/s]
- f zaman frekansıdır [s^{-1}]
- n uzaysal frekanstır [m^{-1}]

G(n) ve G(f) arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$G(f) = \frac{1}{u}G(n) \quad (4.61)$$

Dalgalılığın W=2 olduğu varsayılarak,

$$G(n) = G(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-W} = G(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-2} \quad (4.62)$$

$$G(f) = \frac{1}{u}G(n) = \frac{1}{u}G(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-2} \quad (4.63)$$

$$f = u \times n \iff n = \frac{f}{u}$$

$$G(f) = \frac{1}{u}G(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-2} = \frac{1}{u}G(n_0)\left(\frac{\frac{f}{u}}{n_0}\right)^{-2} = G(n_0){n_0}^2\frac{u}{f^2} \quad (4.64)$$

Denklem (4.62)'nin zamana göre türevi, kabin dikey hızı PSD'dir (güç spektral yoğunluğu).

$$\dot{G}(f) = (2\pi f)^2 G(f) = 4\pi^2 G(n_0) {n_0}^2 u \quad (4.65)$$

Rastgele uyarmanın durağan olması durumunda, zaman alanındaki yol pürüzlülüğü, beyaz gürültü üretecinin filtrelenmesine eşdeğerdir.

Ön lastiğin rastgele yol uyarımı şu şekilde ifade edilebilir [129]:

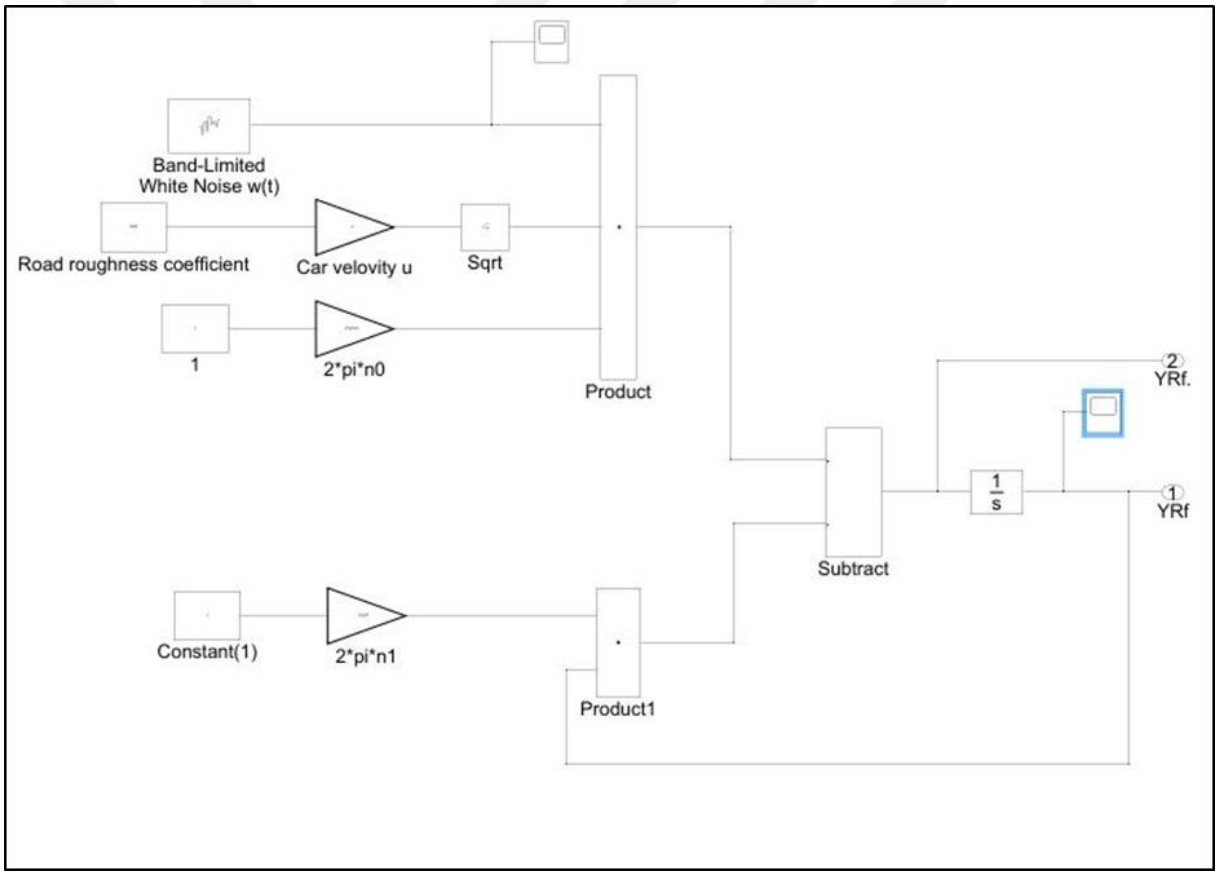
$$\dot{y}_{Rf}(t) = 2\pi n_0 w(t)\sqrt{G(n_0)u(t)} - 2\pi f_0 y_{Rf}(t) \quad (4.66)$$

Burada:

$w(t)$ Gauss beyaz gürültüsüdür (ortalama 0),

f_0 kesme frekansıdır,

$u(t)$ arabanın hızıdır,



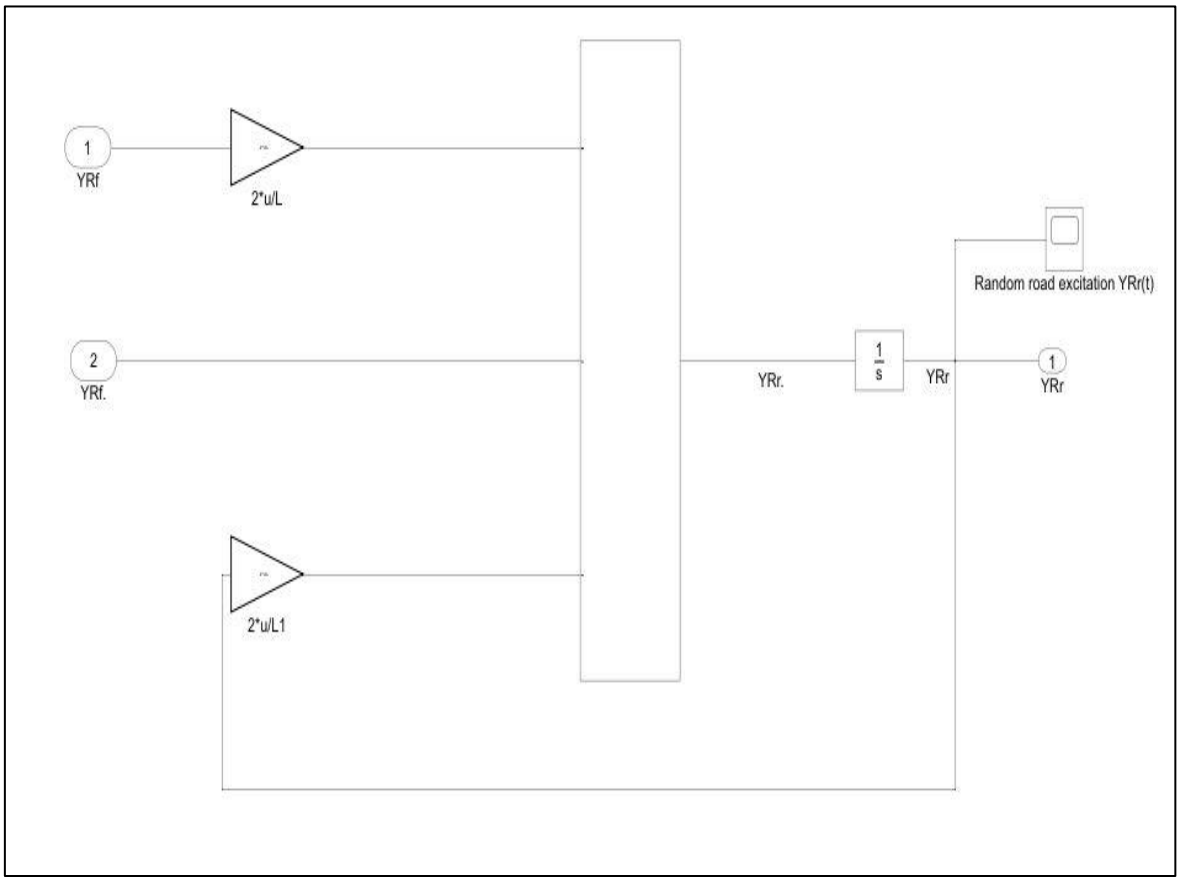
Şekil 4.35: Ön lastik rastgele uyarma kaynağı MATLAB SIMULINK gösterimi.

Ön ve arka lastik rastgele yol uyarıları arasındaki gecikmeyi hesaba katarak, arka lastiğin rastgele yol uyarımı aşağıdaki bağıntı ile verilir [164]:

$$\dot{y}_{Rr}(t) = \dot{y}_{Rf}(t - \tau) \quad (4.67)$$

Burada τ arka lastikteki zaman gecikmesidir $\tau = \frac{L\ (Dingil\ açıklığı)}{u\ (araba\ hızı)}$

L dingil mesafesidir (ön ve arka aks arasındaki mesafe)



Şekil 4.36: Arka lastik rastgele uyarma kaynağı MATLAB SIMULINK gösterimi.

Tablo 4.10: Uzaysal referans frekansı $\boldsymbol{n_0}$=0.1m^{-1} için ISO 8608 yol pürüzlülük seviyeleri [162].

Yol Profili Sınıfı	$G(n_0)[10^{-6}.m^3]$ Geometrik ortalama
A sınıfı	16
B sınıfı	64
C sınıfı	256
D sınıfı	1024
E sınıfı	4096
F sınıfı	16384
G sınıfı	65536
H sınıfı	262144

Toplanan voltaj ve güç, 40 km/s kamyon hızında dört yol sınıfı için araştırıldı:

• A Sınıfı (en iyi yol kalitesi ve sürüş konforu)

• D Sınıfı (ortalama yol kalitesi)

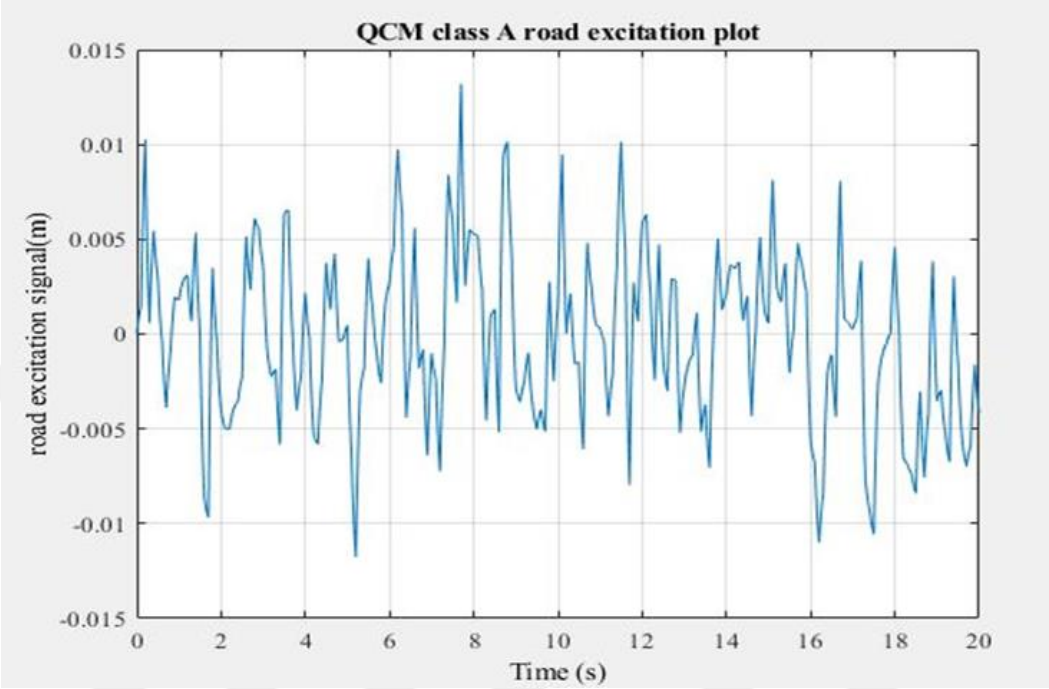
• G Sınıfı (çok bozuk yol)

• H Sınıfı (son derece bozuk yol)

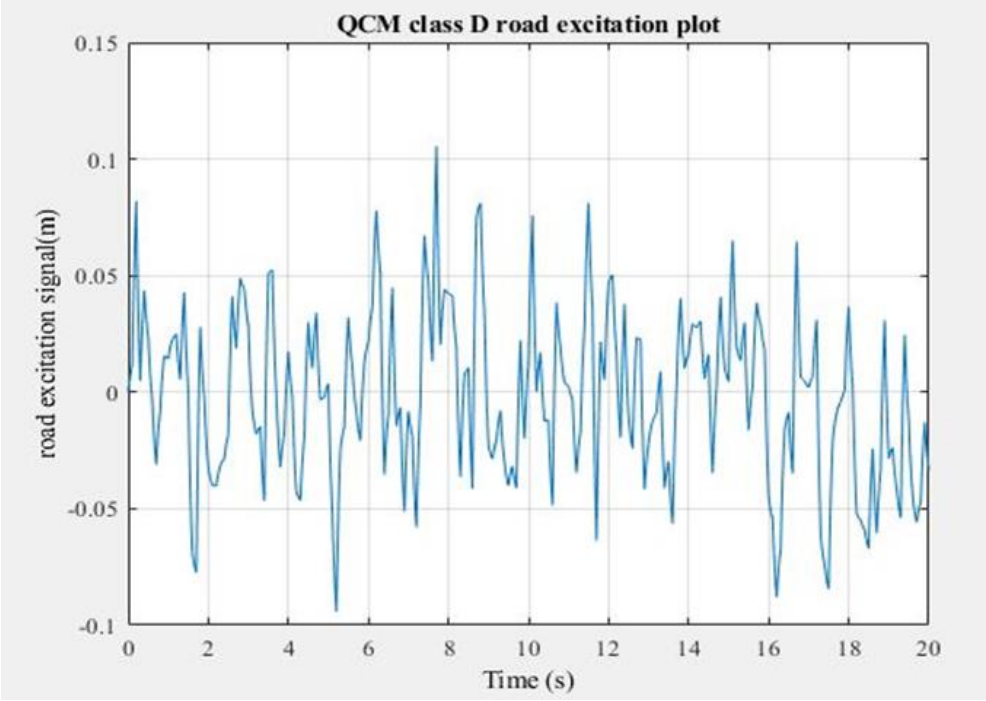
4.4.1. ÇAM'in Rastgele Uyarma sonuçları

ÇAM için, Şekil 4.37'de gösterildiği gibi A sınıfı yolun en iyi profili ve sürüş konforunu sağladığı rastgele uyarı giriş grafiklerinde görülebilir. Titreşim miktarı minimumdur ve sonuç olarak toplanan güç ve gerilim tepe değerleri çok düşüktür (sırasıyla 0.00019W ve 1.949V). D sınıfı yol, önemli olmayan pürüzlülük ile ortalama bir sürüş kalitesi sunar. Toplanan güç ve voltajın tepe değerleri ortalamadır (sırasıyla 0,01217W ve 15.6V). G sınıfı yol giriş çizimleri, 0.8445 m'ye ulaşan genlik tepe noktalarına sahip çok engebeli bir yol olduğunu ortaya koymaktadır. G sınıfları için toplanan güç ve voltajın tepe değerleri sırasıyla 0.7815W ve 125 V'dir. H yol sınıfının, 1,689 m'ye ulaşan tepe uyarma genliği ile en engebeli profil olduğu

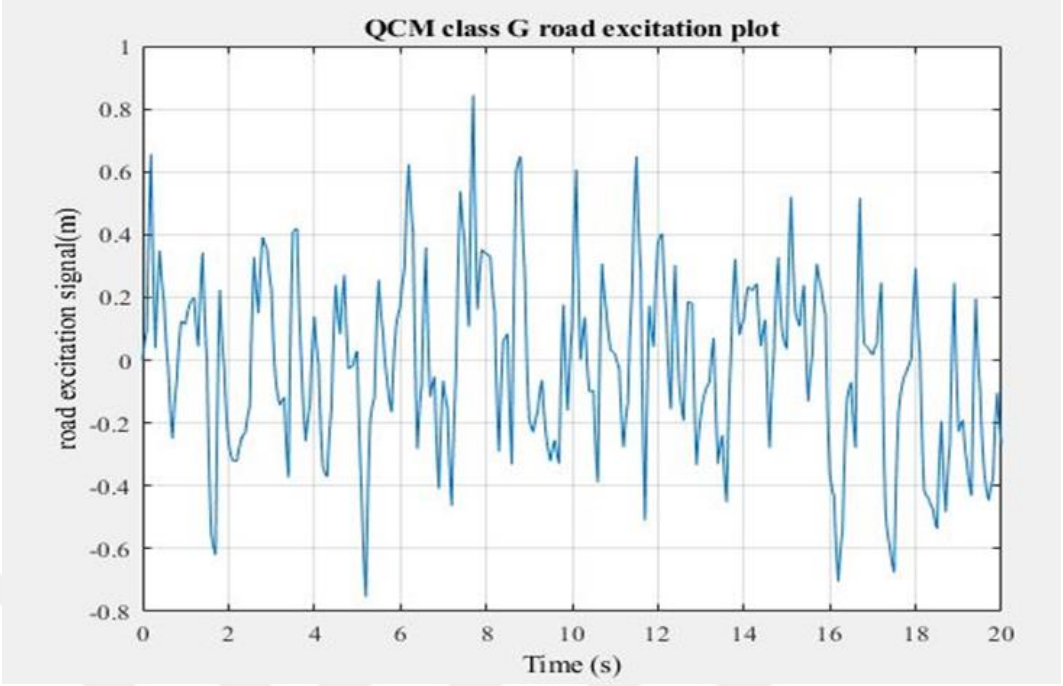
kanıtlanmıştır. H sınıfı için toplanan güç ve voltajın tepe değerleri sırasıyla 3.126W ve 250 V'dir.



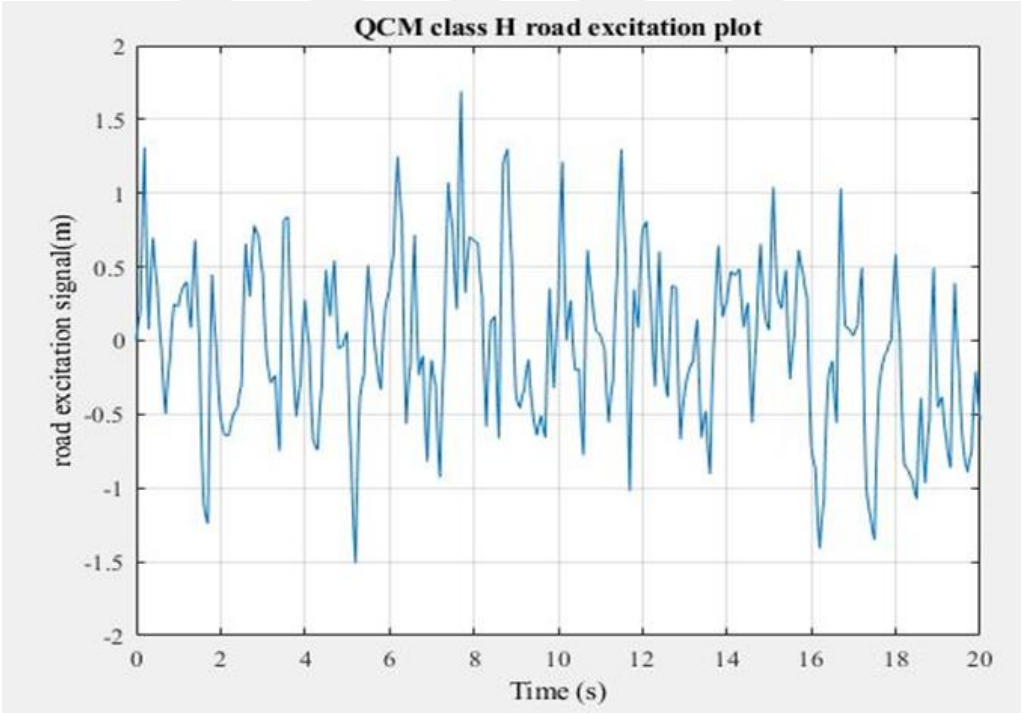
Şekil 4.37: ÇAM A sınıfı yol rastgele uyarma giriş grafiği.



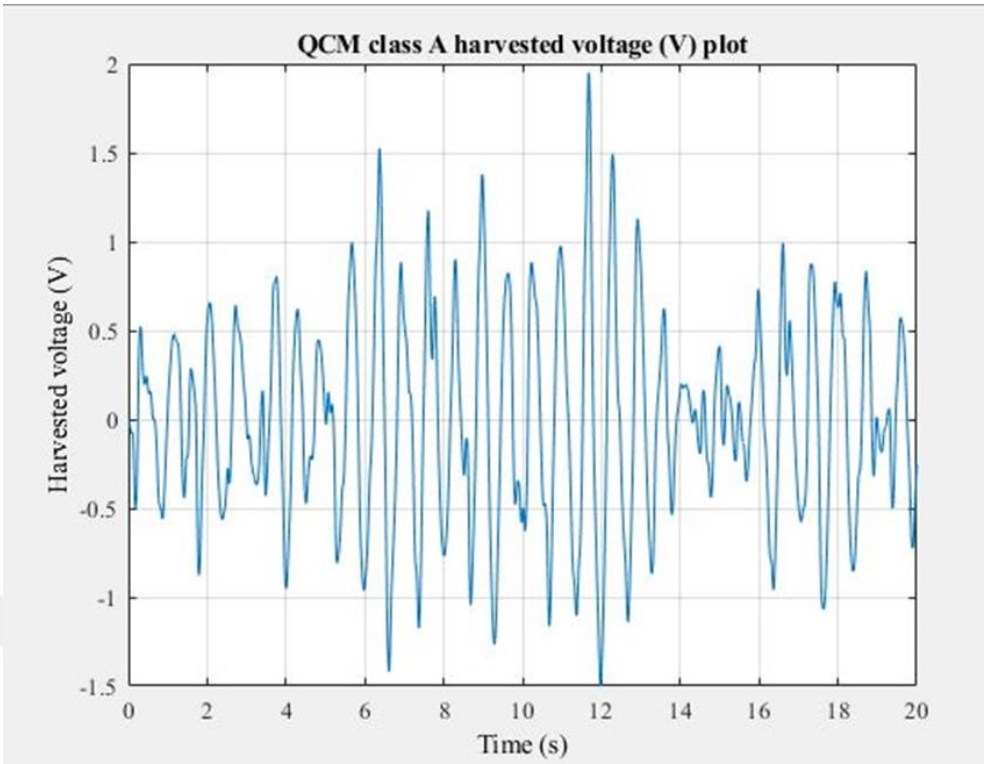
Şekil 4.38: ÇAM D sınıfı yol rastgele uyarma giriş grafiği.



