T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

BİREYSEL GİYSİLERE ENTEGRE EDİLMİŞ PİEZOELEKTRİK ŞERİDİN İNSAN HAREKETİNİN TANIMLANMASI VE ELEKTRİK ÜRETİM PERFORMANSININ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURAL MADAK

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. MUSTAFA KURT

ÇANAKKALE – 2025

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

BİREYSEL GİYSİLERE ENTEGRE EDİLMİŞ PİEZOELEKTRİK ŞERİDİN İNSAN HAREKETİNİN TANIMLANMASI VE ELEKTRİK ÜRETİM PERFORMANSININ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURAL MADAK

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. MUSTAFA KURT

ÇANAKKALE – 2025

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Nural MADAK tarafından Prof. Dr. Mustafa KURT yönetiminde hazırlanan ve **24/01/2025** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan "**Bireysel Giysilere Entegre Edilmiş Piezoelektrik Şeridin İnsan Hareketinin Tanımlanması ve Elektrik Üretim Performansının Analizi**" başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Prof. Dr. Mustafa KURT (Danışman)	……
Prof. Dr. Sennur ALAY AKSOY	……
Prof. Dr. Hülya DEMİRÖREN	…….

Tez No : 10697074
Tez Savunma Tarihi : 24/01/2025

Prof. Dr. Melis ULU DOĞRU
Enstitü Müdürü

../../2025

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Nural MADAK
10/01/2025

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi, yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mustafa KURT'a, eğitim hayatıma katkısı olan tüm hocalarıma, hayatımın her anında her zaman beni destekleyen ve yanımda olan canım annem ve sevgili aileme ayrıca çalışmanın deneysel kısmındaki yürüyüşlere katkı sağlayan sevgili ablam ile araştırma süreçlerimde kütüphane kapısında beni sabırla bekleyen temmuz ayında kaybettiğim can dostum, manevi destekçim Satürn'üme çok teşekkür ederim…

Nural MADAK
Çanakkale, Ocak 2025

ÖZET

BİREYSEL GİYSİLERE ENTEGRE EDİLMİŞ PİEZOELEKTRİK ŞERİDİN İNSAN HAREKETİNİN TANIMLANMASI VE ELEKTRİK ÜRETİM PERFORMANSININ ANALİZİ

Nural MADAK
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Prof. Dr. Mustafa KURT
24/01/2025, 89

Bugün, dünyada ilerleyen teknolojiyle birlikte artan enerji taleplerini karşılamak için yeni enerji kaynakları aranırken; bu kaynakların, yenilenebilir ve sürdürülebilir olması hedeflenmektedir. Çalışmada, bu amaç doğrultusunda yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynağı olarak piezoelektrik malzeme entegre edilmiş bir akıllı tekstil tasarlanmıştır.

Çalışmada tasarlanan bu akıllı tekstilde, bir pantolon üzerine şerit piezoelektrik malzeme monte edilerek; piezoelektrik malzeme tarafından üretilen elektrik sinyallerinin, bacak hareketlerine bağlı olarak oluşturduğu farklı yürüme desenleri incelenmiştir. Oluşan bu yürüme desenleri çeşitli genliklere sahip kompleks sinüzoidal dalgalardan meydana gelmektedir. Piezoelektrik malzemeden ölçülen dalgaların genlikleri oluşan potansiyel farkını göstermekte, fakat yürüyüş desenini tam olarak karakterize etmeye olanak vermemektedir. Bu yüzden, ölçülen gerilim değerleri Orijin programında FFT analizleri ile zaman uzayından frekans uzayına çevrilmiş ve bulgular incelenmiştir.

Deneysel sonuçlar, bu çalışmada geliştirilen piezoelektrik-pantolon sisteminin, bireylerin günlük yürüyüş aktiviteleri sırasında 6 ila 10 V arasında değişen bir elektrik potansiyeli ürettiğini göstermektedir. Bu ölçümlerde, 10 saniyelik bir yürüme periyodu boyunca kaydedilen elektrik potansiyeli değerlerinin entegre edilmesiyle elde edilen güç hesaplaması, 0,183 watt-saniye (65,88 watt-saat) güç değerini ortaya koymuştur. Bu değer, bu çalışmada geliştirilen piezoelektrik pantolon sisteminin, cep telefonları veya giyilebilir

sağlık sensörleri gibi düşük voltajlı elektronik cihazların güç gereksinimlerini karşılamak için yeterli olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, çeşitli yürüme kalıpları için FFT analizlerinde frekans spektrumunun incelenmesiyle, spektrum sonuçlarında gözlenen önemli farklılıklar sayesinde vücuttaki bazı kusurlarının tespit edilebileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Piezo Şerit, Akıllı Tekstil, Yenilenebilir Enerji , FFT, İnsan Hareketi, Sürdürülebilirlik

ABSTRACT

ANALYSIS OF DEFINING HUMAN MOTION AND ELECTRIC GENERATION PERFORMANCE OF A PIEZOELECTRIC STRIP INTEGRATED ONTO INDIVIDUAL CLOTHING

Nural MADAK

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Energy Resources and Management

Advisor: Prof. Dr. Mustafa KURT

01/24/2025, 89

Alternative energy sources are investigating to meet the increasing energy demands with the advancing technology in the world nowadays, it is firstly aimed that these sources are renewable and sustainable. In this study, a smart textile integrated by piezoelectric material was proposed as an energy source for this aim.