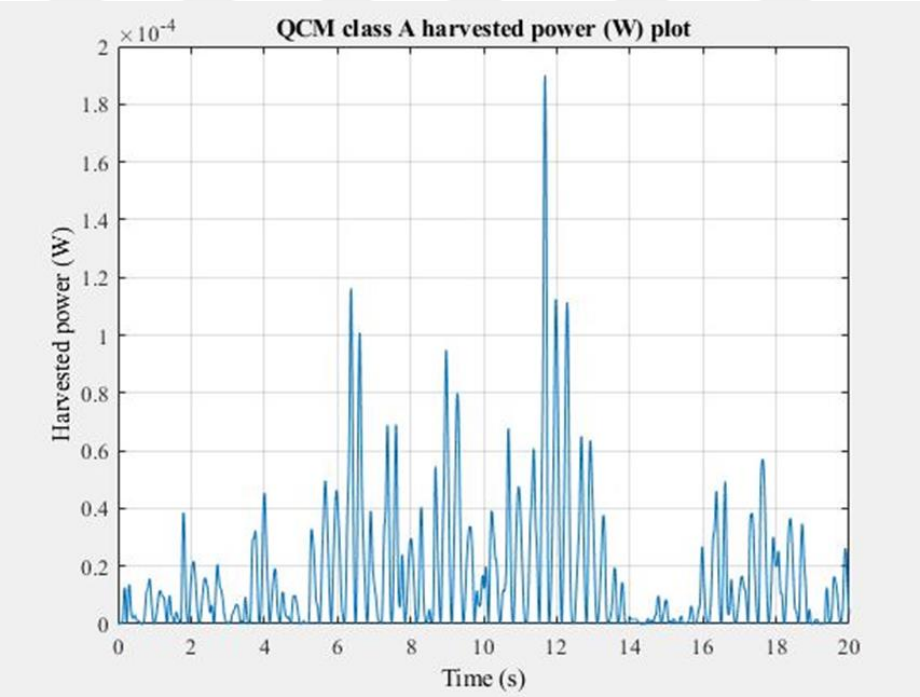
Şekil 4.39: ÇAM G sınıfı yol rastgele uyarma giriş grafiği.



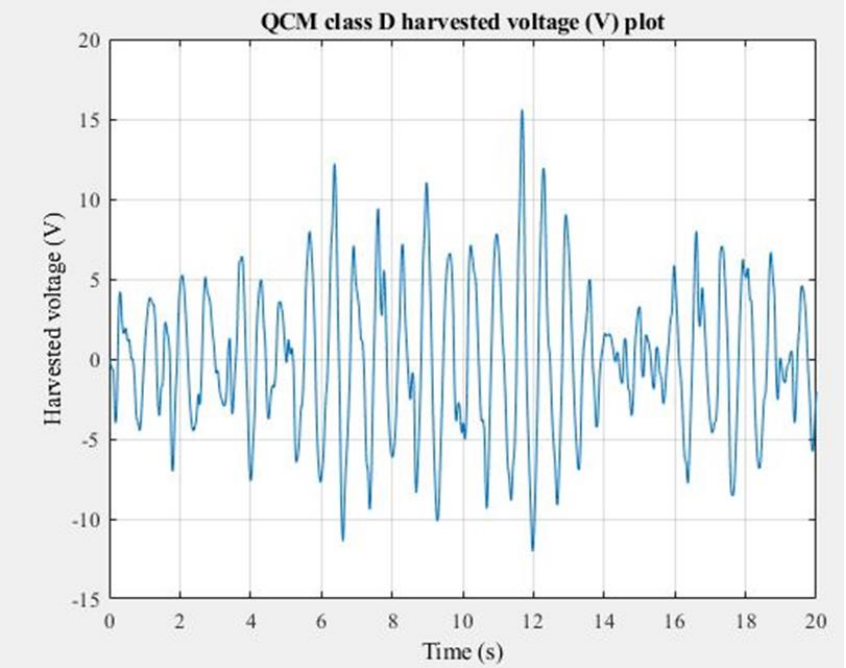
Şekil 4.40: ÇAM G sınıfı yol rastgele uyarma giriş grafiği.



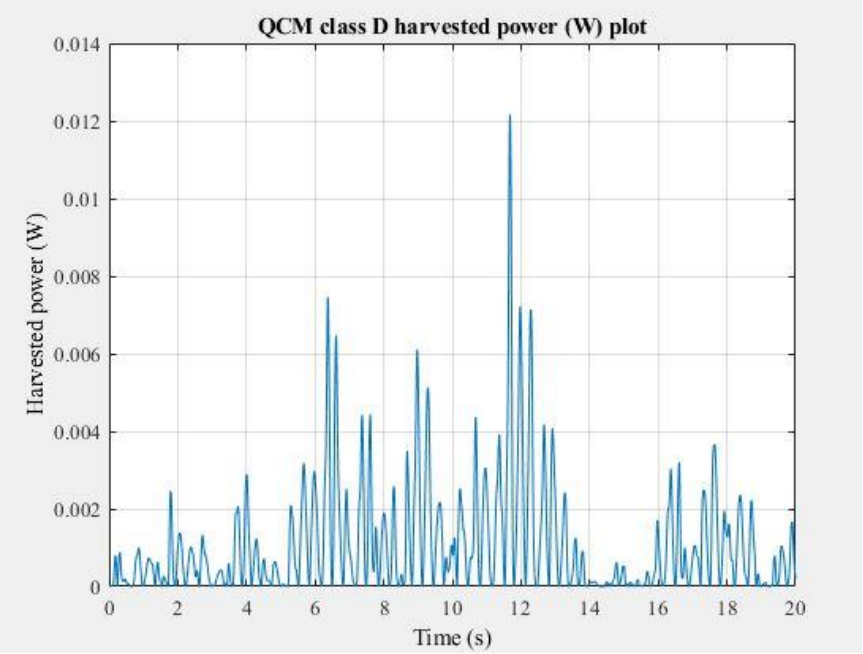
Şekil 4.41: ÇAM sınıf A yol rastgele uyarma toplanan gerilimi (V).



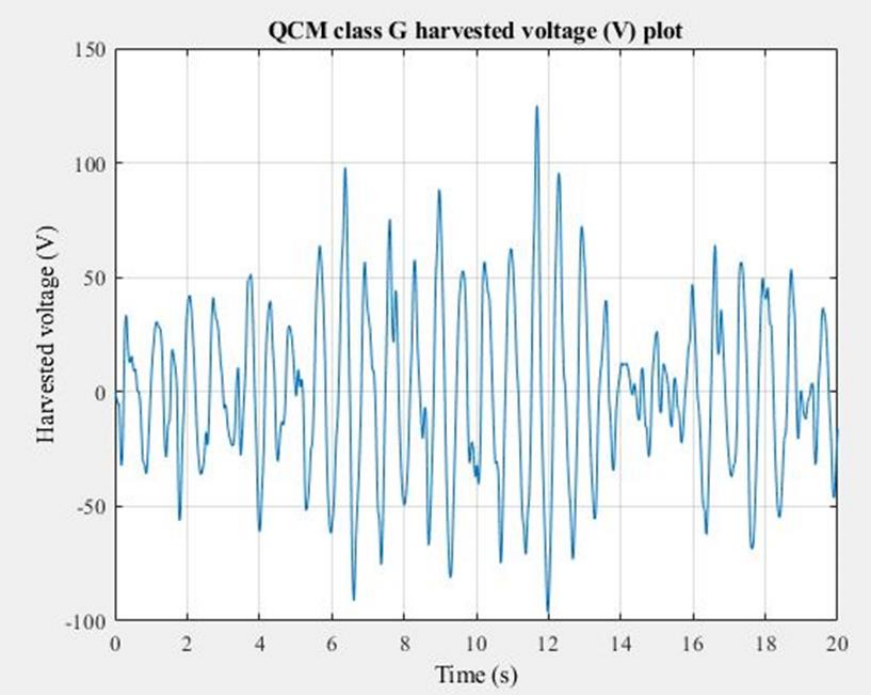
Şekil 4.42: ÇAM sınıf A yol rastgele uyarma toplanan güç (W).



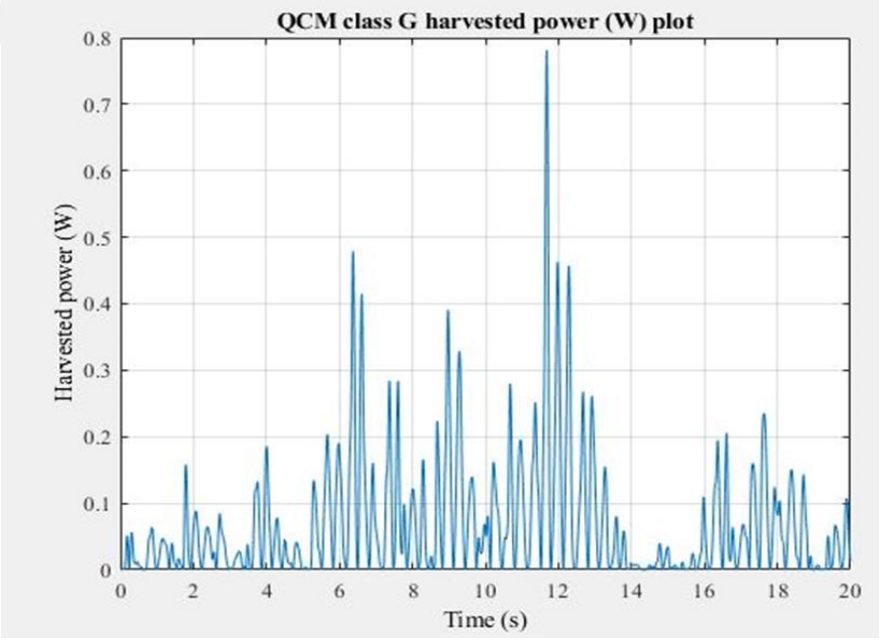
Şekil 4. 43: ÇAM sınıf D yol rastgele uyarma toplanan gerilimi (V).



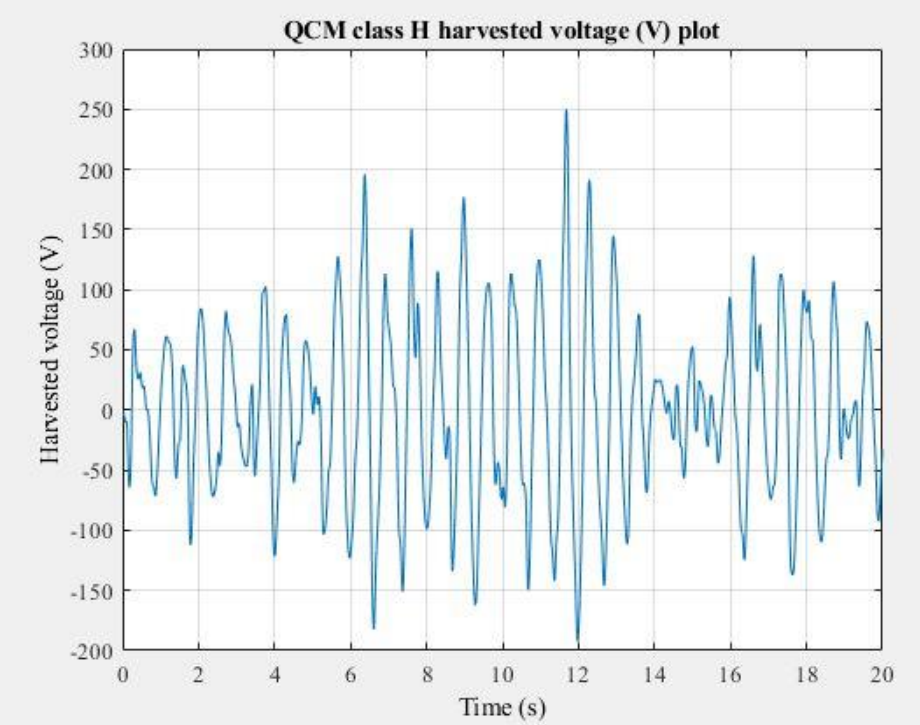
Şekil 4.44: ÇAM sınıf D yol rastgele uyarma toplanan güç (W).



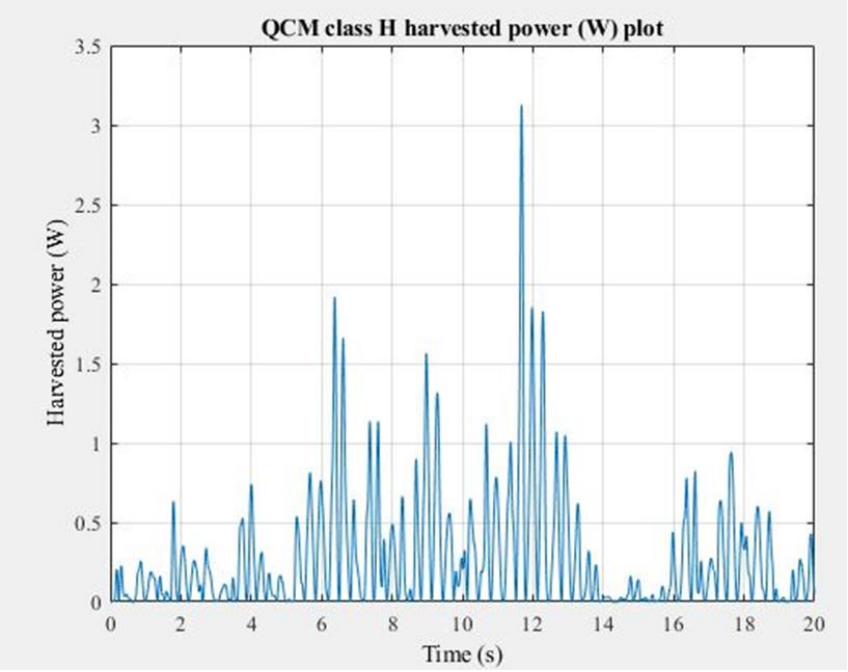
Şekil 4.45: ÇAM sınıf G yol rastgele uyarma toplanan gerilimi (V).



Şekil 4.46: ÇAM sınıf G yol rastgele uyarma toplanan güç (W).



Şekil 4.47: ÇAM sınıf H yol rastgele uyarma toplanan gerilimi (V).



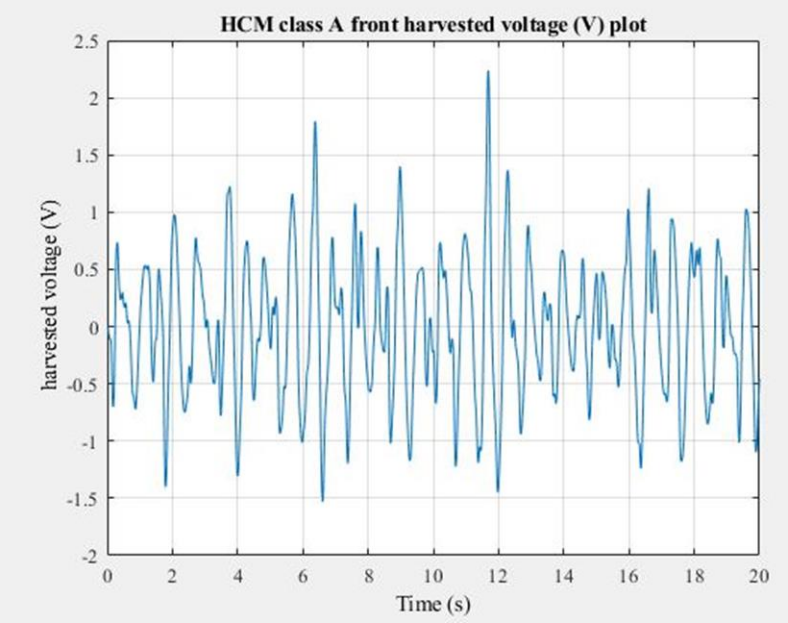
Şekil 4.48: ÇAM sınıf H yol rastgele uyarma toplanan güç (W).

Tablo 4.11: ÇAM rastgele uyarma grafiği tepe değerleri.

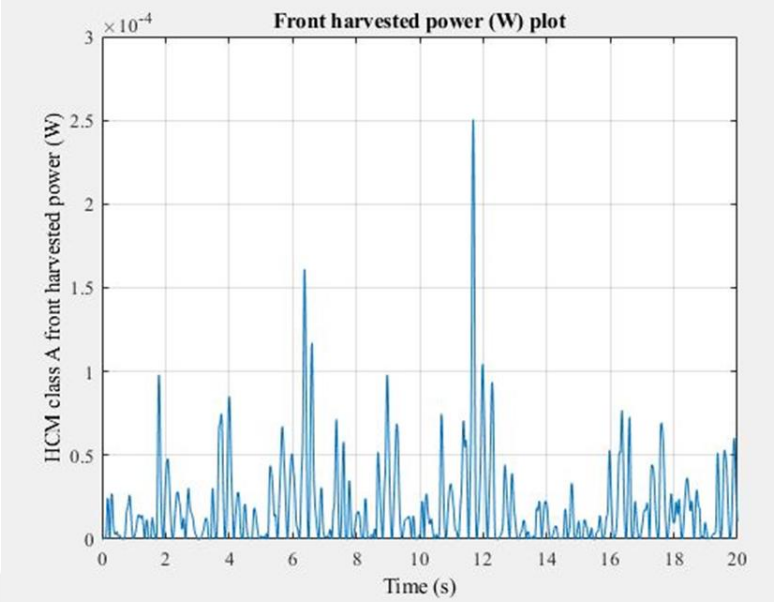
Yol Profili Sınıfı	Rastgele uyarma grafiği tepe değeri (m)	Toplanan voltaj grafiği Tepe değeri (V)	Toplanan güç grafiği tepe değeri (W)
A sınıfı	0.01319	1.949	0.00019
D sınıfı	0.1056	15.6	0.01217
G sınıfı	0.8445	125	0.7815
H sınıfı	1.689	250	3.126

4.4.2. YAM'nin Rastgele Uyarma sonuçları

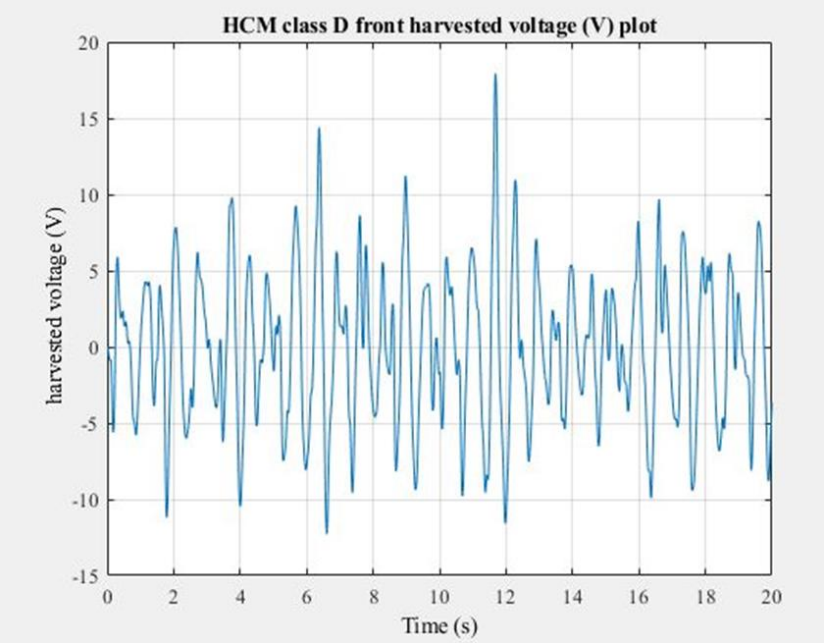
A sınıfı yol en iyi profili ve sürüş konforunu sağladığından, rakamlar YAM için benzerdir. Düşük titreşim seviyesi nedeniyle, toplanan güç ve voltaj tepe değerleri çok düşüktür (sırasıyla 0.0002506W ve 2.239V). D sınıfı yol, toplanmış güç ve voltaj tepe değerleri sırasıyla 0.1607W ve 17.93V olan ortalama sürüş kalitesi yoludur. G sınıfı yolun toplanan güç ve voltaj tepe değerleri sırasıyla 1.027W ve 143.3V'dir. H sınıfı yolun kaydedilen maksimum toplanan güç ve voltaj sırasıyla 4.108W ve 286.6V'dir. ÇAM tepe değerlerine kıyasla YAM için sırasıyla tepe güç ve voltaj değerleri için yaklaşık %31 ve %14'lük bir artış kaydedildi.



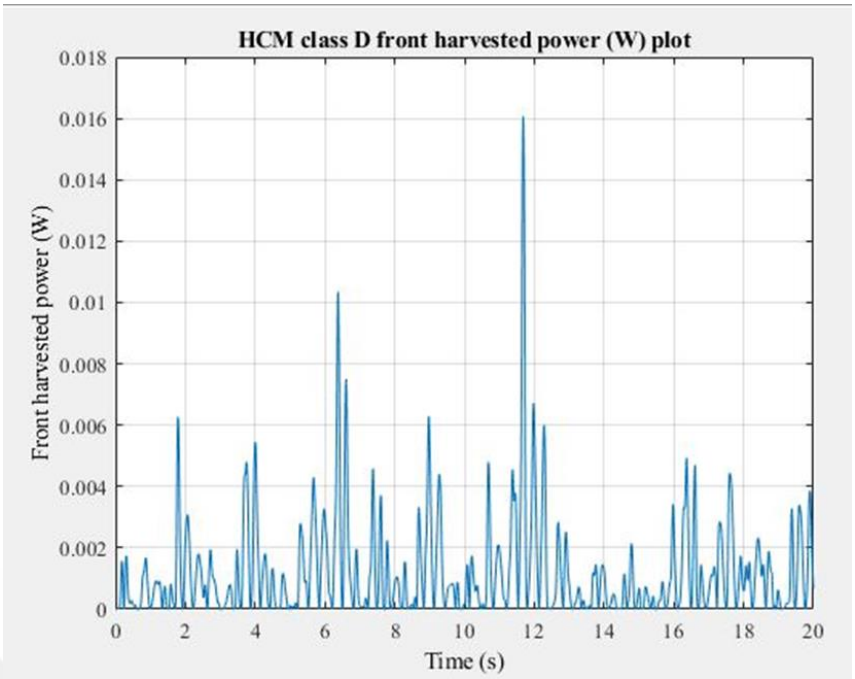
Şekil 4.49: YAM A sınıfı yol rastgele uyarma toplanan gerilim (V).