In smart textile, strip piezoelectric material was mounted on the pants; walking patterns created by the electric signals produced by the piezoelectric material according to the leg movements were examined. Walking patterns consist of complex sinusoidal waves with various amplitudes. The amplitudes of the obtained and measured waves show us the potential difference that occurs, but they are not enough to characterize the walking pattern of humans. Therefore, the obtained voltage values were converted from time space to frequency space by FFT analyses method in the Origin program and the findings were examined.

Experimental results show that the developed piezoelectric-pants system produces an electric potential between 6-10 V during the daily walking activities of individuals. In the measurements, the power calculation obtained by integrating the electric potential values recorded during a 10-second walking period revealed a power value of 0.183 watt-seconds (65.88 watt-hours). This value shows that the piezoelectric pants system developed in the study is sufficient to meet the power requirements of low-voltage

electronic devices such as mobile phones or wearable health sensors. In addition, it is predicted that somebody's defects can be detected by examining various walking styles and thanks to the significant differences observed in the frequency spectrum results in FFT analyses.

Key Words: Piezo Strip, Smart Textile, Renewable Energy, FFT, Human Movement, Sustainability

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI…….……..…... i

ETİK BEYAN…….…… ii

TEŞEKKÜR……..….. iii

ÖZET ……..…….…….. iv

ABSTRACT …….…….. vi

İÇİNDEKİLER ……..…… viii

SİMGELER ve KISALTMALAR…….....……. xii

TABLOLAR DİZİNİ…….…. xiv

ŞEKİLLER DİZİNİ……..……...…….….. xv

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ 1

1.1. Teknik ve Akıllı Tekstil Kavramları...…….. 2

1.2. Teknik Tekstil Türleri...…… 3

1.2.1. Teknik Tekstil Malzemeleri ve Teknik Tekstillerden Beklenen Özellikler ……... 5

1.3. Akıllı Tekstil Güncel Uygulamaları...…… 7

1.4. Akıllı Tekstil Üretiminde Kullanılan Malzemeler ……..... 9

1.4.1. Malzemelerin Elektronik Özellikleri...……... 10

Dielektrik Malzemeler…….…... 11

Ferroelektrik Malzemeler……... 12

Paraelektrik Malzemeler……..…….…. 13

Piezoelektrik Malzemeler……... 14

1.5. AC Elektrik Akımı ve Doğrultucu Devreler…….. 15

1.5.1. AC Sinyallerde Kullanılan Temel Kavramlar……..... 17

Periyot, Frekans, Genlik…….…… 17

Fazör Diyagramı……. 17

Tepe Değeri ve Tepeden Tepeye Değer…….… 19

Ani Değer……... 19

Ortalama Değer…….. 20

Etkin (Efektif) Değer (RMS)…….. 20

1.5.2. Doğrultucu Devreler…….…….. 21

Doğrultucular……. 22

1.5.3. Kararlı Kararsız AC Akımlar……. 25

1.5.4. Elektrik Güç ve Kosinüs Faktörü……... 26

1.5.5. Elektrik Depolama Metotları……..… 28

Kondansatörler (kapasitörler)……. 29

Bataryalar (Piller)……... 30

Yakıt Hücreleri……... 31

Süper İletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)…… 31

1.6. Analog Elektrik Sinyal İşleme……... 32

1.6.1. Analog-Dijital Dönüşümü…….. 33

1.6.2. FFT Yöntemi…….. 33

1.6.3. Rezonans Sinyal Kavramı…….. 34

Mekanik Rezonans ve Doğal Frekans…… 34

İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 35

2.1. Literatür Taraması…….. 35

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL YÖNTEM 40

3.1. Piezolektrik Malzemeden Elektrik ve Sinyal Üretimi…….. 40

3.2. FFT Sinyal Anlamlandırma…….. 40

3.2.1 Fourier Dönüşüm Denklemi…… 41

Örnekleme Oranı…….. 45

3.2.2. FFT'de Genlik (Amplitude) ve Faz (Phase) Değerleri……. 46

3.2.3. FFT'de RMS Değeri ve Mutlak Ortalama…….…… 48

3.2.4. FFT'de Sinyal Filtreleme……...…… 49

Alçak Geçiren ve Yüksek Geçiren Filtreler……...…… 50

Band Geçiren (Band Pass) Filtreler…….……... 51

3.3. Deneysel Düzenek…….……..… 51

3.3.1. Kumaş...……..…….…... 52

3.3.2. Piezoelektrik Şerit……...….. 53

3.3.3. Osiloskop…….….….. 55

Osiloskop Probu……. 55

3.3.4. AC Elektrik Doğrultucu Devre…….……. 55

3.3.5. Elektrik Depolama Birimi…….. 56

3.3.6. Dijital Sinyal İşleme ……..… 56

3.4. Deney Uygulaması……. 57

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 60

4.1. Deneyin Birinci Aşaması…..……... 60

4.1.1. Aynı Zaman Çözünürlük Değerinde Yürüme ve Koşma Bulguları…… 60

Yürüme Analizleri (Zaman Çözünürlüğü:500 µs) …….. 60

Koşma Analizleri (Zaman Çözünürlüğü: 500 µs)…… 64

4.1.2. Farklı Zaman Çözünürlük Değerinde Yürüme Bulguları……. 67

Yürüme Analizleri (Zaman Çözünürlüğü: 200 µs)…….. 67

4.2. Deneyin İkinci Aşaması ……... 71

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER 77

KAYNAKÇA ...…….. 82

ÖZGEÇMİŞ ….……..…….……..... I

SİMGELER VE KISALTMALAR

ITTA	Indian Technical Textile Association
İTKİB	İstanbul Tekstil ve Konfeksiyon İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği
UİB	Uludağ İhracatçı Birlikleri
PES	Polyester
PA	Poliamid
PU	Poliüretan
PP	Polipropilen
PE	Polietilen
Cu_2O	Bakır Oksit
ZnO	Çinko Oksit
Si	Silisyum
Ge	Germenyum
eV	Elektrovolt
t.y.	Tarih yok
Sb	Antimon
P	Fosfor
As	Arsenik
In	İndiyum
Ga	Galyum
B	Baron
PZT	Kurşun-Zirkonyum-Titanyum
$BaTiO_3$	Baryum Titanat
SiO_2	Kuartz
$LiNbO_3$	Lityum Niobattır
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
T	Periyot
f	Frekans
V	Gerilim (Volt)
I	Akım

u	Gerilim
ω	Açısal hız (rad/sn)
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
S	Görünür Güç
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
RMS	Efektif Değer (Root Mean Square)
ADC	Analog Dijital Dönüştürücü
µs	Mikro Saniye
nC	Nano cloumb
mA	Mili Amper
Ω	Ohm
L	Bobin Endüktansı
SMES	Süperiletken Manyetik Enerji Depolama
t	Zaman
h	Saat

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Piezo şerit özellikleri	54
Tablo 2	Şeridin tipik yanıt değerleri	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Akıllı tekstillerdeki temel prensip	10
Şekil 2	Bir ferroelektrik malzemenin polarizasyon- elektrik alan döngüsü	12
Şekil 3	Çeşitli malzemelerde kutuplaşma eğrisi	13
Şekil 4	Piezo malzemelerde basınç/kuvvet etkisiyle oluşan gerilim ve elektrik alan etkiyle oluşan genleşme	14
Şekil 5	Doğru akım ve alternatif akım	15
Şekil 6	AC sistemde sinüsoidal gerilim oluşumu	16
Şekil 7	Dalga çeşitleri	16
Şekil 8	Fazör diyagramı	18
Şekil 9	Alternatif akımda çeşitli büyüklüklerin gösterimi	19
Şekil 10	AC gerilimin DC gerilime dönüştürülmesi basamaklarında kullanılan cihazlar	22
Şekil 11	Tek yönlü diyotlarda (kapasitör filtreli) pozitif ve negatif alternans durumu	22
Şekil 12	Transformatör çıkışında tek yollu diyota iletilen alternansların gösterimi	23
Şekil 13	İki diyotlu doğrultucuda pozitif ve negatif alternansların birleşiminin gösterimi	24
Şekil 14	İki yollu tam doğrultucuda elde edilen çıkış sinyalleri	24
Şekil 15	Köprü tipi tam doğrultmaç devrelerinde çıkıştaki dalga görümü	25
Şekil 16	Köprü tipi tam doğrultmaç devrelerinde çıkıştaki dalga görümü	25
Şekil 17	Alternatif devrelerde güç bileşenleri	26

Şekil 18	Rezisif, endüktif ve kapasitif yüklerde direnç-akım gösterimi	27
Şekil 19	Akım-gerilim arasındaki Cos φ	27
Şekil 20	Aktif güç, reaktif güç ve RMS ilişkisi	28
Şekil 21	Pilin çalışma mekanizması	31
Şekil 22	X-Y düzleminde gösterilen bir analog sinyal örneği	32
Şekil 23	Bir karmaşık sinyal (sol) bireysel sinüs dalgalarının (sağ) toplamıdır.	33
Şekil 24	İki tip filament örneğinde iki katmanlı (üst sıra) ve iki tip 2 filament örneğinde üç katmanlı filament kesitinin mikro fotoğrafları (alt sıra).	36
Şekil 25	Katmanlı piezoelektrik jeneratörlerin tasarımı ve performansı.	38
Şekil 26	Piezoelektrik virüs tespit sensörünün çalışmasının şematik gösterimi	39
Şekil 27	Ayakkabı tabanına monte edilen piezo lifler ve oluşturulan elektriksel devre	39
Şekil 28	Farklı faz ve genlikteki sinyallerden oluşan bileşik sinyal gösterimi	41
Şekil 29	Zaman alanından frekans alanına ayrıştırılmış bir bileşik dalga	41
Şekil 30	Frekans alanında sinüzodial dalganın (+) ve (-) genlik gösterimi	46
Şekil 31	Karmaşık sayı düzlemi; genlik ve faz kavramı gösterimi	47
Şekil 32	Zaman düzleminde farklı dalga boylarının frekans eksenindeki genlikleri	48
Şekil 33	Bir dalga sinüzoidinde RMS ve AVG değerlerinin gösterimi	49
Şekil 34	Band geçiren (band pass) filtresi uygulanan bir sinyal	51
Şekil 35	Çalışmada kullanılan kumaş ve piezo şerit	52