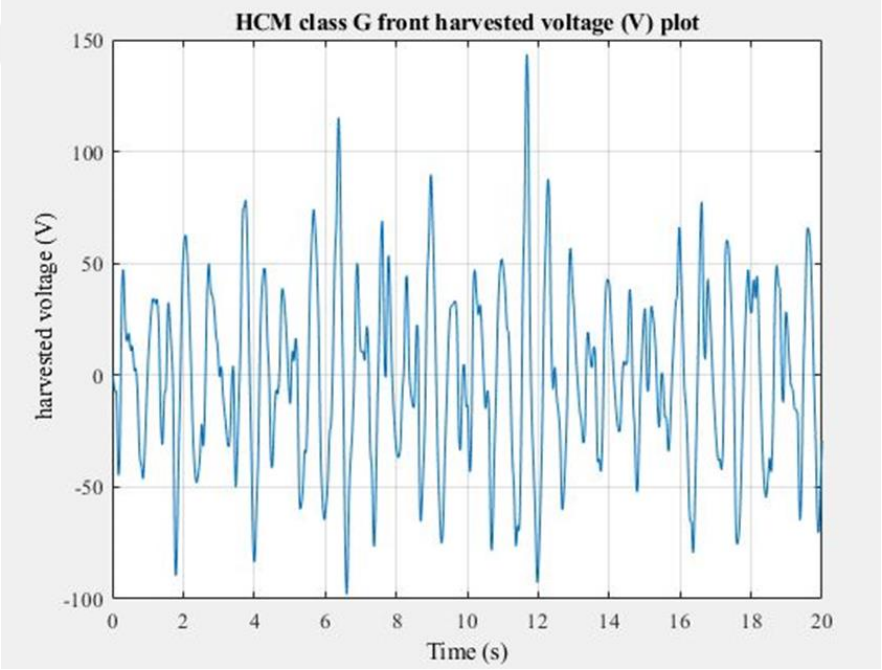
Şekil 4.50: YAM A sınıfı yol rastgele uyarma toplanan güç (W).



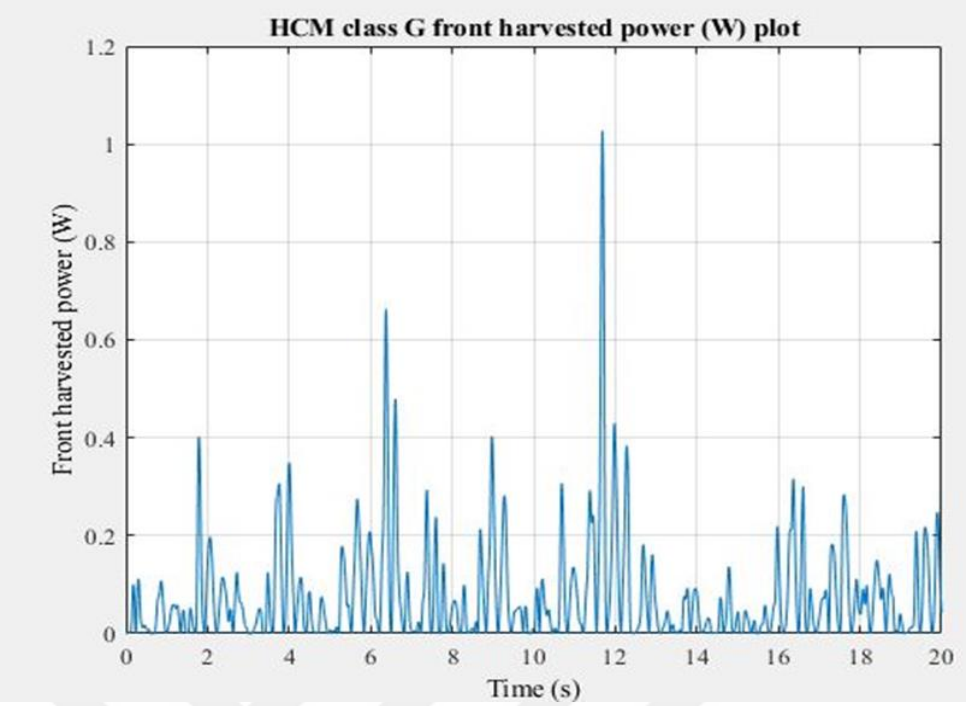
Şekil 4.51: YAM D sınıfı yol rastgele uyarma toplanan gerilim (V).



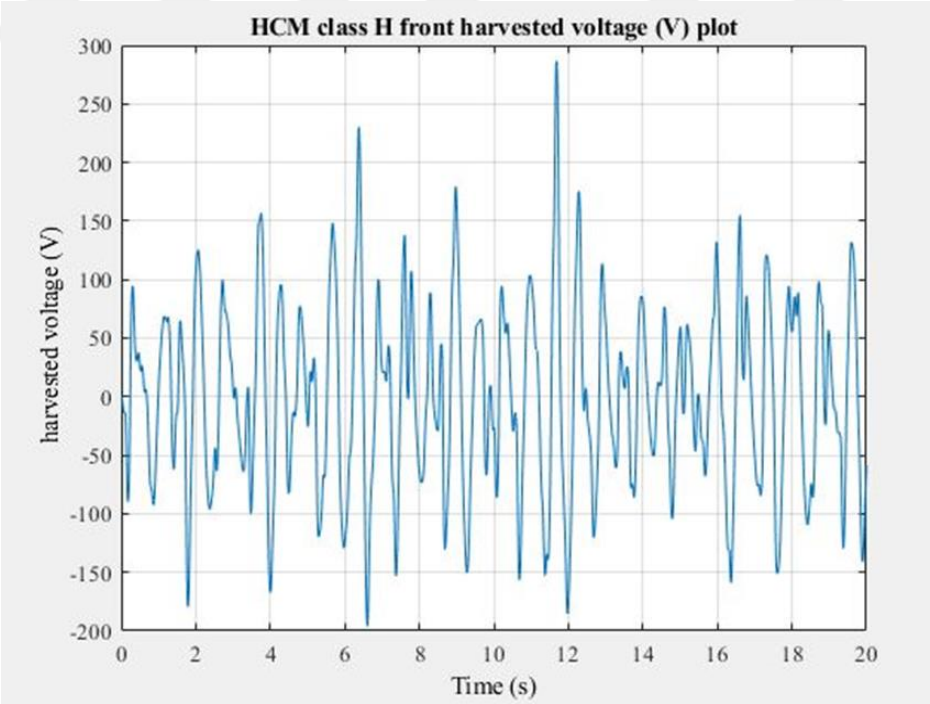
Şekil 4.52: YAM D sınıfı yol rastgele uyarma toplanan güç (W).



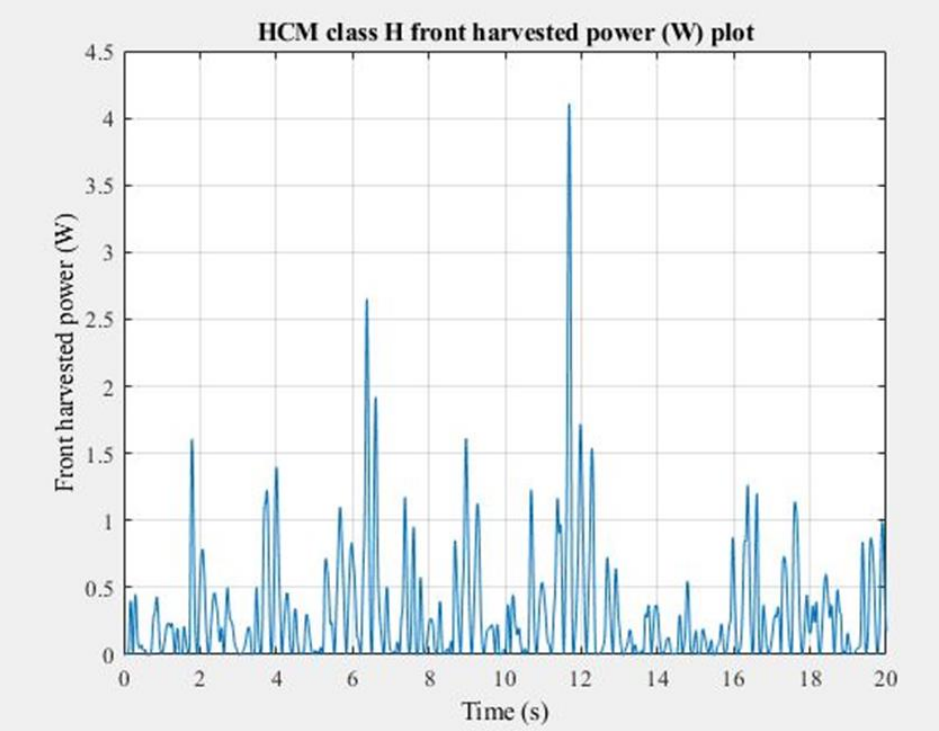
Şekil 4.53: YAM G sınıfı yol rastgele uyarma toplanan gerilim (V).



Şekil 4.54: YAM G sınıfı yol rastgele uyarma toplanan güç (W).



Şekil 4.55: YAM H sınıfı yol rastgele uyarma toplanan gerilim (V).



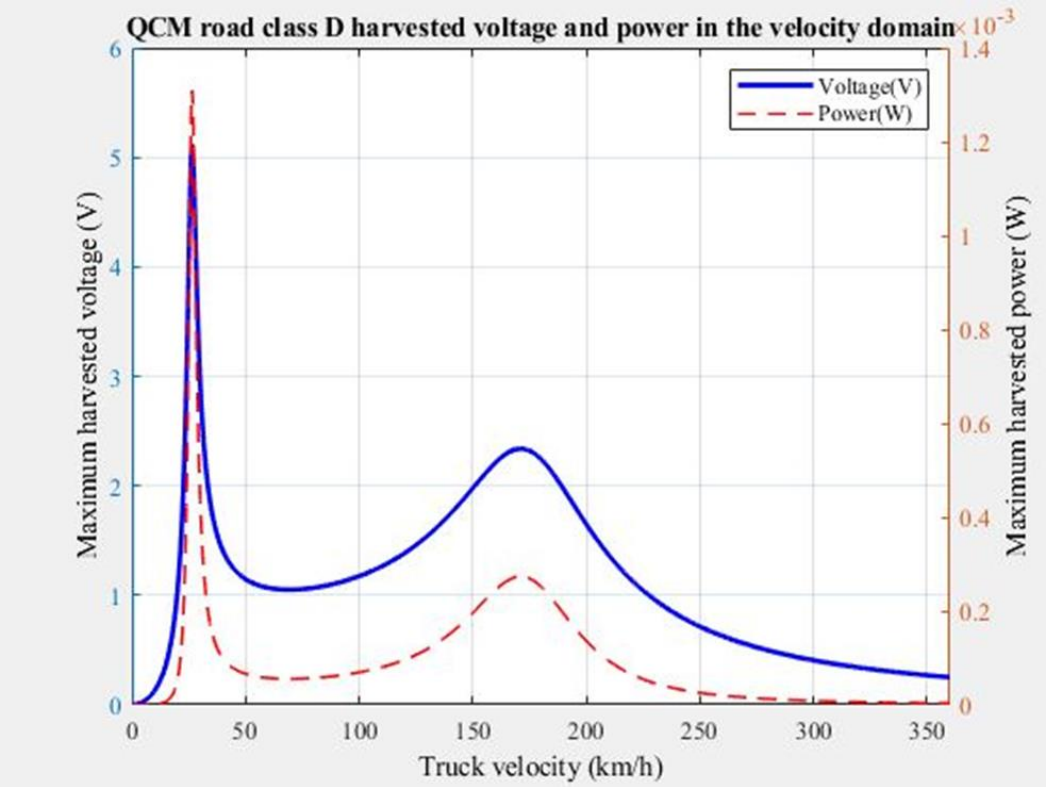
Şekil 4.56: : YAM H sınıfı yol rastgele uyarma toplanan güç (W).

Tablo 4.12: YAM rastgele uyarma grafiği tepe değerleri.

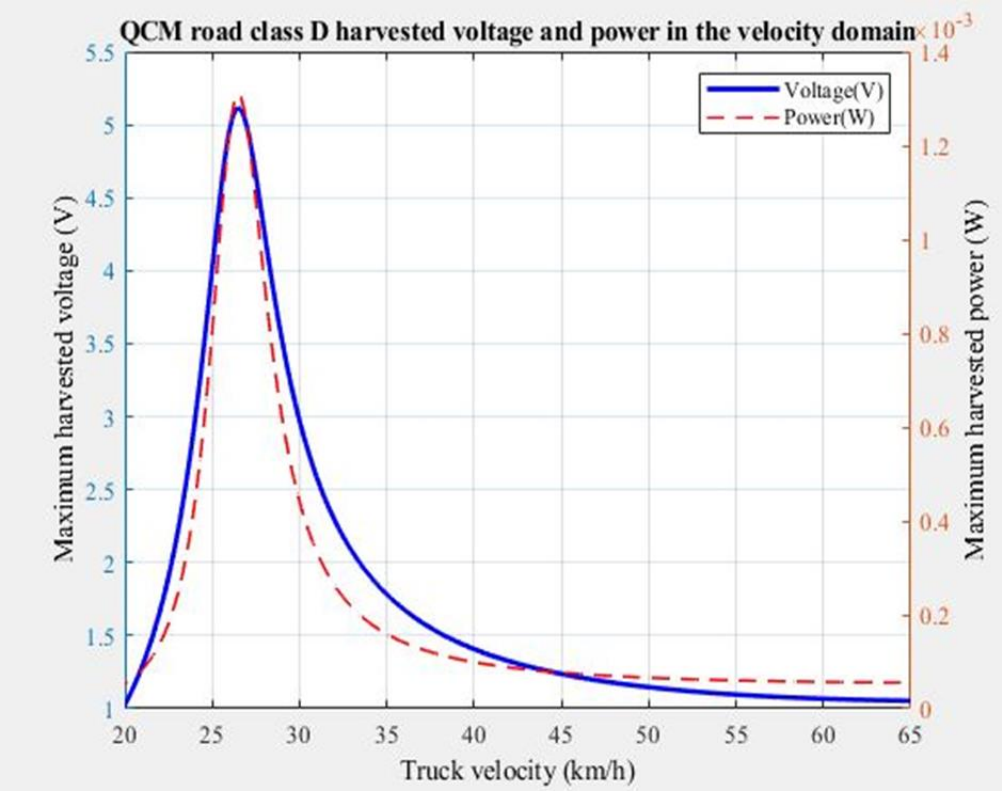
Yol Profili Sınıfı	Rastgele uyarma grafiği tepe değeri (m)	Toplanan voltaj grafiği Tepe değeri (V)	Toplanan güç grafiği tepe değeri (W)
A sınıfı	0.01866	2.239	0.0002506
D sınıfı	0.1493	17.93	0.01607
G sınıfı	1.194	143.3	1.027
H sınıfı	2.388	286.6	4.108

4.4.3. ÇAM D Sınıfı Rastgele Uyarma Kamyonun Hızına Göre Toplanan Güç Ve Gerilim.

CAT 777F kamyonun D Sınıfı bir yolda toplanan voltajı ve gücü, ÇAM için hızına göre temsil edildi. Daha sonra arsa, kamyonun gerçek çalışma hızlarına daraltıldı [20; 65km/s].



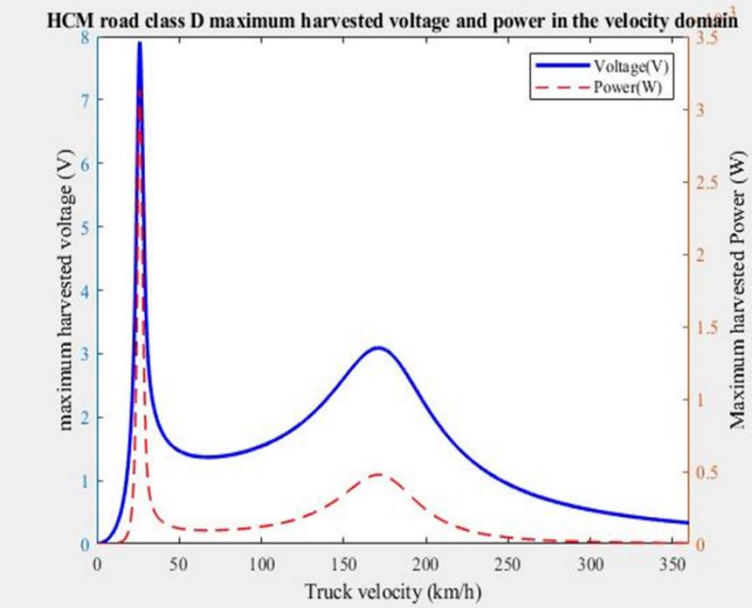
Şekil 4.57: ÇAM D Sınıfı rastgele uyarma, kamyonun hızına göre toplanan güç ve voltaj.



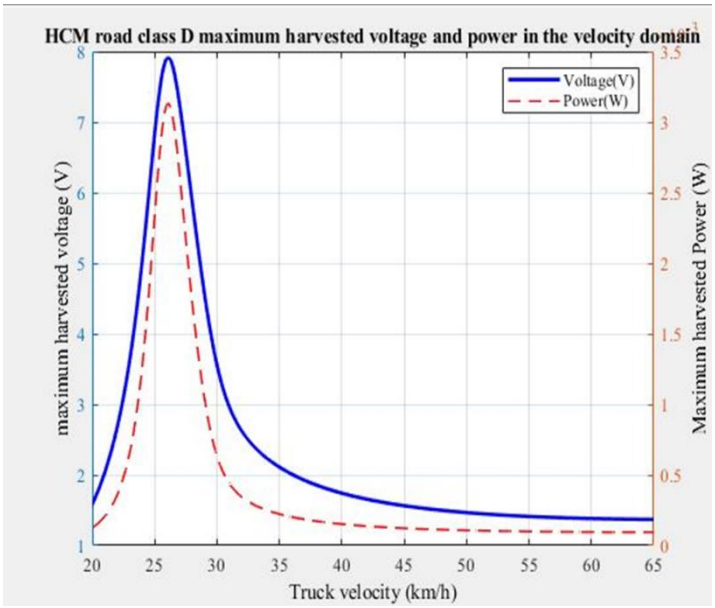
Şekil 4.58: ÇAM D Sınıfı rastgele uyarma, kamyonun gerçek çalışma hızlarında toplanan güç ve voltaj [20; 65km/s].

4.4.4. Kamyonun Hızına Göre YAM Sınıf D Rastgele Uyarma Toplanan Güç Ve Gerilim.

CAT 777F kamyonun D Sınıfı bir yolda toplanan voltajı ve gücü, YAM için de hızına göre temsil edildi. Arsa, kamyonun gerçek çalışma hızlarına kadar daraltıldı [20; 65km/s].



Şekil 4.59: YAM D Sınıfı rastgele uyarma, kamyonun hızına göre toplanan güç ve voltaj.

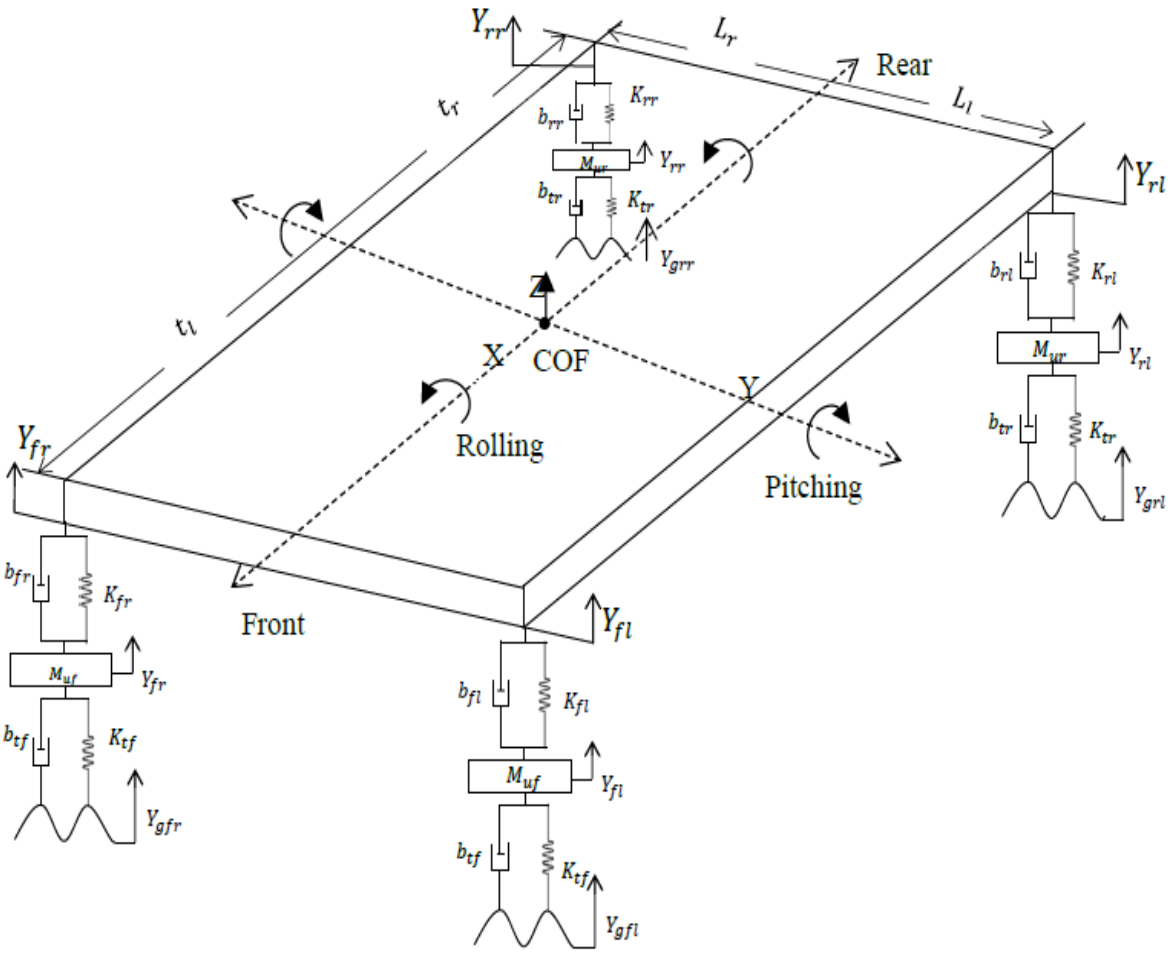


Şekil 4.60: ÇAM D Sınıfı rastgele uyarma, kamyonun gerçek çalışma hızlarında toplanan güç ve voltaj [20; 65km/s].