Şekil 36	Piezo Şerit	53
Şekil 37	Piezo şerit ölçüleri	53
Şekil 38	Osiloskop	55
Şekil 39	10 sn'lik herhangi bir yürüyüş sinyalinin genlik/frekans grafiği	57
Şekil 40	Gerilim sinyallerinin basit grafiksel gösterimi	58
Şekil 41	Piezo şeride diyot ve kapasitör bağlanmış hali	59
Şekil 42	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları	61
Şekil 43	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları (ayrı)	61
Şekil 44	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki 0-30 Hz arası yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları	62
Şekil 45	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin RMS genlik-frekans sonuçları	63
Şekil 46	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin faz-frekans grafikleri	63
Şekil 47	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki koşma hareketlerinin genlik-frekans sonuçları	64
Şekil 48	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki koşma hareketlerinin genlik-frekans sonuçları (ayrı grafikli)	65
Şekil 49	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki 0-30 Hz frekans aralığında koşma hareketlerinin genlik-frekans sonuçları	65
Şekil 50	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki koşma hareketlerinin RMS genlik-frekans sonuçları	66
Şekil 51	N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki koşma hareketlerinin faz-frekans sonuçları	67
Şekil 52	N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları	68

Şekil 53	N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları (ayrı biçimde)	68
Şekil 54	N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki 0-30 Hz frekans aralığında yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları	69
Şekil 55	N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin RMS genlik-frekans sonuçları	70
Şekil 56	N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin RMS genlik farkı-frekans grafiği	70
Şekil 57	N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin faz-frekans sonuçları	71
Şekil 58	N kişisinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin AC ve DC ölçümlü genlik frekans-grafiği (bileşik)	72
Şekil 59	N kişisinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin AC ve DC ölçümlü genlik-frekans grafiği (ayrı)	73
Şekil 60	N kişisinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki 0-30 Hz frekans aralığında AC ve DC ölçümlü yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları	73
Şekil 61	N kişisinin 500 µs'lik frekanstaki yürüme hareketlerinin AC ve DC ölçümlü RMS genlik-frekans grafiği	74
Şekil 62	N kişisinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin AC ve DC ölçümlü faz-frekans grafiği	75
Şekil 63	DC gerilim değerlerinin integre edilmiş sonuç değerleri ve 10 sn'lik toplam güç miktarı (mili watt)	75

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ

Günümüzde hemen hemen her alanda kullanılan enerji, hayatın vazgeçilmezleri arasındadır. Doğada yenilenemez enerji kaynaklarının sınırlı oluşu, insanları yenilebilir ve sürdürülebilir temiz enerji kaynaklarına yönlendirmiştir.

Bilim insanları bugün hâlihazırda kullanılan kaynaklardan ziyade daha hızlı üretilen, daha ekonomik ve mümkün olan en basit düzenekli enerji elde edinilmesi üzerine çalışmalar yapmaktadırlar. Bu denenen yeni yöntemlerden birisi de piezo malzemeler kullanılarak malzemeye uygulanan basınç kuvvetinin elektrik veya farklı enerjilere dönüştürülmesi ile ilgilidir.

Günümüzün gelişen teknolojisi ve üretim teknikleri sayesinde artık tekstil ürünleri sadece giyim ve ev tekstili üretiminden çıkmış ve çok farklı alanlarda kullanılmaya başlanılmıştır. Gerek daha fonksiyonel kıyafet ve korucu giysiler olsun gerekse tamamen sanayi ve endüstriyel üretim alanları olsun tekstil malzemelerinin yaygın kullanım alanları, onların sıklıkla kullanılmasına ve sürekli geliştirilmesine imkân vermektedir.

Koruyucu olmayan giysiler ve ekstra özellik katılmayan ev mefruşatları dışında kalan tüm tekstil kökenli malzemeler teknik tekstil olarak adlandırılır ve hayatımızın çeşitli alanlarında tek başlarına veya başka malzemelerin ara elemanları olarak yer almaktadırlar. Teknik tekstillerin alt birimi veya daha gelişmiş elektronik, mekanik ve bilgisayar optimizasyonları içeren etkiyi algılayan ve talebe göre etkiye karşı tepki üretebilen tekstil ürünleri ise akıllı (smart) tekstil olarak ifade edilmektedirler.

Akıllı tekstil ürünlerinde sıklıkla kullanılan malzemelerden birisi de piezo malzemelerdir ve bu malzemeler basınç uygulamalarını algılayıp isteğe göre tepki sinyallerine çevirirler. Piezo malzemelerin kıyafet ve ayakkabı gibi farklı giyim ve tekstil

ürünlerine monte edilmesi ile basınç ve hareket enerjisinin depolanması ve daha sonra farklı alanlarda elektrik enerji olarak kullanılması mümkün olabilmektedir.

Biz de bu çalışmamızda kıyafetlere uygulanan piezo şeritler sayesinde, vücut hareketleri ile oluşan enerjinin ölçülmesi, depolanması ve bu enerjinin insan vücudundaki farklı aktivitelerin (kan basıncı, solunum sayısı vb.) kaydedilmesi ve/veya ileriki dönemlerde bu tip enerjilerin insanların kullandıkları elektronik cihazların enerji ihtiyacını karşılamalarına yönelik, bir bakış açısından yola çıkarak piezo malzemeleri günlük kullanılan kıyafetlere (çalışmada pantolon üzerinde denendi) monte ederek ortaya çıkan gerilim ve enerjiyi inceledik. Amacımız piezo malzemelerin kullanıldığı giysiler sayesinde hem insanların gündelik hareketlerinin yenilenebilir bir enerji formuna getirilip getirilemeyeceğini görmek, hem de kişilerin yürüme ve koşma hareketlerinin analizi çıkartılarak durumlarındaki değişikliklerin stabil yürüyüş durumlarıyla ilişkilendirerek (iyi/normal veya kötü/anormal) sıkıntılı ya da hastalık olma olasılığı hakkında uyarıcı bir işlevi olan akıllı tekstil tasarlamak idi. Yaptığımız çalışma sonucunda kişilerin yürüme ve koşma hareketleri sonucu oluşan gerilim değerleri, FFT analizleri ile incelenmiş olup piezo malzemelerle ve uygun elektronik devrelerle bu tip bir akıllı tekstil ile güç üretiminin mümkün olduğu görülmüştür.

1.1. Teknik Tekstil ve Akıllı Tekstil Kavramları

Teknik tekstiller estetik ve dekoratif özelliklerinden ziyade teknik performansları ve fonksiyonel özellikleri için üretilip kullanılan, koruyucu olmayan giysiler ile ev mefruşatı (ev tekstilleri, halı, kilim, örtü, çarşaf, basit yapılı yatak döşek, perde…) haricindeki, tekstil ürünlerini kapsamaktadır (Mecit vd., 2007: 79). Kısaca gündelik kullanılan ve herhangi bir koruyucu veya performans artırıcı özelliği bulunmayan giysiler ile yine ekstra fonksiyonel bir özellik içermeyen, perde, halı, örtü, nevresim, yatak gibi ev tekstil ürünleri dışındaki tüm tekstil malzemeleri, teknik tekstiller olarak ifade edilir. Örneğin itfaiyeci kıyafetleri, koruyucu üniformalar, soğuk, sıcak, sürtünme vb. çevre koşullarına karşı koruyan spor kıyafetleri ve mayoları, kıyafetlerde kullanılan biyeler-fermuarlar, kumaş kökenli ayakkabılar ile blackout (yalıtımlı) perdeler, filtreler, yanmaz

mobilya örtüleri, elektrikli yatak-battaniyeler, kir ve su itici halı, temizlik bezleri gibi ev tekstil ürünleri teknik tekstiller içinde yer alır.

Teknik tekstiller çoğunlukla endüstride kullanıldıkları için ilk zamanlar endüstriyel tekstiller olarak adlandırılmışlarsa da endüstriyel tekstiller, günümüzde teknik tekstillerin 12 (on iki) segmentinden birini oluşturmaktadırlar.

Teknik tekstilleri tanımlamada başvurulan bazı diğer yaygın kullanımlar; endüstriyel tekstiller, mühendislik tekstilleri, fonksiyonel tekstiller, görünmez ve yüksek teknolojili tekstiller ile performans tekstilleridir. Teknik tekstiller kendi başına bir ürün olarak kullanılabildiği gibi başka bir malzemenin performans, mukavemet ya da farklı bir işlevsel özelliğini artırmak amacıyla da kullanılabilirler ("Indian Technical Textile Association (ITTA)", t.y.).

Akıllı tekstil, bir etki ya da etki değişimini algılayıp istenildiğinde bu etkiye karşı tepki verebilme özelliği bulunan teknik tekstil ürünleridir (Erdem İşmal ve Yüksel, 2016: 88-89). Akıllı tekstil, istenilen bir fonksiyonu gerçekleştirmek üzere tasarlanmış; sensörler, iletken teller ve mikrosistemler, enerji yakalama ya da depolama cihazları, aktüatörler, ses, ışık, ısı yayabilen mikro elektronik sistemler içeren iplik, kumaş, elyaf gibi tekstil materyalleri ile birleştirilen tekstil ürünlerini ifade etmektedir (Erol ve Çetiner, 2017:307-308)

Daha basit bir ifadeyle akıllı tekstil, teknik tekstillerin elektronik ve bilişimsel özellikler eklenmiş olan daha geliştirilmiş bir formudur.

1.2. Teknik Tekstil Türleri

Teknik tekstiller her ne kadar ilk çıktıklarında endüstriyel tekstil olarak ifade edilseler bile bugün farklı sektörler ve farklı amaçlar için kullanıldıklarından 12 (on iki)

sınıfa ayrılmışlar ve buna göre adlandırılmışlardır. Bazı teknik tekstiller ise aynı zamanda diğer sınıfların ürünlerinden oluşur. Örneğin ekolojik ve çevre tekstilleri, endüstriyel tekstiller gibi... Bu yüzden bu iki grubun altına da eklenebilen teknik tekstil ürünleri net olarak sınıflandırılamaz ve tercihe göre on iki segmentten uygun grubun altında incelenip gruplandırılabilir. Bir filtre hem endüstriyel teknik tekstil hem taşıtlarda kullanılıyorsa taşıt teknik tekstilleri hem de çevreye ekolojik açıdan fayda sağlıyorsa ekolojik teknik tekstiller altında yer alabilir. Aşağıda teknik tekstillerin genel kabul görmüş olan bu on iki sınıfı ve bu sınıflarda yer alan tekstil malzemeleri kısaca açıklanmaktadır.

Teknik tekstil sınıfları; inşaat ve yapı tekstilleri (buildtech), jeolojik tekstiller (geotech), ekolojik ve çevre tekstilleri (oekotech-ecotech), zirai tekstiller (agrotech), endüstriyel tekstiller (indutech), ambalaj tekstilleri (packtech), taşımacılık tekstilleri (mobiltech), ev teknik tekstilleri (hometech), koruyucu (elbiseler) teknik tekstiller (protech), giyim teknik teksilleri (clothtech), spor teknik tekstilleri (sportech) ve hijyen ve tıbbi tekstillerden (medtech) oluşmaktadır (UİB, 2021: 2).