Bu çalışmanın bir sonraki bölümünde, elde edilen sonuçlar yol ve araba parametrelerinin toplanan güç ve voltaj üzerindeki etkileri tartışılacaktır.

4.5. TAM ARABA MODELİ (TAM) YAYLI DEPLASMAN

Tam araba modeli Şekil 4.61'de gösterilmektedir:



Şekil 4.61: Tam araba modeli şematik gösterimi.

Lastik sönümleme katsayılarını ihmal edilebilir olarak değerlendirerek:

- **Yaylı kütle dikey yer değiştirme denklemi**

$$M_s\ddot{y}_s = -K_{sfr}(y_s - L_1\theta - L_l\Phi - y_{fr}) - K_{sfl}(y_s - L_1\theta + L_r\Phi - y_{fl}) - K_{srr}(y_s + L_2\theta - L_l\Phi - y_{rr}) - K_{srl}(y_s + L_2\theta + L_r\Phi - y_{rl}) - C_{sfr}(\dot{y}_s - L_1\dot{\theta} - L_l\dot{\Phi} - \dot{y}_{rl}) -$$

$C_{sfl}(\dot{y}_s - L_1\dot{\theta} + L_r\dot{\Phi} - \dot{y}_{fl}) - C_{srr}(\dot{y}_s + L_2\dot{\theta} - L_l\dot{\Phi} - \dot{y}_{rl}) - C_{srl}(\dot{y}_s + L_2\dot{\theta} - L_r\dot{\Phi} - \dot{y}_{rl}) \Leftrightarrow$

$M_s\ddot{y}_s = (-K_{sfr}-K_{sfl}-K_{srr}-K_{srl})y_s + (-C_{sfr}-C_{sfl}-C_{srr}-C_{srl})\dot{y}_s + (L_1K_{sfr} + L_1K_{sfl} - L_2K_{srr} - L_2K_{srl})\theta + (L_1C_{sfr} + L_1C_{sfl} - L_2C_{srr} - L_2C_{srl})\dot{\theta} + (L_lK_{sfr} - L_rK_{sfl} - L_lK_{srr} + L_rK_{srl})\Phi + (L_lC_{sfr} - L_rC_{sfl} + L_lC_{srr} - L_rC_{srl})\dot{\Phi} + (K_{sfr})y_{fr} + (K_{sfl})y_{fl} + (K_{srr})y_{rr} + (K_{srl})y_{rl} + (C_{sfr})\dot{y}_{fr} + (C_{sfl})\dot{y}_{fl} + (C_{srr})\dot{y}_{rr} + (C_{srl})\dot{y}_{rl}$ (4.69)

- **Yaylı kütle eğim hareket denklemi**

$I_y\ddot{\theta} = K_{sfr}(y_s - L_1\theta - L_l\Phi - y_{fr})L_1 + K_{sfl}(y_s - L_1\theta + L_r\Phi - y_{fl})L_1 - K_{srr}(y_s + L_2\theta - L_l\Phi - y_{rr})L_2 - K_{srl}(y_s + L_2\theta + L_r\Phi - y_{rl})L_2 - C_{sfr}(\dot{y}_s - L_1\dot{\theta} - L_l\dot{\Phi} - \dot{y}_{fr})L_1 + C_{sfl}(\dot{y}_s - L_1\dot{\theta} + L_r\dot{\Phi} - \dot{y}_{fl})L_1 - C_{srr}(\dot{y}_s + L_2\dot{\theta} - L_l\dot{\Phi} - \dot{y}_{rr})L_2 - C_{srl}(\dot{y}_s + L_2\dot{\theta} + L_r\dot{\Phi} - \dot{y}_{rl})L_2 \Leftrightarrow$

$I_y\ddot{\theta} = (L_1K_{sfr} + L_1K_{sfl} - L_2K_{srr} - L_2K_{srl})y_s + (L_1C_{sfr} + L_1C_{sfl} - L_2C_{srr} - L_2C_{srl})\dot{y}_s + (-L_1^2K_{sfr} - L_1^2K_{sfl} - L_2^2K_{srr} - L_2^2K_{srl})\theta + (-L_1^2C_{sfr} - L_1^2C_{sfl} - L_2^2C_{srr} - L_2^2C_{srl})\dot{\theta} + (-L_1L_lK_{sfr} + L_1L_rK_{sfl} + L_2L_lK_{srr} - L_2L_rK_{srl})\Phi + (-L_1L_lC_{sfr} + L_1L_rC_{sfl} + L_2L_lC_{srr} - L_2L_rC_{srl})\dot{\Phi} + (-L_1K_{sfr})y_{fr} + (-L_1K_{sfl})y_{fl} + (L_2K_{srr})y_{fr} + (L_2K_{srl})y_{rl} + (-L_1C_{sfr})\dot{y}_{fr} + (-L_1C_{sfl})\dot{y}_{fl} + (L_2C_{srr})\dot{y}_{fr} + (L_2C_{srl})\dot{y}_{rl}$ (4.70)

- **Yaylı kütle yuvarlanma hareketi denklemi**

$I_x\ddot{\Phi} = K_{sfr}(y_s - L_1\theta - L_l\Phi - y_{fr})L_l - K_{sfl}(y_s - L_1\theta + L_r\Phi - y_{fl})L_r + K_{srr}(y_s + L_2\theta - L_l\Phi - y_{rr})L_l + K_{srl}(y_s + L_2\theta + L_r\Phi - y_{rl})L_r + C_{sfr}(\dot{y}_s - L_1\dot{\theta} - L_l\dot{\Phi} - \dot{y}_{fr})L_l - C_{sfl}(\dot{y}_s - L_1\dot{\theta} + L_r\dot{\Phi} - \dot{y}_{fl})L_r + C_{srr}(\dot{y}_s + L_2\dot{\theta} - L_l\dot{\Phi} - \dot{y}_{rr})L_l - C_{srl}(\dot{y}_s + L_2\dot{\theta} + L_r\dot{\Phi} - \dot{y}_{rl})L_r \Leftrightarrow$

$I_x\ddot{\Phi} = (L_lK_{sfr} - L_rK_{sfl} + L_lK_{srr} - L_rK_{srl})y_s + (L_lC_{sfr} - L_rK_{sfl} + L_lC_{srr} - L_rC_{srl})\dot{y}_s + (-L_1L_lK_{sfr} + L_1L_rK_{sfl} + L_2L_lK_{srr} - L_2L_rK_{srl})\theta + (-L_1L_lC_{sfr} + L_1L_rC_{sfl} + L_2L_lC_{srr} - L_2L_rC_{srl})\dot{\theta} + (-L_l^2K_{sfr} - L_r^2K_{sfl} - L_l^2K_{srr} - L_r^2K_{srl})\Phi + (-L_l^2C_{sfr} - L_r^2C_{sfl} - L_l^2C_{srr} - L_r^2C_{srl})\dot{\Phi} + (-L_lK_{sfr})y_{fr} + (L_rK_{sfl})y_{fl} + (-L_lK_{srr})y_{fr} + (L_rK_{srl})y_{rl} + (-L_lC_{sfr})\dot{y}_{fr} + (L_rC_{sfl})\dot{y}_{fl} + (-L_lC_{srr})\dot{y}_{fr} + (L_rC_{srl})\dot{y}_{rl}$ (4.71)

- **Ön sağ lastiğin dikey hareket denklemi**

$M_{fr}\ddot{y}_{fr} = K_{sfr}y_s + C_{sfr}\dot{y}_s + (-L_1K_{sfr})\theta + (-L_1C_{sfr})\dot{\theta} + (-L_lK_{sfr})\Phi + (-L_lC_{sfr})\dot{\Phi} + (-K_{sfr} - K_{ufr})y_{fr} + (C_{sfr})\dot{y}_{fr} + K_{ufr}y_{Rfr} \Leftrightarrow$

$$M_{fr}\ddot{y}_{fr} = K_{sfr}(y_s - L_1\theta - L_l\Phi - y_{fr}) - K_{ufr}(y_{fr} - y_{Rfr}) + C_{sfr}\left(\dot{y}_s - L_1\dot{\theta} - L_l\dot{\Phi} - \dot{y}_{fr}\right) \quad (4.72)$$

- **Ön sol lastiğin dikey hareket denklemi**

$$M_{fl}\ddot{y}_{fl} = K_{sfl}y_s + C_{sfr}\dot{y}_s + (-L_1K_{sfl})\theta + (-L_1C_{sfl})\dot{\theta} + (L_rK_{sfl})\Phi + (L_rC_{sfl})\dot{\Phi} + (-K_{sfl} - K_{ufl})y_{fl} + (-C_{sfl})\dot{y}_{fl} + K_{ufl}y_{Rfl} \Leftrightarrow$$

$$M_{fl}\ddot{y}_{fl} = K_{sfl}(y_s - L_1\theta + L_r\Phi - y_{fl}) - K_{ufl}(y_{fl} - y_{Rfl}) + C_{sfl}\left(\dot{y}_s - L_1\dot{\theta} + L_r\dot{\Phi} - \dot{y}_{fl}\right) \quad (4.73)$$

- **Arka sağ lastiğin dikey hareket denklemi**

$$M_{rr}\ddot{y}_{rr} = K_{srr}y_s + C_{srr}\dot{y}_s + (L_2K_{srr})\theta + (L_2C_{srr})\dot{\theta} + (-L_lK_{srr})\Phi + (-L_lC_{srr})\dot{\Phi} + (-K_{srr} - K_{urr})y_{rr} + (-C_{srr})\dot{y}_{rr} + K_{urr}y_{Rrr} \Leftrightarrow$$

$$M_{rr}\ddot{y}_{rr} = K_{srr}(y_s + L_2\theta - L_l\Phi - y_{rr}) - K_{urr}(y_{rr} - y_{Rrr}) + C_{srr}\left(\dot{y}_s + L_2\dot{\theta} - L_l\dot{\Phi} - \dot{y}_{rr}\right) \quad (4.74)$$

- **Arka sol lastiğin dikey hareket denklemi**

$$M_{rl}\ddot{y}_{rl} = K_{srl}y_s + C_{srl}\dot{y}_s + (L_2K_{srl})\theta + (L_2C_{srl})\dot{\theta} + (L_rK_{srl})\Phi + (L_rC_{srl})\dot{\Phi} + (-K_{srl} - K_{url})y_{rl} + (-C_{srl})\dot{y}_{rl} + K_{url}y_{Rrl} \Leftrightarrow$$

$$M_{rl}\ddot{y}_{rl} = K_{srl}(y_s + L_2\theta + L_r\Phi - y_{rl}) - K_{url}(y_{rl} - y_{Rrl}) + C_{srl}\left(\dot{y}_s + L_2\dot{\theta} + L_r\dot{\Phi} - \dot{y}_{rl}\right) \quad (4.75)$$

Burada,

M_s yaylı kütledir (araba gövdesi)

M_{fr} ön sağ lastik kütlesidir

M_{fl} ön sol lastik kütlesidir

M_{rr} arka sağ lastik kütlesidir

M_{rl} arka sol lastik kütlesidir

y_s yaylı kütle (araba gövdesi) yer değiştirmesidir

θ yaylı kütle adım açısıdır

Φ yaylı kütle yuvarlanma açısıdır

L_1, ön aks ile ağırlık merkezi arasındaki mesafedir.

L_2, arka aks ile ağırlık merkezi arasındaki mesafedir.

L_l, arabanın sol tarafı ile ağırlık merkezi arasındaki mesafedir.

L_r, arabanın sağ tarafı ile ağırlık merkezi arasındaki mesafedir.

y_{fr} ön sağ lastik deplasmanıdır

y_{fl} ön sol lastik deplasmanıdır

y_{rr} sağ arka lastik hacmidir

y_{rl} gerçek sol lastik deplasmanı

y_{Rfr} sağ ön lastik yol girişidir

y_{Rfl} ön sol lastik yol girişidir

y_{Rrr} sağ arka lastik yol girişidir

y_{Rrl} gerçek sol lastik yol girişidir

K_{sfr}, sağ ön süspansiyon sertlik katsayısıdır

K_{srr} sağ arka süspansiyon sertlik katsayısıdır

K_{sfl} ön sol süspansiyon sertlik katsayısıdır

K_{srl}, arka sol süspansiyon sertlik katsayısıdır

K_{ufr}, sağ ön lastik sertlik katsayısıdır

K_{urr}, sağ arka lastik sertlik katsayısıdır

K_{ufl}, sol ön lastik sertlik katsayısıdır

K_{url}, sol arka lastik sertlik katsayısıdır

b_{sfr} sağ ön süspansiyon sönümleme katsayısıdır

b_{srr} arka sağ süspansiyon sönümleme katsayısıdır

b_{sfl} ön sol süspansiyon sönümleme katsayısıdır

b_{srl} arka sol süspansiyon sönümleme katsayısıdır

I_y, y ekseni etrafındaki atalet momentidir (ağırlık merkezinden geçen ve kamyon dingillerine paralel)

I_x, x ekseni etrafındaki (ağırlık merkezinden geçen ve kamyon dingillerine dik olan) eylemsizlik momentidir.

4.5.1. Tam Araba Modelinin Durum Uzayı İfadeleri

$y_s = x_1;\ \dot{y}_s = x_2;\ \theta = x_3;\ \dot{\theta} = x_4;\ \Phi = x_5;\ \dot{\Phi} = x_6; y_{fr} = x_7;\ \dot{y}_{fr} = x_8; y_{fl} = x_9;\ \dot{y}_{fl} = x_{10}; y_{rr} = x_{11};\ \dot{y}_{rr} = x_{12};\ y_{rl} = x_{13};\ \dot{y}_{rl} = x_{14}$

Yedi hareket denklemindeki değişkenleri değiştirerek, durum uzayı matrisi formları yazılabilir.

$$\left[\dot{X}\right] = [A][X] + [B][U] \quad (4.76)$$

$$[Y] = [C][X] + [D][U] \quad (4.77)$$

Burada,

[A] durum matrisidir

[X] durum vektörüdür

[B] giriş matrisidir

[U] giriş vektörüdür

[Y] çıktı vektörüdür

[C] çıktı matrisidir

[D] geçiş matrisidir.

$$[A] = [A_1; A_2; A_3; A_4; A_5; A_6; A_7; A_8; A_9; A_{10};; A_{11};\ ; A_{12};\ ; A_{13};\ ; A_{14}]$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{ufr}}{M_{fr}} & 0 & \frac{K_{ufl}}{M_{fl}} & 0 & \frac{K_{urr}}{M_{rr}} & 0 & \frac{K_{url}}{M_{rl}} \end{bmatrix}$$

$$[U] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{Rfr} & 0 & y_{Rfl} & 0 & y_{Rrr} & 0 & y_{Rrl} \end{bmatrix}$$

Çıktı matrisi ölçmek istediğimiz miktara bağlıdır:

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$[C(1)] = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$ y_s'yi almak için

$[C(3)] = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$ θ'i almak için

$[C(5)] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$ Φ'yi almak için

Geçiş matrisi

$$[D] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$[A_1] = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$[A_3] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$[A_5] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$[A_7] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$[A_9] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$[A_{11}] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

$$[A_{13}] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

$$[A_2] = \begin{pmatrix} \frac{-K_{sfr} - K_{sfl} - K_{srr} - K_{srl}}{M_s} \\ \frac{-C_{sfr} - C_{sfl} - C_{srr} - C_{srl}}{M_s} \\ \frac{L_1K_{sfr} + L_1K_{sfl} - L_2K_{srr} - L_2K_{srl}}{M_s} \\ \frac{L_1C_{sfr} + L_1C_{sfl} - L_2C_{srr} - L_2C_{srl}}{M_s} \\ \frac{L_lK_{sfr} - L_rK_{sfl} + L_lK_{srr} - L_rK_{srl}}{M_s} \\ \frac{L_lC_{sfr} - L_rC_{sfl} + L_lC_{srr} - L_rC_{srl}}{M_s} \\ \frac{K_{sfr}}{M_s} \\ \frac{C_{sfr}}{M_s} \\ \frac{K_{sfl}}{M_s} \\ \frac{C_{sfl}}{M_s} \\ \frac{K_{srr}}{M_s} \\ \frac{C_{srr}}{M_s} \\ \frac{K_{srl}}{M_s} \\ \frac{C_{srl}}{M_s} \end{pmatrix}^T$$

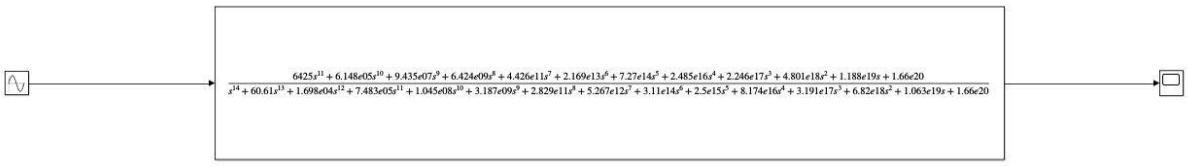
$$[A_4] = \begin{pmatrix} \frac{L_1K_{sfr} + L_1K_{sfl} - L_2K_{srr} - L_2K_{srl}}{I_y} \\ \frac{L_1C_{sfr} + L_1C_{sfl} - L_2C_{srr} - L_2C_{srl}}{I_y} \\ \frac{-L_1{}^2K_{sfr} - L_1{}^2K_{sfl} - L_2{}^2K_{srr} - L_2{}^2K_{srl}}{I_y} \\ \frac{-L_1{}^2C_{sfr} - L_1{}^2C_{sfl} - L_2{}^2C_{srr} - L_2{}^2C_{srl}}{I_y} \\ \frac{-L_1K_{sfr}}{I_y} \\ \frac{-L_1C_{sfr}}{I_y} \\ \frac{-L_1K_{sfl}}{I_y} \\ \frac{-L_1C_{sfl}}{I_y} \\ \frac{L_2K_{srr}}{I_y} \\ \frac{L_2C_{srr}}{I_y} \\ \frac{L_2K_{srl}}{I_y} \\ \frac{L_2C_{srl}}{I_y} \end{pmatrix}^T$$

$$[A_6] = \begin{pmatrix} \frac{L_l K_{sfr} - L_r K_{sfl} + L_l K_{srr} - L_r K_{srl}}{I_x} \\ \frac{L_l C_{sfr} - L_r C_{sfl} + L_l C_{srr} - L_r C_{srl}}{I_x} \\ \frac{-L_1 L_l K_{sfr} + L_1 L_r K_{sfl} + L_2 L_l K_{srr} - L_2 L_r K_{srl}}{I_x} \\ \frac{-L_1 L_l C_{sfr} + L_1 L_r C_{sfl} + L_2 L_l C_{srr} - L_2 L_r C_{srl}}{I_x} \\ \frac{-{L_l}^2 K_{sfr} - {L_r}^2 K_{sfl} - {L_l}^2 K_{srr} - {L_r}^2 K_{srl}}{I_x} \\ \frac{-{L_l}^2 C_{sfr} - {L_r}^2 C_{sfl} - {L_l}^2 C_{srr} - {L_r}^2 C_{srl}}{I_x} \\ \frac{-L_l K_{sfr}}{I_x} \\ \frac{L_l C_{sfr}}{I_x} \\ \frac{L_r K_{sfl}}{I_x} \\ \frac{L_r C_{sfl}}{I_x} \\ \frac{-L_l K_{srr}}{I_x} \\ \frac{-L_l C_{srr}}{I_x} \\ \frac{L_r K_{srl}}{I_y} \\ \frac{L_r C_{srl}}{I_x} \end{pmatrix}^T$$

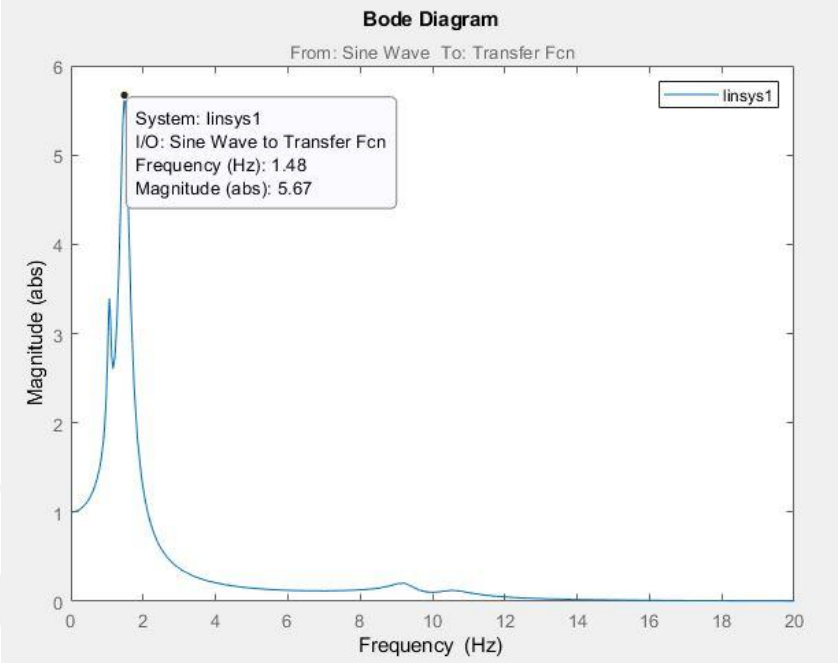
$$[A_8] = \begin{pmatrix} \frac{K_{sfr}}{M_{fr}} \\ \frac{C_{sfr}}{M_{fr}} \\ \frac{-L_1 K_{sfr}}{M_{fr}} \\ \frac{-L_1 C_{sfr}}{M_{fr}} \\ \frac{-L_l K_{sfr}}{M_{fr}} \\ \frac{-L_l C_{sfr}}{M_{fr}} \\ \left(\frac{-K_{sfr}-K_{ufr}}{M_{fr}}\right) \\ \frac{-C_{sfr}}{M_{fr}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T ; [A_{10}] = \begin{pmatrix} \frac{K_{sfl}}{M_{fl}} \\ \frac{C_{sfl}}{M_{fl}} \\ \frac{-L_1 K_{sfl}}{M_{fl}} \\ \frac{-L_1 C_{sfl}}{M_{fl}} \\ \frac{L_r K_{sfl}}{M_{fl}} \\ \frac{L_r C_{sfl}}{M_{fl}} \\ 0 \\ 0 \\ \left(\frac{-K_{sfl}-K_{ufl}}{M_{fl}}\right) \\ \frac{-C_{sfl}}{M_{fl}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T ; [A_{12}] = \begin{pmatrix} \frac{K_{srr}}{M_{rr}} \\ \frac{C_{srr}}{M_{rr}} \\ \frac{L_2 K_{srr}}{M_{rr}} \\ \frac{L_2 C_{srr}}{M_{rr}} \\ \frac{-L_l K_{srr}}{M_{rr}} \\ \frac{-L_l C_{srr}}{M_{rr}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \left(\frac{-K_{srr}-K_{urr}}{M_{rr}}\right) \\ \frac{-C_{srr}}{M_{rr}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T ; [A_{14}] = \begin{pmatrix} \frac{K_{srl}}{M_{rl}} \\ \frac{C_{srl}}{M_{rl}} \\ \frac{L_2 K_{srl}}{M_{rl}} \\ \frac{L_2 C_{srl}}{M_{rl}} \\ \frac{L_r K_{srl}}{M_{rl}} \\ \frac{L_r C_{srl}}{M_{rl}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \left(\frac{-K_{srl}-K_{url}}{M_{rl}}\right) \\ \frac{-C_{srl}}{M_{rl}} \end{pmatrix}^T$$

4.5.2. Tam Araba Modeli Yaylı Kütlenin Bode Büyüklük Grafiği

FCM yayılan kütlesinin bir transfer fonksiyonu kullanılarak Simulink gösterimi Şekil 4.62'de gösterilmektedir. Yaylanmış kütle rezonans frekansı, tepe büyüklüğünde tanımlandı. Değeri Şekil 4.63'da gösterildiği gibi 1.49 Hz'dir. İyi bir sürüş kalitesi için yaylı kütle rezonans frekansı 1,5 Hz'den az olmalıdır. Ardından, sürüş konforu gereksinimi karşılanır.



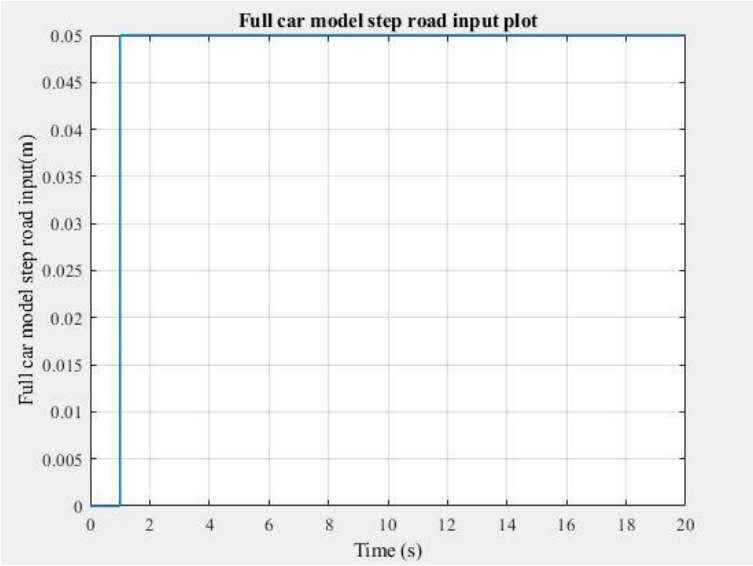
Şekil 4.62: Bir transfer fonksiyonu kullanarak TAM kütle simulink gösterimini.



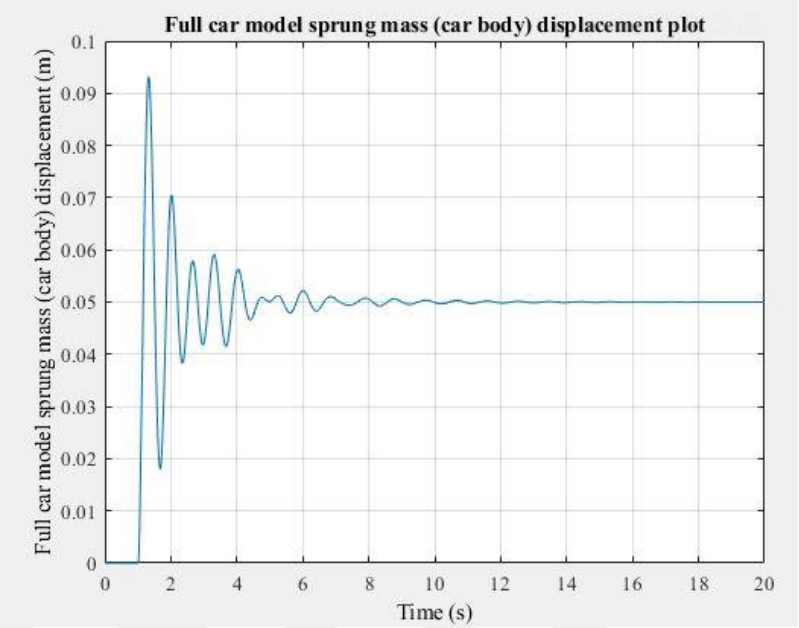
Şekil 4.63: TAM yaylı kütle Bode büyüklük grafiği.

4.5.3. Tam Araba Modeli Step Girişi Yanıtı

Step yol girişi ve araba gövdesi deplasman grafiği sırasıyla Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te gösterilmektedir.



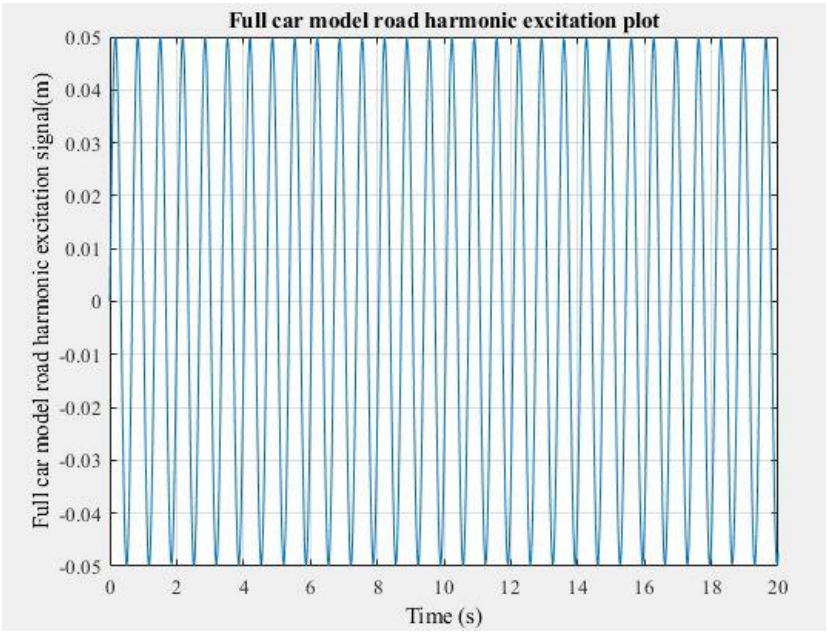
Şekil 4.64: TAM step yol giriş grafiği.



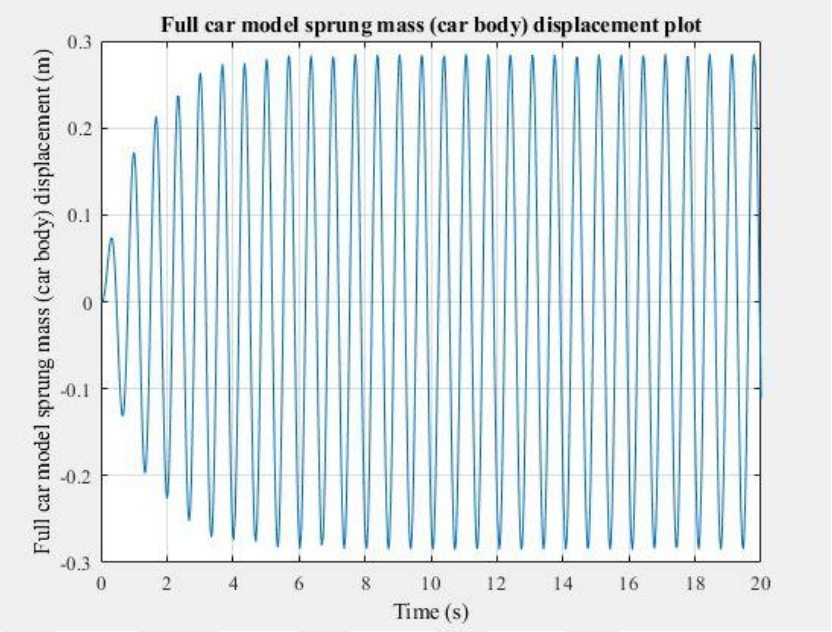
Şekil 4.65: TAM step yol girişi yaylı kütle yer değiştirme grafiği.

4.5.4. Tam Araba Modeli Harmonik Uyarma Tepkisi

Harmonik yol uyarımı ve araba gövdesi yer değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 4.66 ve Şekil 4.67'te gösterilmektedir.



Şekil 4. 66: TAM harmonik yol uyarma grafiği.

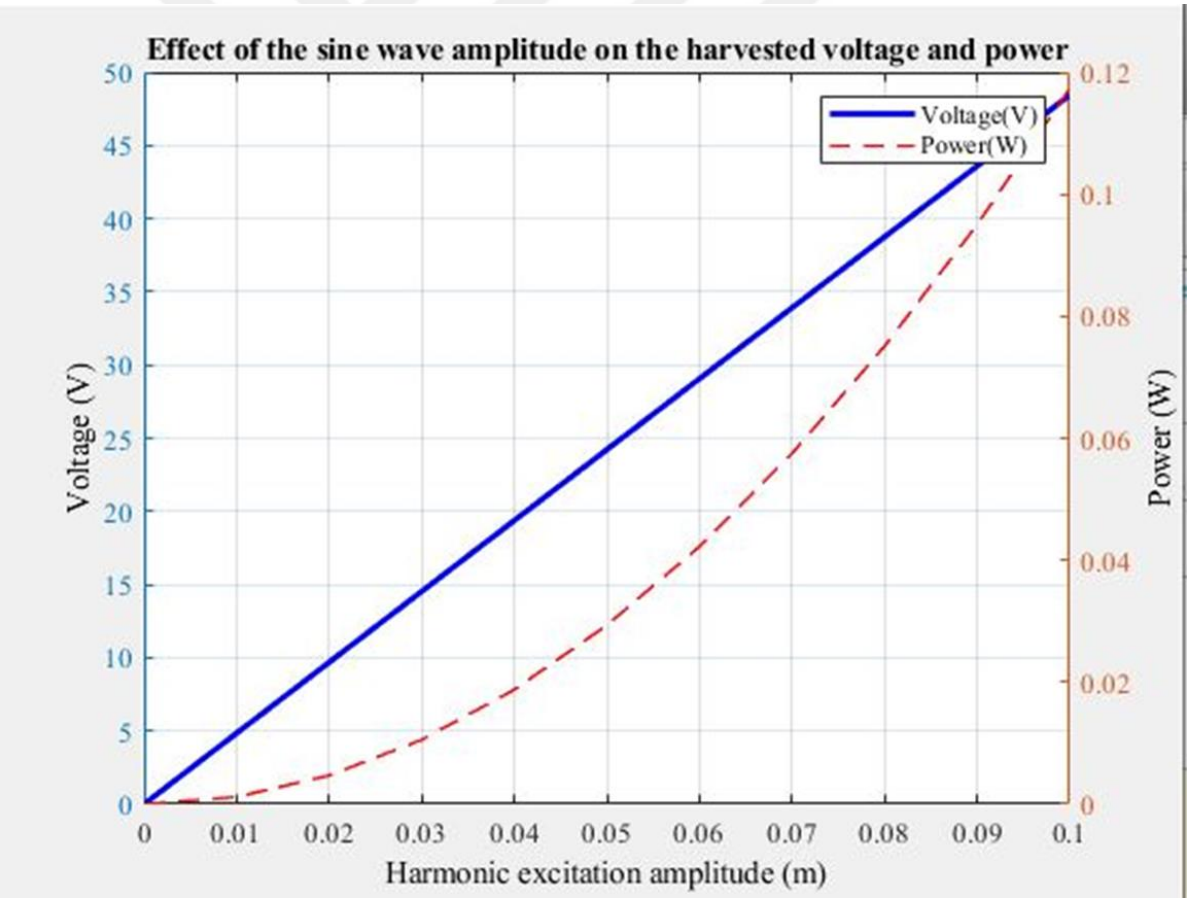


Şekil 4.67: TAM harmonik yol uyarma yaylı kütle yer değiştirme tepkisi.

5. TARTIŞMA

5.1. YOL PARAMETRELERİNİN YAM'NİN TOPLANMIŞ GERİLİM VE GÜÇ ÜZERİNE ETKİLERİ.

Sinüs dalgası ivme genliği, piezoelektrik enerji toplama sisteminin performansları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Şekil 5.1'de gösterildiği gibi, sinüs dalgası uyarımının genliği ile toplanan voltaj ve güç artar. Güç, direnç üzerindeki voltajın karesi olduğundan, güç ikinci dereceden bir ilişki yoluyla artar. Bu simülasyon için amplitüe edilen yol 0 ile 0.1 m arasında değişmiştir. Diğer parametreler sabit tutuldu.



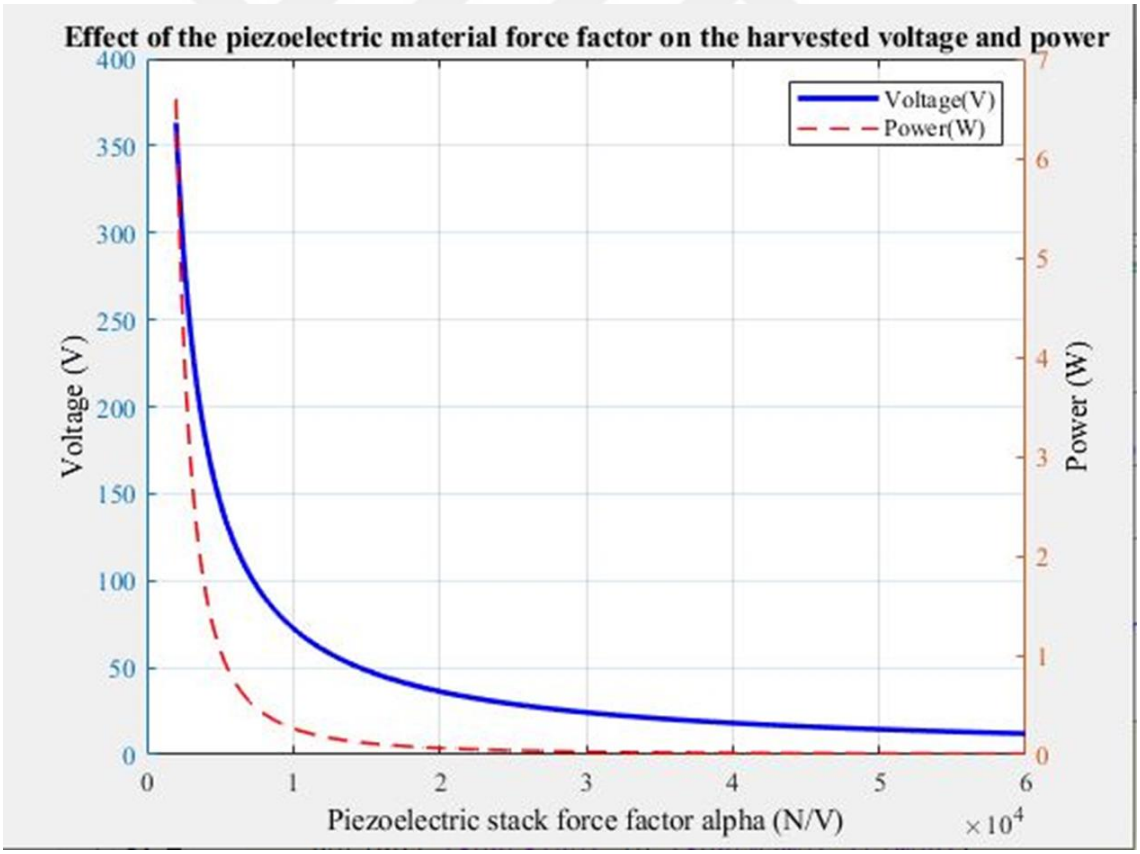
Şekil 5.1: Yol sinüs dalgası genliğinin YAM'nin toplanan gerilim ve güç üzerindeki etkisi.

Ayrıca harmonik profilli yollar, kademeli ve rastgele uyarma giriş türlerine göre daha tutarlı ve sürdürülebilir enerji sağlar. Maksimum güç ve enerji, yaylı (araba gövdesi) rezonans frekansında toplanır. Frekans, yol dalga uzunluğuna ve araba hızına bağlı olacaktır.

5.2. PIEZOELEKTRİK Yığın PARAMETRELERİNİN YAM'NİN TOPLANAN GERİLİM VE GÜÇ ÜZERİNE ETKİLERİ.

5.2.1. Piezoelektrik Yığının Kuvvet Faktörünün Toplanan Güç Ve Gerilim Üzerindeki Etkisi.

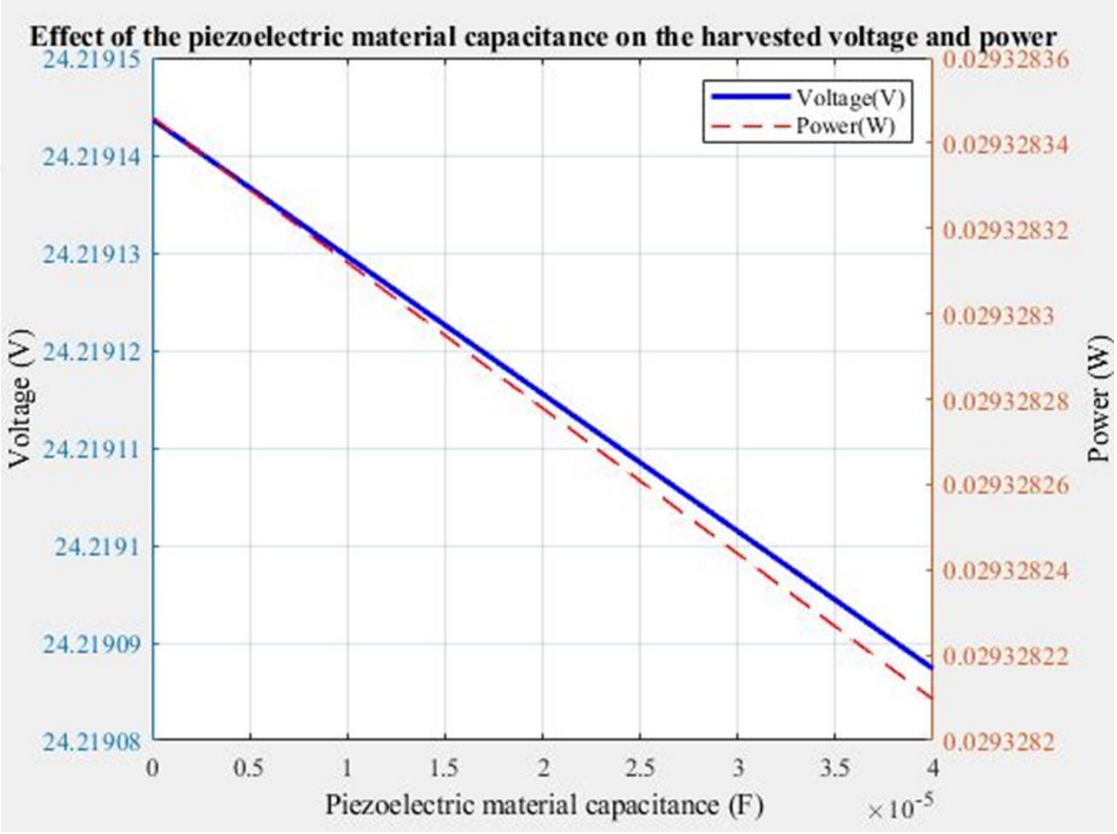
Bir piezoelektrik yığının kuvvet faktörü, bir volt üretmek için gerekli kuvvet miktarı olarak tanımlanabilir. Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, toplanan güç, piezoelektrik yığının kuvvet faktörü ile ters orantılı olarak azalır.



Şekil 5.2: Piezoelektrik yığın kuvvet faktörünün toplanan voltaj ve güç üzerindeki etkileri.

5.2.2. Piezoelektrik Yığının Kapasitansının Toplanan Güç Ve Gerilim Üzerindeki Etkisi.

Kapasitans, birçoğu kapasitörlerle aynı seramik malzemelerden yapıldığı için piezoelektrik malzemelerin temel parametrelerinden biridir. Piezoelektrik etki aslında bir kapasitörün titreşimi olarak tanımlanabilir. Şekil 5.3, [0.1x10^{-5} aralığında; 4x10^{-5}F], toplanan voltaj ve güç kapasitans ile ters orantılı olarak azalır.



Şekil 5.3: Piezoelektrik yığın kapasitansının toplanan voltaj ve güç üzerindeki etkileri.