Bina ve tüm inşaat yapılarında kullanılan yalıtım, güçlendirme konstrüksiyon malzemeleri, çimento destekleyici tekstiller, iskele ağları, balistik (kurşun geçirmez) kumaşlar, gıda, taşımacılık ve çeşitli sanayi alanlarında kullanılan filtreler, sterilize ve çevre dostu ürünler, yanmaz yapı malzemeleri, tarım, hayvancılık gibi zirai alanlarda kullanılan brandalar, sera malzemeleri, ahır ve ağıl kaplaması yapılan kumaşlar, balıkçılıkta kullanılan ağlar, farklı makine ve cihazların içinde yer alan toz, gaz ve sıvı filtreleri, evlerde kullanılan toz ve temizlik bezleri, taşıtlarda ve makinelerdeki bant taşıyıcılar (konveyörler), halatlar, kablo kaplamaları, fırçalar; hammadde ve ürünlerin paketlenmesinde kullanılan çuval, file, bez torba, kumaş ve iplik kaynaklı diğer paketleme malzemeleri, kara, hava, deniz taşımacılığında kullanılan araçların koltuk, döşeme, filtre, yer kaplamaları, emniyet kemerleri, hava yastıkları, kord bezleri, kayışlar vb.; ısı, ışık yalıtımlı, kir itici, antibakteriyel özellikli yatak, perde, battaniye, halı gibi ürünler ile evlerde kullanılan toz bezleri, perde ve jaluzi iplikleri, halı-kilim kenar ve arka kaplamaları, koltuk-mobilya döşemeleri, dolgu malzemeleri ve vatkaları, çelik yelekler, itfaiyeci kıyafetleri, önlükler, reflektörlü vb. giysiler; giysilerin fermuar, kemer, astar, tela gibi aksesuarları, suni deriler ve yardımcı malzemeleri ile ayakkabı iç ve dış tekstil kökenli

malzemeleri; ısı yalıtımlı, terlemeyi, sürtünmeyi önleyici fonksiyonlar eklenen forma ve mayolar, ile spor araç ve gereçlerinde kullanılan file, iplik, kurdele, yelken bezleri, paraşüt, bayrak, yapay çim, top gibi spor malzemeleri; tıbbi işlemlerde kullanılan yara bantları, sargı bezleri, ameliyat iplikleri vb. ile sağlık kurumlarında kullanılan ve ekstra özellikler eklenen perde, kumaş, yatak, örtü, nevresim, battaniye gibi malzemeler, ıslak mendil-havlular, kadın pedleri, bebek ve yaşlı bezleri gibi birçok sağlık ve tıbbi ürünler, teletıp alanında kullanılan tekstiller, suni üretilen organ ve dokular ile belli özellikler eklenerek hasta kişileri ve/veya yakınlarını uyaran akıllı sağlık giysileri teknik tekstillerin farklı gruplarına örnektir (İTKİB, 2008: 8-10; UİB, 2021: 3-5).

1.2.1. Teknik Tekstil Malzemeleri ve Teknik Tekstillerden Beklenen Özellikler

Teknik tekstil üretiminde kullanılan malzemeler; doğal ve yapay elyaf kökenli iplikler, dokuma ve örme veya dokusuz yüzey (nonvowen) kumaşlar ile kompozit malzemelerdir. En sık kullanılan elyaf çeşitleri mukavemet gerektiren alanlarda keten, kenevir, pamuk gibi doğal lifler veya yapay liflerden polyester (PES), poliamid (naylon) (PA), Polipropilen (PP), Polietilen (PE), cam lifi iken elastikiyet istenilen durumlarda özellikle poliüretan (PU) ve aramid lifidir. Çok özel üretilen veya küçük yüzey parçalarda ipek, nem çekmenin yüksek olması istenilen yerlerde pamuk, yün, viskon, tencel; çabuk kuruma istenilen malzemelerde PES, PA, PP yalıtım istenilen ürünlerde karbon ve cam lifleri, ısı tutması istenilen kumaşlarda Poliakrilik (PA) ve yün lifleri sıklıkla kullanılmaktadır.

Teknik tekstil malzemeleri çok çeşitli olmakla birlikte kullanılacak malzeme aslında üründen beklenen özelliklere göre seçilmekte hatta bazen birkaç farklı tekstil hammaddesi veya ara maddesi harmanlanarak üretilmektedir. Çünkü teknik tekstiller kullanıldıkları alanlara güvenlik, işlevsellik, mukavemet, esneklik, çok yönlü kullanım, hafiflik, lojistik kolaylık, ekolojik avantaj, sağlık, maliyet-sonuç kazanımı gibi birçok etkinlik katmaktadır ("Indian Technical Textile Association (ITTA)", t.y.). Bu etkinlikler ise kullanılan teknik tekstillerden beklenen performanslara göre seçilmektedir. Örneğin tıbbi ve hijyen tekstilleri için anti bakteriyellik, hava geçirgenliği, vücut dokularından

çözünme hızı, mukavemet, esneklik önemli iken, makine parçalarında kullanılan teknik tekstillerde anti statiklik, güç tutuşurluk, mukavemet, esneklik; zirai tekstillerde hava geçirgenliği, çevre dostu olması, mukavemet daha önemli olmaktadır. Bu yüzden tüm teknik tekstiller için bütün özelliklerin en iyi olmasından ziyade o ürünün kullanıldığı yerde sağlayacağı performans için gerekli özellikler önem arz eder ve bu da aynı zamanda yüksek maliyetli olan teknik tekstillerin üretiminde kısmen de olsa maliyeti düşürür.