Ayrıca, toplanan voltajın, yığının katmanlarının sayısı ile doğrusal olarak arttığına dikkat edilmelidir). Cao ve Li tarafından araştırma çalışmalarında [26] belirtildiği gibi, piezoelektrik yığının yer değiştirmesi şu şekilde ifade edilebilir:

$$y_{stack} = Ny_p = \frac{1}{k_p}F_p + Nd_{33}V \tag{5.1}$$

Bu ilişki, yığın sayısındaki artışın toplam yer değiştirmenin büyümesine yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, toplanan yükler, piezoelektrik yığının tüm bireysel katmanlarından toplanan yüklerin toplamına eşittir.

$$Q_{stack} = NQ_p = nd_{33}f + CpV \quad (5.2)$$

Burada:

N, yığının katman sayısıdır,

y_p, tek bir piezoelektrik katmanın göreli yer değiştirmesidir,

Q_p, tek bir piezoelektrik yığın katmanının [Coulomb] yüküdür,

d_{33} piezoelektrik sabitidir [m/v],

n uzaysal frekanstır,

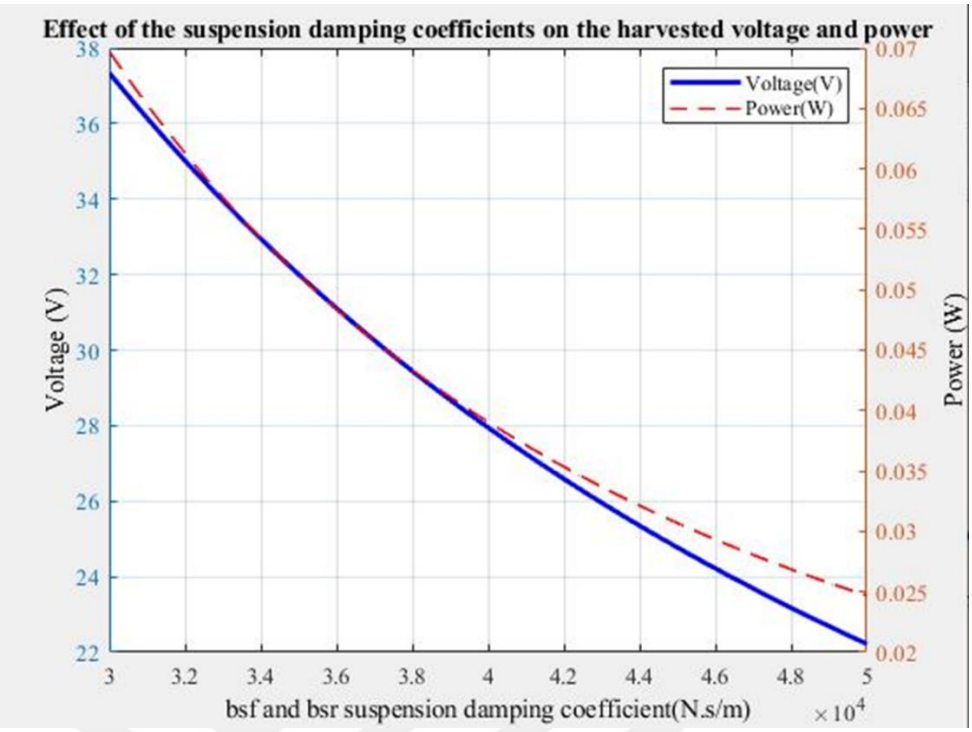
f zaman alanı frekansıdır,

Cp, piezoelektrik yığın kapasitansıdır.

5.3. KAMYON PARAMETRELERİNİN YAM'NİN TOPLANAN GERİLİM VE GÜÇ ÜZERİNE ETKİLERİ.

5.3.1. Süspansiyon Sönümleme Katsayıları Bsf Ve Bsr'nin Toplanan Gerilim Ve Güç Üzerindeki Etkisi.

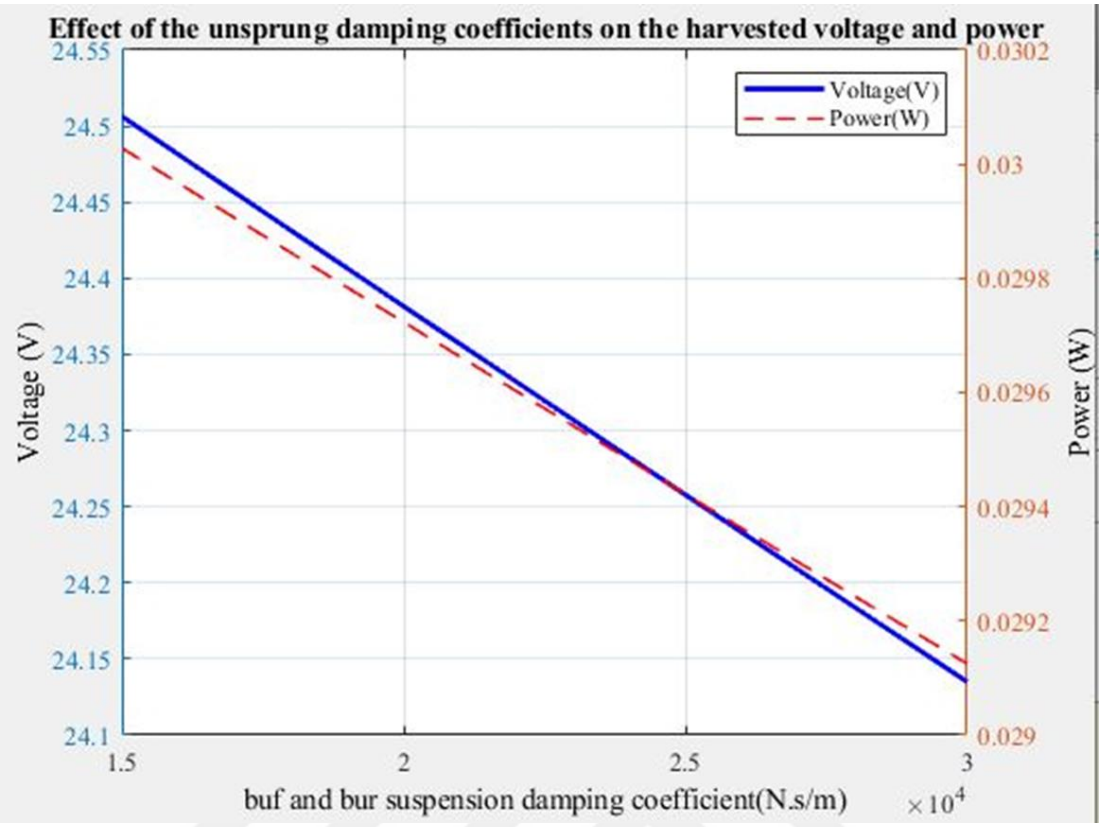
Bu simülasyonda, yarım kamyon modelinin her iki süspansiyonu (ön ve arka) 3.10^4 ile 5.10^4 N.s/m arasında değişiyordu. Diğer araba ve yol parametreleri sabit tutulmuştur. Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, toplanan voltaj 37.5V'den 22V'a düştü. Toplanan güç 0,07W'dan 0,02W'a düştü. Bu şekil, piezoelektrik yığınlar daha az strese maruz kaldıkça, toplanan güç ve voltajın süspansiyon sönümleme katsayıları ile ters orantılı olarak azaldığını göstermiştir. Süspansiyonun sönümlenmesi ne kadar düşük olursa, piezoelektrik yığına o kadar fazla stres uygulanır ve o kadar fazla güç toplanır. Ancak, düşük sönümleme katsayılarına sahip süspansiyonların stabilite ve manevra kabiliyeti sorunlarına yol açtığı unutulmamalıdır.



Şekil 5.4: Süspansiyon sönümleme katsayılarının etkisi.

5.3.2. Yaysız Sönümleme Katsayılarının buf ve bur'un Toplanan Gerilim ve Güç üzerindeki Etkisi.

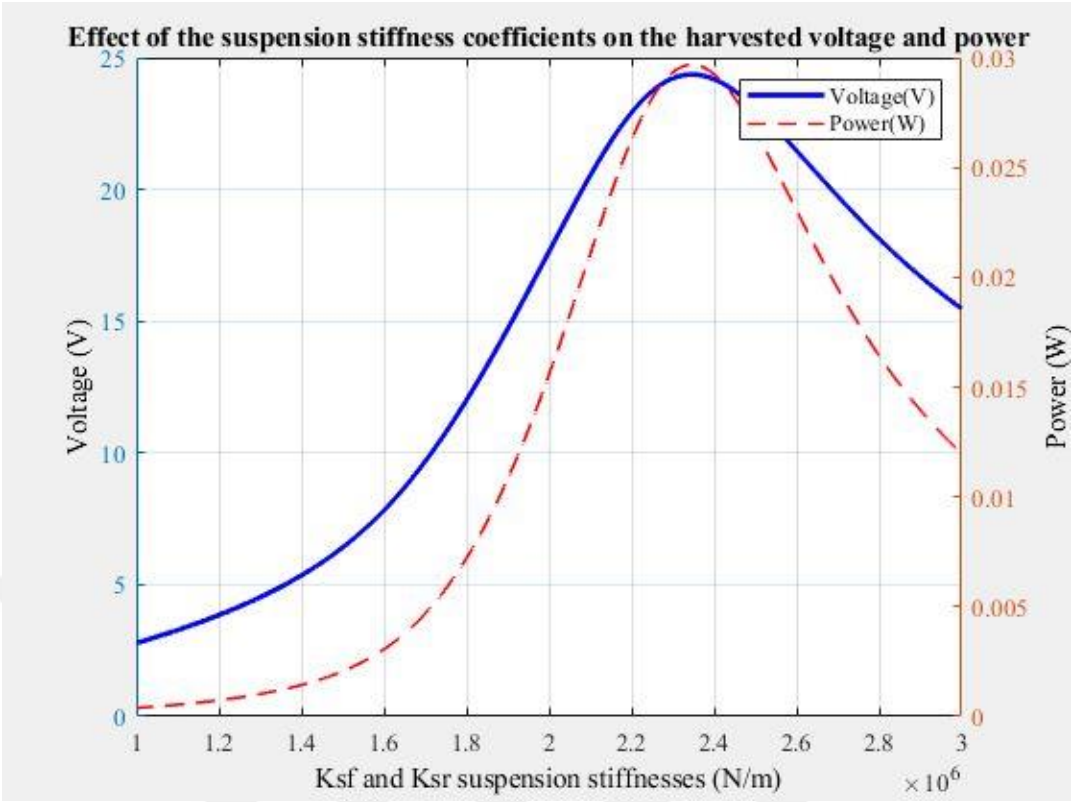
Bu simülasyon sırasında, yaysız (lastik) sönümleme katsayıları $1.5.10^4$ ile 3.10^4 Ns/m arasında değişmiştir. Kamyonun diğer parametreleri sabit tutulmuştur. Şekil 5.5'te gösterildiği gibi, voltaj 24,51'den 24,13 V'a düşerken, güç 0,03'ten 0,0291 W'a düştü. Sonuç olarak, toplanan voltaj ve güç, yaysız (lastik) sönümleme katsayıları ile ters orantılı olarak azalır.



Şekil 5.5: Yaysız sönümleme katsayılarının etkileri.

5.3.3. Süspansiyon Rijitlik Katsayıları Ksf Ve Ksr'nin Toplanan Gerilim Ve Güç Üzerindeki Etkisi.

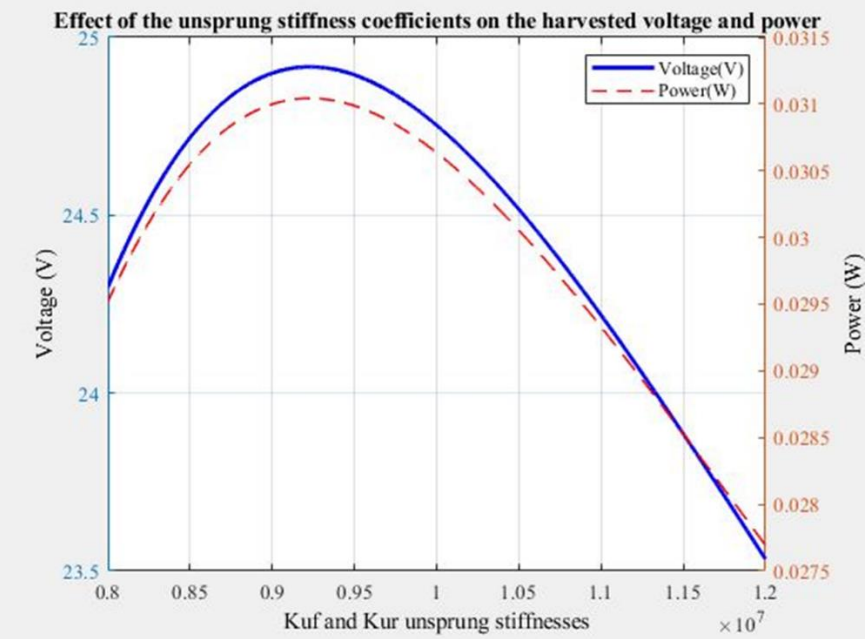
Bu simülasyon sırasında, süspansiyonların (ön ve arka) rijitlik katsayısı 1.10^6 ile 3.10^6 N/m arasında değişmiştir. Kamyonun diğer parametreleri sabit tutulmuştur. Şekil 5.6'da gösterildiği gibi, maksimum voltaj ve güç $2.75.10^6$ N/m'de toplanmaktadır. 1.10^6'dan $2.75.10^6$ N/m'ye, voltaj 3'ten 24 V'a ve güç 0,001'den 0,029 W'a yükselir. $2.75.10^6$'dan 3.10^6 N/m'ye, voltaj 24V'dan 16V'a düşer ve güç 0.029'dan 0.012W'a düşer. Bu çalışmadaki optimum süspansiyon rijitliği, maksimum güç hasadı için $2.75.10^6$ N/m'dir.



Şekil 5.6: Süspansiyon rijitlik katsayılarının toplanan güç ve gerilim üzerindeki etkileri.

5.3.4. Yaysız (Lastik) Rijitlik Katsayıları Kuf Ve Kur'un Toplanan Gerilim Ve Güç Üzerindeki Etkisi.

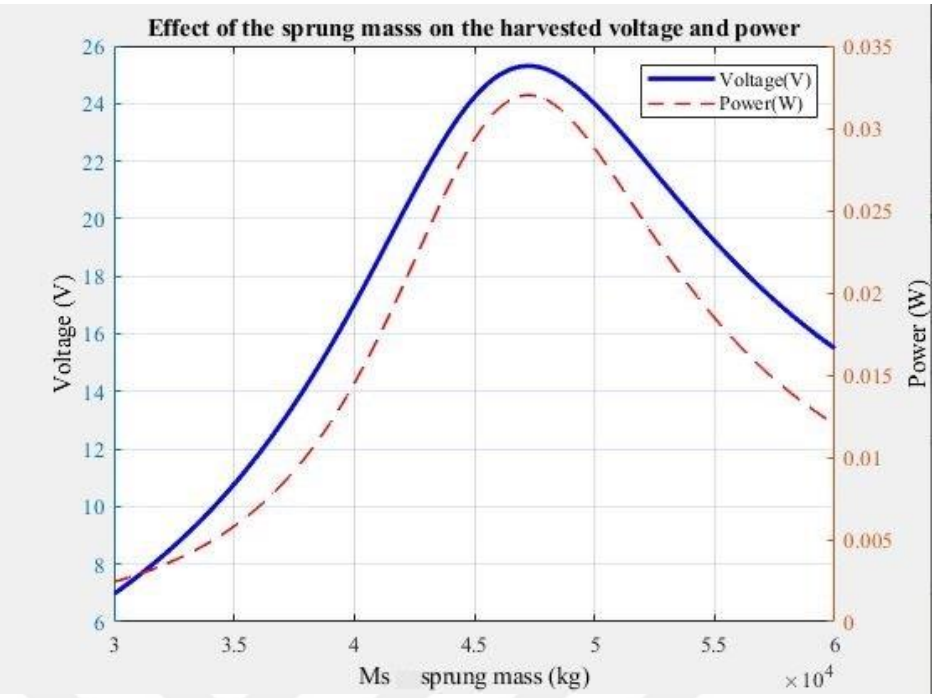
Bu simülasyon, $0.8.10^7$ ila $1.2.10^7$ N/m arasında değişen yaysız rijitlik katsayıları ile gerçekleştirilmiştir. Kamyon ve yolun diğer parametreleri sabit tutulmuştur. Toplanan voltaj ve gücün tepe değerlerine $0.93 .10^7$ N/m'de ulaşıldı. $0.8.10^7$'den $0.93 .10^7$ N/m'ye, voltaj 24.3V'den 24.75V'a yükseldi. Toplanan güç 0,0295'ten 0,031 W'a yükseldi. Toplanan voltaj $0,93 ,10^7$ ve $1,2 ,10^7$ N/m arasında 24,75V'den 23,5V'a düştü. Toplanan güç 0,031'den 0,0275W'a düştü. Buna ek olarak, yüksek bir lastik rijitliği, düşük rezonans gücünün bir göstergesidir.



Şekil 5.7: Yaysız rijitlik katsayılarının toplanan güç ve voltaj üzerindeki etkileri.

5.3.5. Yaylı Kütle Ms'nin Toplanan Gerilim Ve Güç Üzerindeki Etkisi.

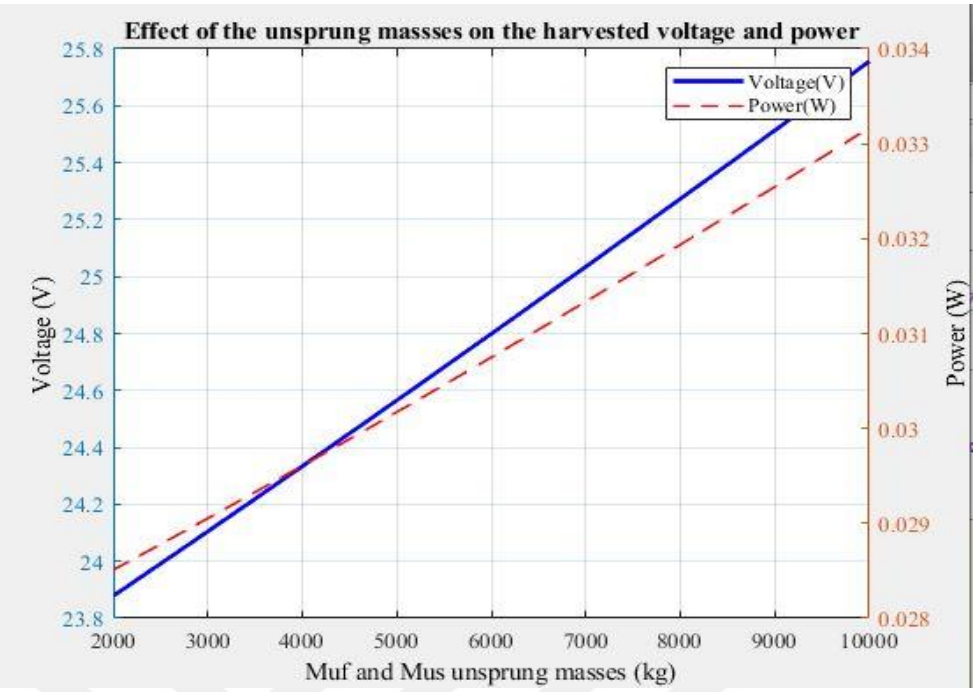
Bu simülasyon, 3.10^4 ila 6.10^4 kg arasında değişen yaylı kütle ile gerçekleştirilmiştir. Kamyon ve yolun diğer parametreleri sabit tutulmuştur. Toplanan voltaj ve gücün tepe değerlerine Ms = 4.75'te ulaşıldı. 10^4 kg. 3.10^4'ten $4.75 .10^4$ kg'a, voltaj 7V'den 25V'a yükseldi. Toplanan güç 0.004'ten 0.032 W'a yükseldi. Toplanan voltaj $4.75.10^4$ ve 6.10^4 kg arasında 25V'dan 15V'a düştü. Toplanan güç 0,032'den 0,013W'a düştü.



Şekil 5.8: Yaysız kütlenin toplanan güç ve voltaj üzerindeki etkileri.

5.3.6. Yaysız Muf ve Mus Kütlelerinin Toplanan Gerilim ve Güç Üzerine Etkisi.

Bu simülasyon, 2000 ila 10000 kg arasında değişen ön ve arka yaysız kütlelerle gerçekleştirilmiştir. Kamyon ve yolun diğer parametreleri sabit tutulmuştur. Şekil 5.9'da gösterildiği gibi, toplanan voltaj ve güç, [2000; 10000]. Toplanan voltaj 23.9V'den 25.7V'a yükselirken, toplanan güç 0.028'den 0.033W'a yükseldi.



Şekil 5.9: Yaylı kütlenin toplanan güç ve voltaj üzerindeki etkileri.

Önceki tüm sonuçlar, damperli kamyon süspansiyonlu piezoelektrik enerji hasadında büyük bir potansiyel olduğunu kanıtlıyor. Yoldaki pürüzlülük, süspansiyon sisteminin titreşimlerine yol açan lastiklerde uyarılmalar yaratır. Arabanın ürettiği enerjinin önemli bir kısmı bu şekilde kaybedilir. Araba süspansiyonlu piezoelektrik enerji toplama, bu enerjiyi temizlemek ve pillerde depolamak veya bunları kamyonda bulunan çoklu sensörlere güç sağlamak için kullanmak için temiz ve verimli bir alternatiftir. Yol, piezoelektrik yığın ve araba parametrelerinin toplama sisteminin performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. SONUÇ

Off-road damperli kamyon süspansiyon sistemi piezoelektrik enerji toplama potansiyelinin potansiyelini değerlendirmek için, CAT 777G damperli kamyon için çeyrek ve yarım araba modeli matematiksel olarak geliştirildi. Piezoelektrik yığınlar, süspansiyonlarla seri olarak yerleştirildi. Hareket denklemleri farklı modellerden türetilmiştir. Laplace dönüşümleri ve transfer fonksiyonları kullanılarak bu modellerin davranışları hem zaman hem de frekans domeninde incelenmiştir. Harmonik uyarma simülasyonu, maksimum voltaj ve gücün yaylı (araba gövdesi) rezonans frekansında toplandığını ortaya çıkardı.