Teknik tekstillerden beklenen özellikler temelde mekanik özellikler, değiştirme özellikleri, insan sağlığına yönelik özellikler ve koruma özellikleridir.

Mekanik özelliklerden beklenti ürün grubuna göre mukavemet, takviyelendirme ve elastikiyettir. Mukavemet ve elastikiyet aslında tüm tekstil ürünlerinde değerleri değişse bile kullanım alanına göre olması zorunlu özelliklerdendir. Ancak bazı malzemelerde bu değerlerin daha yüksek olması arzulanır. Özellikle jeotekstil, endüstriyel tekstil ve bina tekstilleri gibi yüksek kuvvete maruz kalan ve sık değiştirilemeyen halat, emniyet kemeri, branda gibi malzemelerin yüksek mukavemetli olması istenirken spor malzemeleri ve kıyafetlerinde, medikal tekstillerde ve yırtılma kuvvetine maruz kalan çoğu üründe elastikiyetin yüksek olması talep edilir. Uçak kanadı, helikopter pervanesi gibi alanlarda kullanılan teknik tekstiller ise aynı zamanda takviyelendirme (kuvvetlendirme) işlemi de görür.

Değiştirme özellikleri ise teknik tekstiller üretilirken kullanılan hammaddelerin yapılarında ve/veya oluşturulan yeni kompozit yapılarda farklı kumaş ve iplik yapıları elde edilerek daha iyi iletim, yalıtım, filtrasyon, izolasyon, su geçirmezlik ve emicilik elde edilmesini sağlamaktadır (“Teknik tekstiller nedir, kullanım alanları, özellikleri”, 2012).

İnsan sağlığına yönelik özellikler; vücut bütünlüğüne zarar gelmesini engelleyecek çeşitli özellikleri kapsamaktadır. Bakteri mikroorganizmalardan koruyan anti bakteriyellik, yangın ve yüksek ısıdan koruyan yanmazlık-güç tutuşurluk, vücut içi ve dışında kullanılan tıbbi malzemeler için biyolojik bozunabilme veya vücuda uyumlu olabilmeyi ifade etmektedir.

Koruma özelliklerinden kasıt kişileri çeşitli çevre şartlarına karşı hastalık, sakatlık, yanma ve ölüm tehlikelerinden korumaktır. Bu çevre şartları radyoaktivite, vücuda zararlı kimyasallar, yüksek veya düşük sıcaklık, yangın, elektrik akımı, kurşun, bıçak, çeşitli makine aksamları gibi delici kesici cisimler, magnetik alanlar, yüksek frekanslı ışınımlar, karanlık vb. olabilmektedir (İTKİB, 2008: 13-14).

1.3. Akıllı Tekstil Güncel Uygulamaları

Akıllı tekstiller elektronik, bilgisayar, makine, malzeme, tıp ve tekstil alanlarının ortak çalışmaları sonucu ortaya çıkan disiplinler arası bir çalışma alanıdır. Kuşkusuz ki bu alanın gelişmesinde tekstil sektöründeki teknolojik gelişmeler, kimyasal elyaf üretimlerinin artması, kompozit tekstil malzemesi üretimlerindeki yenilikler oldukça etkilidir (Coşkun, 2007:1).

İlk çıktığında tıbbi, uzay ve askeri giysi olarak tasarlanan akıllı tekstiller, bugün estetik ve görsel olarak da zenginleştirilmiş formlarıyla hazır giyim ve tekstilin birçok alanında önem arz etmektedirler (Erdem İşmal ve Yüksel, 2016: 87).

Günümüzde akıllı tekstiller; teknik tekstillerin birçok alanındaki çeşitli mamullere mikro ve nano boyutlu elektronik, kimyasal, fiziksel değişkenler entegre edilerek onlara daha fonksiyonel özellikler katmaktadır.

Akıllı tekstil ürünü, yapısına entegre edilen işlevsellikler ile kimyasal, elektriksel, manyetik, termal ya da farklı bir kökene bağlı uyarıları algılayabilir ve onlara tepki verebilir ve/veya değişikliklere uyum sağlayabilir (Van Langenhove vd., 2005: 176). Akıllı tekstiller; etkiyi algılama ve tepki verebilme gibi performans özelliklerine bakımından sınıflandırıldıklarında aktif akıllı tekstil, pasif akıllı ve ultra akıllı tekstil olarak üç gruba ayrılabilmektedirler. Eğer malzeme sadece yapısındaki sensörler ile etkiyi algılıyorsa pasif akıllı tekstil, çevredeki değişiklikler veya insan hareketi gibi bir etkiye karşılık tepki verebiliyorsa aktif akıllı tekstil, malzeme tepki verme esnasında hafızasına yüklenen

değerlere göre çevre şartlarına uyum sağlıyorsa ultra akıllı tekstil olarak isimlendirilir ("Smart textile, smart clothing", 2022). Örneğin akıllı giysideki bir vücut sensörü solunum düzenini izliyor ve kaydediyorsa pasif, solunum değerleri belirtilen değerin altına veya üstüne çıktığında sinyal veriyorsa aktif akıllı tekstil malzemesidir. Yine bir termal perde, ısının artış ve azalışına göre renk değiştirip ortamın sıcaklığına uyum sağlıyorsa ultra akıllı tekstil olarak gruplandırılabilir.