Çeyrek araba modelinde, ÇAM yaylı rezonans frekansında (1.454) 0,05 m genlik harmonik uyarımı, sırasıyla 20,63 V ve 0,02129 W voltaj ve güç tepe değerlerinin toplanmasına izin verdi. Gerilim ve gücün ortalama karekök değerleri 14.59V ve 0.0007294W olarak bulundu. ÇAM sonuçlarına daha fazla doğruluk getiren yarım araba modelinde, genliği 0.05m olan harmonik uyarım uygulaması ve yaylı rezonans frekansında üretilen voltaj ve güç tepe değerleri sırasıyla 24.83V ve 0.03082W. Toplanan voltajın ortalama karekökü 17.56V olarak bulundu. Gücün hesaplanan ortalama karekök değeri 0,0008779W idi. YAM'nin toplanan güç ve voltajlarında ÇAM'ninkilere kıyasla yaklaşık %20.36'lık bir artış kaydedildi. Her iki model arasındaki temel farklar, YAM'de yunuslama hareketinin ve ikinci bir budanmamış (lastik) kütlenin varlığıdır. Bu özellikler, dolu bir arabanın gerçek değerlerine daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlar. Enerji toplama sisteminin davranışları frekans alanında da gözlemlendi.

Doğrusal olmayan çeyrek araba modeli, doğrusal olandan daha düşük araba gövdesi yer değiştirmesi göstererek daha düşük elektrik çıktı performansına neden oldu. Bununla birlikte, stabilite, araç kullanımı ve yolcu konforu açısından, doğrusal olmayan süspansiyon yayı, doğrusal olandan daha fazla avantaj sunar.

Laplace dönüşümü kullanılarak, zaman alanı değişkeni t, s alanı (veya frekans alanı analizi) olan s ile değiştirildi. Frekans alanı analizi, sistemlerin rezonans frekanslarının tanımlanması

arasında çeşitli avantajlar sundu. Bir DoF sistemi olan ÇAM, iki rezonans frekansı sergilerken, 4 DoF sistemi olan YAM, 4 rezonans frekansına sahipti. Buna ek olarak, frekans alanı analizi ayrıca, toplanan voltaj ve gücün araba hızına göre davranışını gözlemlemeye de izin verdi. Gerçekten de, araba hızı, uyarma frekansı ile orantılıdır. Orantılılık katsayısı, bu durumda 5m olduğu varsayılan yol dalga boyu λ'dır. Frekans analizi, enerji toplama sisteminin rezonans olmayan frekanslarda bile önemli miktarda güç üretebileceğini ortaya koydu. Her iki modele de bazı rastgele uyarılar uygulandı.

Rastgele uyarma simülasyonlarını gerçekleştirmek için yol pürüzlülük seviyeleri için ISO 8608 normu [162] referans değeri kullanılmıştır. Mekânsal referans frekansına (bu çalışmada 0.1m-1 olduğu varsayılmıştır) ve yol sınıfına (Tablo 4.12'de gösterildiği gibi sırasıyla A'dan H'ye çok düzgün ve aşırı pürüzlü) göre yol pürüzlülük katsayıları sağlar. Simülasyonlar dört yol sınıfı (A, D, G ve H) için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, A sınıfı yol olan en iyi yol kalitesinin hem ÇAM hem de YAM için en az miktarda voltaj ve güç ürettiğini ortaya koydu. Gerçekten de A sınıfı yol, ÇAM için 1.949V ve 0.00019W ve YAM için 2.239V ve 0.0002506W tepe değerleri üretti. D sınıfı yol, ÇAM için 15.6 ve 0.01217W ve 17.93V ve 0.01607W tepe değerleri üretti. G sınıfı yol profili, ÇAM için 125V ve 0.7815W ve YAM için 143.3V ve 1.027W tepe değerleri üretti. Sonuçlar, H sınıfı yol profili olan aşırı engebeli yol profilinin maksimum voltaj ve gücü ürettiğini ortaya koydu. Gerçekten de H sınıfı yol profili, ÇAM için 250V ve 3.126W ve YAM için 286.6V ve 4.108W üretti. Gerilim ve gücün YAM değerlerinde ÇAM'ninkilerle karşılaştırıldığında sırasıyla %14 ve %32'lik bir artış kaydedildi.

Ayrıca yol, araba ve piezoelektrik yığın parametrelerinin toplanan gerilim üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sinüs dalgası hızlanma genliği, toplanan enerji miktarını büyük ölçüde etkiler. Bunun için 0 ile 0,1 m arasındaki ivme genliği için performanslar hesaplanmıştır. Sonuçlar, toplanan voltajın ve gücün genlik ile arttığını ortaya koydu. Güç artışının ikinci dereceden bir doğası vardı.

Buna ek olarak kuvvet faktörü ve kapasitans gibi piezoelektrik parametrelerin etkileri de incelenmiştir. Araştırmanın sonuçları, toplanan voltajın kuvvet faktörü ile ters orantılı olarak [0.2 $.10^4$; 6.10^4 N/v]. Toplanan güç ve voltaj, [0.1 aralığında piezoelektrik kapasitans ile ters orantılı olarak arttı. 10^{-5}; $4 .10^{-5}$F]. Ayrıca, yığının katman sayısı ile toplanan voltajın lineer olarak arttığı fark edildi.

Simülasyonlar, toplanan voltaj ve gücün, süspansiyon sönümleme katsayıları (bsf ve bsr) ve yaysız (lastik) lastik sönümleme katsayıları ile ters orantılı olarak azaldığını ortaya koymuştur. Yaylı ve yaysız sönüm oranlarının artması, piezoelektrik yığındaki titreşimin azalması nedeniyle daha düşük toplanmış güce yol açacaktır. Düşük sönümleme katsayıları, yüksek toplanan güç ve gerilime ulaşmayı sağlasa da, aracın yol tutuşunu ve manevra kabiliyetini olumsuz etkiler.

Ayrıca [1.10^6; $2.75.10^6$ N/m] ve [$2.75.10^6$; 3.10^6 N/m]. Yaysız (lastik) rijitlik katsayılarının (Kuf ve Kur) etkileri üzerine yapılan çalışma, toplanan güç ve voltajın [$0.8.10^7$; $0.93 .10^7$ N/m] ve [$0.93 .10^7$; $1.2 .10^7$ N/m]. Lastik ne kadar rijit olursa, toplanan maksimum rezonans gücünün o kadar düşük olduğuna dikkat edilmelidir.

Yaylı ve yaysız kütlelerin enerji toplama sistemi performansları üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Grafikler, [3.10^4; $4.75 .10^4$ kg] [$4.75.10^4$; 6.10^4 kg]. Toplanan güç ve voltaj, yaysız (lastik) kütlelerle [2000; 10000].

6.2. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Toplanan gücün miktarını arttırmak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Yüksek piezoelektrik sabitleri ve kuvvet faktörleri ile piezoelektrik malzemelerin üretimi, elektrik enerjisine dönüştürülen titreşim miktarını artırmaya yardımcı olabilir. Ticari piezoelektrik malzemelerin bir başka dezavantajı, zaman içinde erken bozulmalarıdır. Gerçekten de bir demiryolu şirketi tarafından yürütülen bir çalışmada [166], bir istasyonun tabanının altına piezoelektrik bacaların yerleştirilmesinden birkaç hafta sonra, toplanan gücün azalmaya başladığı ortaya çıktı. İyileştirmenin bir diğer önemli yönü, piezoelektrik yığınların şekli ve geometrisidir. Piezoelektrik malzemenin düzlemsel yüzeyine dik bir kuvvetin uygulanmasını kolaylaştıran bir geometri, toplanan gücü olumlu yönde etkileyecektir.

Yarı ve tam araba modelin doğrusal olmayan analizinin yapılması gerekli olacaktır. Tüm gereksinimlerin dengeli bir şekilde karşılanabilmesi için araç sürüş konforu, iyi yol tutuş ve elde edilen güç arasındaki denge noktasını bulmak da çok faydalı olacaktır. Çalışma, tam bir araba modeli için çıkış voltajı ve gücünün analizine de genişletilebilir. Bu çalışmada, piezoelektrik yığın, süspansiyon sistemi ile seri olarak bağlanmıştır ve karbobi (yaylı kütle) ile süspansiyon arasına yerleştirilmiştir. Farklı lokasyonların enerji toplama sistemi üzerindeki etkilerini araştırmak için daha ileri çalışmalar yapılabilmektedir. Bu çalışma teorikti,

madenlerde toplanan enerjinin gerçek yaşam koşullarında değerlendirilmesi için gerçek bir kamyonda uygulanması çok faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

[1]. Erturk, A. and Inman, D. J., 2011, *Piezoelectric Energy Harvesting*, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-68254-8

[2]. Jacobson, M.Z., Delucchi, M.A., Bauer, Z.A., Goodman, S.C., Chapman, W.E., Cameron, M.A., Bozonnat, C., Chobadi, L., Clonts, H.A., Enevoldsen, P. et al., 2017, 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the World, *Joule*, 1, 108–121.

[3]. Williams, C.B. and Yates, R.B., 1996, Analysis of a micro-electric generator for microsystems, *Sensors and Actuators A*, 52, 8–11.

[4]. Voigt, W., 1910, *Lehrbuch der Kristallphysik*, Teubner, Leipzig.

[5]. Cao, S. and Li, J.A., Survey on ambient energy sources and harvesting methods for structural health monitoring applications, *Adv. Mech. Eng.*, 9, 1687814017696210.

[6]. Roundy, S., Wright, P.K. and Rabaey, J., 2003, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*, 26, 1131–1144.

[7]. Wang, H., Jasim, A. and Chen, X., 2018, Energy harvesting Technologies in roadway and bridge for different applications—a comprehensive review, *Applied Energy*, 212, 1083–1094.

[8]. Patel, P., 2011, Powering your car with waste heat. *MIT technology review*.

[9]. Pugi, L., Pagliai, M., Nocentini, A., Lutzemberger, G., and Pretto, A., 2017, Design of a hydraulic servo-actuation fed by a regenerative braking system, *Applied Energy*, 187, 96–115.

[10]. Noaman, M. and Remon, P., 2011, International Workshop SMART MATERIALS, *STRUCTURES & NDT in AEROSPACE Conference NDT in Canada 2-4 November 2011*, Montreal, Quebec, Canada.

[11]. American Physical Society., 2021, *Transportation and Energy Issues*, https://www.aps.org/policy/reports/energy/transportation.cfm, [Visited on 19/02/2021].

[12]. 2020, *Use of Energy Explained*, https://www.eia.gov/energyexplained/useofenergy/transportation.php, [Visited on 19/02/2021].

[13]. Abhijit, G., Jendrzejczyk, J., Mulcahy, M., 2006, Design of electromagnetic shock absorbers, International Journal of Mechanics and Materials in Design, 3, 285-291.

[14]. Velinsky, S.A., and White, R.A., 1980, "Vehicle energy dissipation due to road roughness," *Veh. Syst. Dyn*., 6, 359–384.

[15]. Jacota, V.G., 2017, "Evaluation of the Dissipated Energy by the Automobile Dampers," *Glob. J. Res. Eng.*, 1, 1-9.

[16] Doaa A., Tariq D. and Abdel-Hamid I.M., 2020, "A State-Of-The-Art Review of Car Suspension-Based Piezoelectric Energy Harvesting Systems", *energies*, 13, 1–39.

[17]. Wei C., and Taghavifar, H., 2017, "A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system: Half-vehicle model," Energy, 134, 279–288.

[18] Abdelkareem, M.A., Xu L., Ali, M.K.A., Hassan, M.A., Elagouz, A. and Zou, J., 2018, On-field measurements of the dissipated vibrational power of an SUV car traditional viscous shock absorber, *ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.

[19] Yildiz, F., 2009, "Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques.," *J. Technol. Stud*., 35(1), 40–48.

[20] Knight, C., Davidson, J. and Behrens, S., 2008, "Energy options for wireless sensor nodes," *Sensors*, 8(12), 8037–8066,

[21] Chalasani, S. and Conrad J. M., 2008, *A survey of energy harvesting sources for embedded systems*, IEEE SoutheastCon 2008, 442–447.

[22] Twiefel, J. and Westermann, H., 2013, Survey on broadband techniques for vibration energy harvesting, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 24(11), 1291–1302.

[23] Devi, P.K., 2014, "Survey on Energy Harvesting Techniques," *Int. J. Sci. Eng. Comput. Technol.*, 4(10), 256–259.

[24] Roundy, S., Wright, P. K. and Rabaey, J., 2003, A study of low-level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Comput. Commun.*, 26(11), 1131–1144.

[25] Radousky, H.B. and Liang, H., 2012, Energy harvesting: an integrated view of materials, devices and applications," *Nanotechnology*, 23(50), 1-66.

[26] Cao S. and Li, J., 2017, A survey on ambient energy sources and harvesting methods for structural health monitoring applications, *Adv. Mech. Eng.*, 9 (4), 1-14.

[27] El-Sayed, A.R., Tai, K., Biglarbegian, M. and Mahmud, S., 2016, A survey on recent energy harvesting mechanisms, *IEEE Canadian Conference 2016 on Electrical and Computer Engineering*, 1–5.

[28] Xie, X. D. and Wang, Q., 2015, "Energy harvesting from a vehicle suspension system," *Energy*, 86, 385–392.

[29] Priya, S. and Inman, D. J., 2009, *Energy harvesting technologies*, Springer, vol. 2.

[30] Despesse, G., Jager, T., Chaillout, J. and Leger, J., 2005, Fabrication and characterization of high damping electrostatic micro devices for vibration energy scavenging, *Proceedings of Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS*, 386-390.

[31] Saha, C.R., O'Donnell, T., Loder, H., Beeby, S. and Tudor, J., 2006, "Optimization of an electromagnetic energy harvesting device," *IEEE Trans. Magn.*, 42(10), 3509–3511.

[32] Jeon,S Y. B., Sood, R., Jeong, J.-H. and Kim, S.-G., 2005, "MEMS power generator with transverse mode thin film PZT," *Sens. Actuators Phys.*,122(1), 16–22.

[33] Stevens, J., 1999, Optimized thermal design of small thermoelectric generators, *Proceedings of 34th Intersociety Energy Conversion Eng. Conference. Society of Automotive Engineers*, 1999-01-2564.

[34] Yeatman, E.M., 2004, Advances in power sources for wireless sensor nodes, *Proceedings of International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, Imperial College, 20–21.

[35] Rabaey, J. M., Ammer, M. J., Da Silva Jr, J. L., Patel, D., and Roundy, S., 2000, Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking, *IEEE Computer*, 42–48.

[36] Gonsalez, C.G., Franco, V.R., Brennan, M.J., Da Silva S. and Junior, V.L., 2010, Energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic transducers, *9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications, Serra Negra, Brazil*, 1166–1171.

[37] Cary, B., Daniel, J. A., Deepam, M., Shashank, P., and Walter V., 2014, *Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Vibrational Energy Harvesting*, Polymer Composites for Energy Harvesting, American Chemical Society, Washington, DC, 1-27.

[38] Aljadiri, R.T., Taha, L.Y., and Ivey, P., 2017, Wind energy harvesting systems: A better understanding of their sustainability, *3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 582–587.

[39] Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., Barreiro, P. and Robla, I., 2009, A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends, sensors, 9(6), 4728–4750.

[40] Ipema, A.H., Goense, D., Hogewerf, P.H., Houwers, H.W.J. and Van-Roest, H., 2008, Pilot study to monitor body temperature of dairy cows with a rumen bolus, *Comput. Electron. Agric*., 64, 49-52.

[41] Nadimi, E.S., Sogaard, H.T., Bak, T., Oudshoorn F.W., 2008, ZigBee-based wireless sensor networks for monitoring animal and pasture time in a strip of new grass, *Comput. Electron. Agric*., 61, 79-87.

[42] Chen, J., Cao, X., Cheng, P., Xiao, Y. and Sun, Y., 2010, Distributed collaborative control for industrial automation with wireless sensor and actuator networks, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57(12), 4219–4230.

[43] Christin, D., Mogre, P.S. and Hollick, M., 2010, Survey on wireless sensor network technologies for industrial automation: The security and quality of service perspectives, *Future Internet*, 2(2), 96–125.

[44] Ko J., Lu C., Srivastava M.B., Stankovic J.A., Terzis A. and Welsh M., 2010, Wireless sensor networks for healthcare," *Proc. IEEE*, 98 (11), 1947–1960.

Park, G., Rosing, T., Todd, M.D., Farrar, C.R. and Hodgkiss, W., 2008, Energy harvesting for structural health monitoring sensor networks, *J. Infrastruct. Syst.*, 14(1), 64–79.

[45] García-Hernández, C.F., Ibarguengoytia-Gonzalez, P.H., García-Hernández, J. and Pérez-Díaz, J.A., 2007, "Wireless sensor networks and applications: a survey," IJCSNS Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur., 7(3), 264–273.

[46] Liao, W.H., Wang, D.H. and Huang, S.L., 2001, Wireless monitoring of cable tension of cable-stayed bridges using PVDF piezoelectric films, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 12(5), 331–339.

[47] Chalard, L., Helal, D., Verbaere, L. and Wellig, A., 2007, Wireless sensor networks devices: Overview, issues, state-of the art and promising technologies, *ST Journal of Research*, 4(1), 4–8.

[48] New Atlas, 2010, *Piezoelectric generator creates power from shoes*, https://newatlas.com/piezoelectric-generator-shoes/14945/ [Visited on 08/04/21]

[49] Niagara, 2015, *Water flow within beverage preparation process*, https://www.lesswaterbevtech.com/it/news/water-flow-within-beverage-preparation-process [Visited on 08/04/21]

[50] Photodoto, *3 basic steps for photographing motion, moving objects and the art of panning*, https://photodoto.com/photographing-motion-moving-objects-and-the-art-of-panning/ [Visited on 08/04/21]

[51] World economic forum, 2021, *Scaling Climate Partnerships for Industry Transition*, https://www.weforum.org/events/scaling-climate-partnerships-for-industry-transition-2021 [Visited on 08/04/21]

[52] Care city, *Londoners advised to know their pulse during Heart Rhythm Week,* https://www.carecity.london/articles/123-londoners-advised-to-know-their-pulse-during-heart-rhythm-week [Visited on 08/04/21]

[53] https://thenounproject.com/term/smart-home/ [Visited on 08/04/21]

[54] *Sensor, https://icons8.com/icons/set/sensor* [Visited on 08/04/21]

[55] Peri, *Civil Engineering Solutions*, https://www.peri.com/en/business-segments/civil-engineering.html [Visited on 08/04/21].

[56] KPshopy, 2020, *Ecommerce in Agriculture*, https://kpshopy.com/blog/what-is-eagriculture [Visited on 08/04/21].

[57] The news Wheel, 2020, *TPMS Explained: How Does the Tire Pressure Monitoring System Work*, https://thenewswheel.com/tpms-explained-how-does-the-tire-pressure-monitoring-system-work/ [Visited on 08/04/21].

[58] Carazo A.V., 2000, *Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements*, PhD Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya.

[59] Engineering and Technology, 2019, The seven ages of materials, https://eandt.theiet.org/content/articles/2019/09/the-seven-ages-of-materials/ [Visited on 10/04/21].

[60] IEEE power system relay committee, 1990, Gapped core current transformer characteristics and performance, IEEE Trans., 5, 1732 – 1740.

[61] MORGAN, 1967, *Morgan technical ceramics*, http://www.morgantechnicalceramics.com, [Visited on 19/03/2021].

[62] Somayyeh H., 2017, *Energy Harvesting in Pneumatic Tires through Piezoelectric Material and its Life Cycle Environmental Impact*, Thesis (Master), Department of Building Civil and Environmental Engineering, Concordia University.

[63] Cady, W.G., 1946, *Piezoelectricity*, McGRaw-Hill, New York.

[64] Jaffe, B., Roth, B.S. and Marzullo, S., 1954, Piezoelectric properties of lead zirconate titanate solid solution ceramics, J. Appl. Phys., 25(6), 809-810.

[65] Boston Piezo-Optics, Intro to piezoelectric transducer crystals, https://www.bostonpiezooptics.com [Visited on 10/04/21].

[66] Meeker, T.R., 1996, Publication and proposed revision of ANSI/IEEE standard 176-1987, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 43(5), 717–772, 1996.

[67] Basics of piezoelectricity, https://www.sdtools.com/help/pz_basics.html [Visited on 11/04/21].

[68] Lead zirconate titanate, http://www.keramverband.de/brevier_engl/3/4/2/3_4_2_8.html [Visited on 11/04/21].

[69] Gao, Z., Lu, C. and He H., 2016, Super stable ferroelectrics with high curie point, *Sci. Rep.*, 6, 1-6.

[70] Wenk, H.-R., Bulakh, A., 2004, *Minerals: their constitution and origin*, Cambridge University Press, New York, ISBN 978-0-521-52958-7.

[71] Priya, S.J., Zhou, Y., Song H.C., Varghese, R., Chopra, A., Kim, S.G., Kanno, I., Wu L., Ha, D.S., Ryu, J. and Polcawich, R.G., 2017, A review on piezoelectric energy harvesting: Materials, Methods and circuits, Energy harvesting systems, 4 (1), 1-32.

[72] Boyanov, B., 2006, Synthesis and determination of curie temperature of ferrites from the system BaO-CoO-ZrO2-Fe2O3, *Journal of the University of Chemical Technology and Mettalurgy*, 41(1), 61-64.

[73] Chai, Y.L., Chang, Y.S., Teoh, L.J., Lin Y.J., Hsiao Y.J., 2008, Influence of ZrO2 addition on the structure, thermal stability and dielectric properties of ZnTiO3 ceramics, J. Mater. Sci, 43, 6771-6776.

[74] Maznichenko, I.V., Ostanin, S., Ernst, A. and Mertig, I., 2009, First principles study of manganese-stabilized hafnia, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 321, 913-916.

[75] Valasek, J., 1921, Piezoelectric and allied phenomena in Rochelle salt, *Phys. Rev.*, 17 (4), 475-481.

[76] Ferroelectric Dielectric Hysteresis and Hysteresis Loop, https://www.globalsino.com/EM/Page/1804.html [Visited on 14/04/2021].

[77] The nature of hysteresis, strain upon poling, http://applied-piezo.com/the-nature-of-hysteresis/ [Visited on 15/04/2021].

[78] Saini, P.K., Biswas, A. and Bhanja, D., 2015, Performance Evaluation and Simulation of Solar Panel, Wind Mill, Fuel Cell Hybrid System for Small Scale Energy Harvesting, *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(6), 417–421.

[79] Yang, B., 2010, Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, 9(2), 023002.

[80] IEEE standard 176-1978, Standard on piezoelectricity.

[81] Baumgart, F., 2000, Stifness – an unknown world of mechanical science ?, Injury, 31, 14 – 84.

[82] De Jong, P., 2013, *Power harvesting using piezoelectric materials - applications in helicopter rotors*, PhD thesis, University of Twente.

[83] Shu, Y.C., and Lien, I.C., 2006, Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system, *Journal of micromechanics and microengineering*, 16, 2429–2438.

[84] Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C. and Guyomar, D., 2005, Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous charge extraction, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16, 865–876.

[85] Polla, D.L and Francis, F.L.,1998, Processing and characterization of piezoelectric materials and integration into microelectromechanical systems, *Annual Review of Materials Science*, 28, 563-597.

[86] Ferroelectric and antiferroelectric materials, https://www.globalsino.com/EM/Page/2383.html [Visited on 27/05/2021].

[87] Sencadas, V., Costa, C.M.and Senentxu, L.M., 2005, Poling of β-poly (vinylidene fluoride): dielectric and IR spectroscopy studies, *E-polymers*, 5(1), 1-12.

[88] Nalwa, H.S. and Miyata, S., 1996, Non-linear optics of organic molecules and polymers, CRC Press, 246 , ISBN 978-0-8493-8923-8.

[89] Kaura, T., Nath, R., Perlman R.R., 1991, Simultaneous stretching and corona poling of PVDF films, J. Phy. D: Appl. Phys. 24(10), 1848.

[90] Marshall, J.M., Zhang, Q., and Whatmore R.W., 2008, Corona poling of highly (001) / (100) – oriented lead zirconate titanate thin films, Thin solid films, 516(15), 4679-4684.

[91] Lee, C. and Tarbutton J.A., 2019, Polyvinylidene fluoride direct printing for sensors and actuators, *The International Journal of advanced manufacturing Technology*, 104 (2015), 3155-3163.

[92] Rose, C.A., Fish, K.A. and Rothenbert, C.A., 1954, Electromechanical transducer, U.S. application, serial number 401, 812.

[93] Carazo A.V., 2011, 50 years of Piezoelectric Transformers. Trends I the technology, MRSOnline Proceeding Library, 1-12.

[94] Philips Components, 1996, Piezoelectric transformers, *Application Note.*

[95] Uchino, K., 1997, Piezoelectric actuators and ultrasonic motors, *Kluwer Academic Publisher*, Massachusets, USA.

[96] Goldfarb, M. and Jones, L.D., 1999, On the efficiency of electric power generation with piezoelectric ceramic. *Transaction of the ASME*, 121, 566–571.

[97] Taylor, G.W., Burns, J.R., Kammann, S.M., Powers, W.B. and T.R. Welsh, 2001, The energy harvesting eel: A small subsurface ocean/river power generator, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*.

[98] Jansma. S., 2010, *The feasibility and design of piezoelectric energy harvester for civil applications*, Master thesis, University of Twente.

[99] Roundy. S., 2005, On the effectiveness of vibration-based energy harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16, 809–823.

[100] Kirchhhoff, S., 1845, Ueber den durchgang eins elektrischen stromes durch eine ebene, insbesondere durch eine kreisförmige. *Annalen der Physik*, 140, 497–514.

[101] Horowitz, P. and Hill, W., 1989, The Art of Electronics. *Cambridge University Press*, 2nd edition.

[102] Shu, Y.C. and Lien, I.C., 2006, Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems, *Smart Materials and Structures*, 15, 1499–1512.

[103] Shu, Y.C., Lien, I.C. and Wu, W.J., 2007, An improved analysis of the SSHI interface in piezoelectric energy harvesting, *Smart Materials and Structures*, 16, 2253–2264.

[104] Arroyo, E. and Badel, A., 2011, Electromagnetic vibration energy harvesting device optimization by synchronous energy extraction, Sensors and Actuators A Physical, 171 (2), 1-23.

[105] Bauer, W., 2010, *Hydro-pneumatic suspension systems*, Suspension systems basics, Springer, ISBN: 978-3-642-15146-0, 1-17.

[106] Florin, A., Ioan-Cozmin, MR. and Liliana, P., 2013, Passive suspension modeling using MATLAB, quarter-car model, input signal step type, *New Technol. Prod. Mach. Manuf. Technol*., 258–263.

[107] Sharma, P., Saluja, N., Saini, D. and Saini, P., 2013, Analysis of automotive passive suspension system with Matlab program generation, Int. J. Adv. Technol., 4(2), 115-119.

[108] Vaishnav, A., Sarvaiya, M. and Dhabaliya, P., 2016, Mathematical Modelling and Comparison of Two Degree of Freedom Suspension System of Quarter Car, *Imp. J. Interdiscip. Res.*, 2(11), 128-137.

[109] Jamali, M.S., Ismail, K.A., Taha, Z. and Aiman, M.F., 2017, Development of Matlab Simulink model for dynamics analysis of passive suspension system for lightweight vehicle, *Journal of Physics: Conference Series*, 908, 1-8.

[110] Hassaan, G.A., 2014, Car dynamics using quarter model and passive suspension, part i: Effect of suspension damping and car speed, *Int. J. Comput. Tech.*, 1(2), 1–9.

[111] Gao, W., Zhang, N. and Dai, J., 2008, A stochastic quarter-car model for dynamic analysis of vehicles with uncertain parameters, *Veh. Syst. Dyn.*, 46(12), 1159–1169.

[112] Prabhakar, S. and Arunachalam, K., 2015, Simulation and analysis of passive suspension system for different road profiles with variable damping and stiffness parameters, *J. Chem. Pharm. Sci.*, 974, 32-36.

[113] Salah, M., 2017, A Laboratory Automotive Suspension Test Rig: Design, Implementation and Integration., *Jordan J. Mech. Ind. Eng*., 11(2), 67-71.

[114] Jugulkar, L.M., Singh, S. and Sawant, S.M., 2016, Analysis of suspension with variable stiffness and variable damping force for automotive applications, *Adv. Mech. Eng*., 8(5), 1-19.

[115] Patel, C.B., Gohil, P.P. and Borhade, B., 2010, Modelling and vibration analysis of a road profile measuring system, *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, 1(1), 13–28.

[116] Gao, W., Zhang, N. and Du, H.P., 2007, A half-car model for dynamic analysis of vehicles with random parameters, *5th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM 2007)*, 1, 595–600.

[117] Faheem, A., Alam, F. and Thomas, V., 2006, The suspension dynamic analysis for a quarter car model and half car model, *3rd BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering*, 20–22.

[118] Mehmood, A., Khan, A.A. and Khan, A.A., 2014, Vibration analysis of damping suspension using car models, *Int. J. Innov. Sci. Res.*, 9(2), 202–211.

[119] Chavan, S.P., Sawant, S.H. and Tamboli, J.A., 2013, Experimental Verification of Passive Quarter Car Vehicle Dynamic System Subjected to Harmonic Road Excitation with Nonlinear Parameters, *IOSR J. Mech. Civ. Eng. IOSR-JMCE*, 39–4.

[120] Sapiński, B. and Martynowicz, P., 2005, Vibration control in a pitch-plane suspension model with MR shock absorbers, *J. Theor. Appl. Mech.*, 43(3), 655–674.

[121] B. S. Institution, 1999, *Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*, British Standards Institution.

[122] Mahala, K.M., Gadkari, P. and Deb, A., 2009, *Mathematical models for designing vehicles for ride comfort*, ICORD 09: Proceedings of the 2nd International Conference on Research into Design, Bangalore, India 07.-09.01.

[123] Iyer, A.R., Venkatachalam, R. and Balaraju, A., 2014, Analysis of Optimum Suspension Parameters of a Semi-Independently Suspended Automobile, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, 3(5), 12047-12053.

[124] Mitra, A. Benerjee, N. Khalane, H.A., Sonawane, M.A., Joshi, D.R. and Bagul, G.R., 2013, Simulation and Analysis of Full Car Model for various Road profile on a analytically validated MATLAB/SIMULINK model, IOSR J Mech Civ Eng IOSR-JMCE, 22–33.

[125] Raju, A.B. and Venkatachalam, R., 2013, Analysis of Vibrations of Automobile Suspension System Using Full-car Model, Int. J. Sci. Eng. Res., 4(9), 2105–2111.

[126] Xiao, H., Wang, X. and John, S., 2015, A dimensionless analysis of a 2DOF piezoelectric vibration energy harvester, Mech. Syst. Signal Process., 58, 355–375.

[127] Zuo, L. and Zhang, P.S., 2013, "Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions, *J. Vib. Acoust.*, 135, no. 1, 295-302.

[128] Al-Yafeai, D., Darabseh, T. and Mourad, A.H. I., 2019, Quarter vs. Half Car Model Energy Harvesting Systems, *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), IEEE*, 1–5.

[129] Azizi, A. and Yazdi, P.G., 2019, White Noise: Applications and Mathematical Modeling, *in Computer-Based Analysis of the Stochastic Stability of Mechanical Structures Driven, Springer*, 25–36.

[130] Behera, M.M., 2015, Piezoelectric Energy Harvesting from Vehicle Wheels, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 4(5), 1-4.

[131] Lafarge, B., Grondel, S., Delebarre, C., and Cattan, E., 2018, A validated simulation of energy harvesting with piezoelectric cantilever beams on a vehicle suspension using Bond Graph approach, *Mechatronics*, 53, 202–214.

[132] Hu, Y., Xu, C., Zhang, Y., Lin, L., Snyder, R. L. and Wang, Z. L., 2011, A Nanogenerator for Energy Harvesting from a Rotating Tire and its Application as a Self-Powered Pressure/Speed Sensor, *Adv. Mater.*, 23(35), 4068–4071**.**

[133] Zhang, Y., Zheng, R., Shimono, K., Kaizuka, T. and Nakano, K., 2016, Effectiveness testing of a piezoelectric energy harvester for an automobile wheel using stochastic resonance, *Sensors*, 16(10), 1-16.

[134] Makki, N. and Pop-Iliev, R., 2011, Piezoelectric power generation in automotive tires, *Proc. Smart Mater. Struct.*

[135] Consortium, A., 2003, Intelligent tyre for accident-free traffic, *Tech. Res. Cent. Finl. VTT Tech Rep*, 1-64.

[136] Ali S. F. and Adhikari, S., 2013, Energy harvesting dynamic vibration absorbers, *J. Appl. Mech.*, 80(4), 1-9.

[137] Madhav C. and Ali, S. F., Harvesting energy from vibration absorber under random excitations, *IFAC-Pap.*, 49(1), 807–812.

[138] Lee, H., Jang, H., Park, J., Jeong, S., Park, T. and Choi, S., 2013, Design of a piezoelectric energy-harvesting shock absorber system for a vehicle, *Integr. Ferroelectr.*, 141(1), 32–44.

[139] Arizti, M., 2010, *Harvesting energy from vehicle suspension*, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, Tampere.

[140] Hendrowati, W., Guntur, H.L. and Sutantra, I.N., 2012, Design, modeling and analysis of implementing a multilayer piezoelectric vibration energy harvesting mechanism in the vehicle suspension, *Engineering*, 4(11), 728-738.

[141] Wingert, L., 2000, *Not to Air Is human*, Crane Communications.

[142] Normann, N., 2000, *Tyre Pressure Monitoring System for all Vehicle Categories*, Crane Communications Inc.: ATZ Worldwide.

[143] Sankaranarayanan, V. and Levent, G., 2008, Tire Pressure Monitoring [Applications of Control], *IEEE control systems*, 27(6), 22 – 25.

[144] Quan, X., Gong, J., Guan J., Bai R., You M., Zou P., 2019, Automobile tire pressure monitoring technology and development trend, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 1-7.

[145] Shraim, H., Rabhi, A., Ouladsine, M., M'Sirid, NK., and Fridman, L., 2006, Estimation and analysis of the tire pressure effects on the comportment of the vehicle center of gravity, *Proc. 9th Int. Workshop on Variable Structure Systems, Italy*, 268–273.

[146] Guan, M.J., and Liao, W.H., 2007, On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages, *Smart Mater. Struct.*, 16(2), 498–505.

[147] Sodano, H.A., Inman, D.J. and Park, G., 2005, Generation and storage of electricity from power harvesting devices, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 16(1), 67–75.

[148] Priya, S., 2007, Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers, *J. Electroceramics*, 19(1), 167–184.

[149] Sodano, H.A., Inman, D.J. and Park, G., 2005, Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 16(10), 799–807.

[150] Ottman, G., Bhatt, A., Hofmann, H. and Lesieutre, G., 2002, Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless, remote power supply, I*EEE Transactions on Power Electronics*, 17(5), 669-676.

[151] Ottman, G.K., Hofmann, H.F. and Lesieutre, G.A., 2003, Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(2), 696-703.

[152] Sodano, H.A., Magliula, E.A., Park, G. and Inman, D.J., 2002, Electric power generation from piezoelectric materials, *Proceedings of the 13th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, 7–9.

[153] Chen, H., Cong, T.N., Yang, W., Tan, C., Li, Y. and Ding, Y., 2009, Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Prog. Nat. Sci*., 19(3), 291–312.

[154] Zhao, Z., Wang, S. and You, C., 2010, Piezoelectric micro-power generation to charge supercapacitor with optimized duty cycle, *J. Intell. Mater. Syst. Struct*., 21(11), 1131–1140.

[155] Casciati, F., Faravelli, L. and Rossi, R., 2005, Architecture optimization for wireless sensor networks, *Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 5765, 253–258.

[156] Jiang, X., Polastre, J. and Culler, D., 2005, Perpetual environmentally powered sensor networks, *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Boise, ID, USA*, 463-468.

[157] Li, H., Tian, C. and Deng, Z.D., 2014, Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials, *Appl. Phys. Rev.*, 1(4), 1-20.

[158] Tolentino, I.M., and Talampas, M.R., 2012, Design, development, and evaluation of a self-powered GPS tracking system for vehicle security, *Sensors*, 1–4.

[159] Jiang, X., Li, Y., Li, J., Wang, J. and Yao, J., 2014, Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations, *J. Renew. Sustain. Energy*, 6(4), 1-16.

[160] Ramadass Y.K. and Chandrakasan, A.P., 2010, An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 45(1), 189–204.

[161] ISO 13473-1, 1997, Characterization of pavement texture by use of surface profiles–Part 1: Determination of mean profile depth, *Eur Stand ICS 1714030 Eur Comm Stand Bruss*, 1-47.

[162] ISO 8608, 1995, Mechanical vibration– road surface profiles – reporting of measured data". Geneva, Switzerland: ISO, 1-36.

[163] He, L., Qin, G., Zhang, Y. and Chen, L., 2008, Non-stationary random vibration analysis of vehicle with fractional damping, *in 2008 international conference on intelligent computation technology and automation (ICICTA)*, 2, 150–157.

[164] Chen, X. and Zhou, Y., 2018, Modelling and analysis of automobile vibration system based on fuzzy theory under different road excitation information, *Complexity*, 2018, 1-9.

[165] Hossain, M., Z. and Chowdhury, M., N., A., 2012, Ride Comfort of a 4 DOF NonLinear Heavy VehicleSuspension," *ISESCO J Sci Technol*, 8, 80–85.

[166] East Japan Railway Company, 2008, Demonstration experiment of the Power-Generating Floor at Tokyo station, *Report JR East*, Japan, 1-3.

EKLER

Ek 1. ÇAM damperli kamyon parametreleri için MATLAB kodu – Step & Harmonik girişleri.

```
%Quarter car Model
clear all;
Ms= 22500; %kg (Car body mass)
Mus= 3500; %kg (Tire mass)
Mp= 1300*10^-3; %kg (piezoelectric stack mass)
Ks= 2300000; %N/m (Suspension spring stiffness)
Kus= 11000000; %N/m (Tire stiffness)
Kp= 51*10^6; %N/m (Piezoelectric stack stiffness)
bs= 46000; %N.s/m (Suspension spring damping ratio)
bus= 26573; %N.s/m (Tire damping ratio)
alpha= 30000; %N/V (Piezoelectric stack Force factor, ori: 39.8516)
Cp= 4.5*10^-6; %F (Piezoelectric stack capacitance)
Rp= 20000; %Ohm (Piezoelectric stack resistance)
f= 1.47;%Hz (Frequency)
amp=0.05;%meter (Amplitude)
lambda=5;%meter (road wavelength)
```

Ek 2. YAM simülasyon parametreleri için MATLAB kodu – Adım ve Harmonik girişler

```
%Half Car Model parameters


clear all;
Ms= 45000; %kg (Car body mass)
Muf= 3500; %kg (Front tire mass)
Mur= 3500; %kg (Rear tire mass)
Mpf= 1300*10^-3; %kg (front piezoelectric stack mass)
Mpr= 1300*10^-3; %kg (rear piezoelectric stack mass)
Ksf= 2300000; %N/m (Front suspension spring stiffness)
Ksr= 2300000; %N/m (Rear suspension spring stiffness)
Kuf= 11000000; %N/m (Front tire stiffness)
Kur= 11000000; %N/m (Rear tire stiffness)
Kpf= 51*10^6; %N/m (Front piezoelectric stack stiffness)
Kpr= 51*10^6; %N/m (Rear piezoelectric stack stiffness)
bsf= 46000; %N.s/m (Front suspension spring damping ratio)
bsr= 46000; %N.s/m (Rear suspension spring damping ratio)
buf= 26573; %N.s/m (Front tire damping ratio)
bur= 26573; %N.s/m (Rear tire damping ratio)
alpha= 30000; %N/V (Piezoelectric stack Force factor, ori: 39.8516)
Cp= 4.5*10^-6; %F (Piezoelectric stack capacitance)
Rp= 20000; %Ohm (Piezoelectric stack resistance, ori: 5)
f= 1.429;%Hz (Frequency)
amp=0.05;%meter (Amplitude)
Lf= 2.1;%meter (Horizontal distance from front axle to C.G.)
```

Lr= 2.46;%meter (Horizontal distance from rear axle to C.G.)

%Wheel base of 777G = 4.56

Is= 200000;%kg.m^2 (Moment of inertia)

tdelay= 0.64;%seconde (time delay between the front and rear axle = wheel base / car velocity = (Lf+Lr)/u)

lambda=5;%meter (road wavelength)

Ek 3. ÇAM Bode grafiği için MATLAB kodu

%Bode plot QCM

%TO REPRESENT ONLY THE MAGNITUDE PLOT IN ABS AND HZ

%First of all you need to import the system from simulink using the bode diagram block

%and save the variable as sys for instance

%declare the mag, phase and radiant frequency of the variable sys

[mag,phase,w]=bode(sys.values);

[mag2,phase2,w2]=bode(sys2.values);

%Convert the radiant frequency into herz

F=w/(2*pi);

F2=w2/(2*pi);

%plot using linespec. If there are several plots can be

%added into the bracket after the variables were declared as for this example

```
plot(F, squeeze(mag),'b',F2, squeeze(mag2),'r--');

%limit the range of the x-axis and/or y-axis
xlim([0 20]);

%Tilte and (X,Y) axes labels
title('QCM Line plot of the Magnitude in frequency domain');
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Magnitude');
%Add legends in the same order lines were plotted
legend('yus/yr','ys/yr')
```

Ek 4. YAM Bode grafiği için MATLAB kodu

```
%Bode plot HCM

%CODE TO REPRESENT ONLY THE MAGNITUDE PLOTS IN ABS AND HZ (More useful for this thesis)
%First of all you need to import the system from simulink using the bode diagram block
%and save the variable as sys for instance

%declare the mag, phase and radiant frequency of the variable sys
[magsprung,phasesprung,wsprung]=bode(syscarbody_sprung.values);
[maguf,phaseuf,wuf]=bode(sysuf.values);
[magur,phaseur,wur]=bode(sysur.values);
```

```
[magpitch,phasepitch,wpitch]=bode(syspitch.values);


%Convert the radiant frequency into herz
Fsprung=wsprung/(2*pi);
Fuf=wuf/(2*pi);
Fur=wur/(2*pi);
Fpitch=wpitch/(2*pi);


%plot using linespec. If there are several plots can be
%added into the bracket after the variables were declared as for this example
plot(Fsprung, squeeze(magsprung),'b','linewidth',1);
hold on
plot(Fuf, squeeze(maguf),'r--','linewidth',1);
hold on
plot(Fur, squeeze(magur),'g:','linewidth',2);
hold on
plot(Fpitch, squeeze(magpitch),'m--','linewidth',2);
hold off
%limit the range of the x-axis and/or y-axis
xlim([0 20]);


%Tilte and (X,Y) axes labels
title('HCM Line plot of the Magnitude in frequency domain');
xlabel('Frequency (Hz)');
```

```
ylabel('Magnitude');


%Add legends in the same order lines were plotted

legend('ys/yr','yuf/yr','yur/yr','teta/yr')
```

Ek 5. Frekans alanında ÇAM dağıtılan güç kodu

```
%%QCM dissipated power in the frequency domain - AKA without piezoelectric stack


%% Mass matrix

M=[Mus 0; 0 Ms];

%% Stiffness matrix

K=[Kus+Ks -Ks; -Ks Ks];

%% Damping matrix

B=[bus+bs -bs;   -bs bs];

%%%
```

```
    E=M.*s^2+B.*s+K;
    Y=E\F;
    Yus(N)=abs(Y(1));                %Displacement of UnSprung bounce
    Ys(N)=abs(Y(2));                 %Displacement of Sprung bounce
P(N)=((bs*W(N)^2*(Ys(N)-Yus(N))^2)/2);    %power dissipation (W)
end

%% plot for power dissipation with natural frequencies
    plot(Feq,P,'b','LineWidth',1)
    xlabel('Frequency (Hz)','color','k')
    ylabel('Dissipated Power (W)','color','k')
%% Title
title('QCM dissipated power in the frequency domain');
    set(gca,'FontSize',10,'FontName','times')
    grid
```

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

UYARI: Bu bölümde intihal programında çıkan benzerlik yüzdesinin bulunduğu detaylı raporun ilk sayfasının yer alması tüm öğrenciler için zorunludur! Bu uyarıyı okuduktan sonra siliniz!

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Drissa Mohamed Malo

(İmza)

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Drissa Mohamed Malo

(İmza)