Kullanım alanları açısından değerlendirilen akıllı tekstiller ise tıbbi alanlarda kullanılan akıllı tekstiller, uzay alanlarında kullanılan akıllı tekstiller, savunma ve askeri alanlarda kullanılan akıllı tekstiller, spor ve serbest zaman kıyafetlerinde kullanılan akıllı tekstiller, moda tasarımında kullanılan artistik ve yaratıcılık özelliği bulunan akıllı tekstiller, ev tekstili alanlarında kullanılan akıllı tekstillerdir (Meriç, 2016: 32-50).

Elde edilecek performanslar açısından akıllı tekstiller; 'vücut sıcaklığını düzenleyenler, görünmezlik sağlayanlar, nemi algılayanlar, ısıya duyarlı olanlar, çevre şartlarına göre renk değiştirenler, elektro tekstiller ve giyilebilir bilgisayarlar, kötü ve güzel koku yayanlar, serinletme fonksiyonu bulunanlar, eğilme ve burkulmaya karşı duyarlı olanlar, temas ve dokunulmaya duyarlı olan kumaş ve giysiler' olarak gruplandırılabilir (Coşkun, 2007: 22-80).

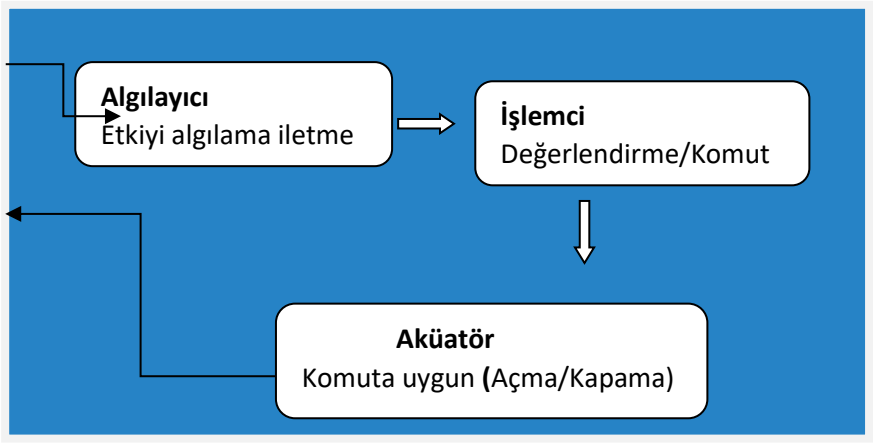
Bugün, vücut veya çevre değerlerini ölçen sensörlü giysiler, askeri kıyafetler, uzay giysileri, yapay organ ile hasta ve yaşlılar için üretilen tıbbi giysiler, piezo malzemelerle birleştirilen akıllı giysi ve ayakkabılar, ısı-ışık-renk-basınç vb. değişkene duyarlı perde, yatak, gibi ev tekstilleri veya kendi kendini temizleyebilen, renk değiştirebilen, çevresel şartlara uyum gösteren giysiler, ev tekstili ya da çeşitli endüstriyel malzemelerde akıllı tekstil uygulamaları görülmektedir.

1.4. Akıllı Tekstil Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Akıllı tekstillerin gelişminde ve çeşitli tasarım alanlarında yaygınlaşmasında rol oynayan etkenlerin başında, malzemelerin farklı kullanım alanlarında ortaya koyduğu karekteristik özelliklerinin daha iyi bilinmesi ve günümüzde çoğu malzeye ulaşmanın kolay ve mümkün olması yer almaktadır (Meriç ve Üreyen, 2019: 536).

Akıllı tekstiller, kullanılan malzemelere göre veya kullanım alanlarına göre sınıflandırıldığında dört grupta toplanabilir. Bu grupların ilki kişileri sıcak soğuk etkilerinden, yüksek voltaj, nükleer radyasyon, zehirli kimyasallardan koruyan, özel spor dalları ile askeri ve güvenlik mensuplarına yönelik *faz değiştiren materyallerle tasarlanan akıllı giysilerdir*. İkincisi değişken çevre şartlarında bulundukları formdan daha önce belirlenen eski formlarına dönebilen *biçimsel hafızalı materyallerden elde edilen akıllı tekstillerdir*. Üçüncü grupta ısı, ışık, basınç, elektrik, kimyasal vb. çevresel etkilerle renk değiştirebilen *kromik malzemelerden üretilen akıllı tekstiller* bulunmaktadır. Son grup ise *elektronik/iletken malzemelerden üretilen akıllı tekstil* malzemeleridir. Bu tip tekstil ürünleri ve giysiler, tekstil lifinin iletken ve yalıtkan yapıda olmasından yararlanarak veya bazı iletken tellerin giysi ve ürünlere monte edilmesiyle üretilebilmektedir (Coşkun ve Oğulata, 2008: 101-105).

Akıllı (elektronik-bilişim alt yapılı) tekstiller üretilirken temel prensip aynıdır ve dizayn bu prensibe göre inşa edilir. Malzemelerde bulunan ana bileşenler algılayıcı, işlemci ve aktüatör'dür. Algılayıcı etkiyi alır ve işlemciye iletir. İşlemci bu bilgiyi değerlendirerek aktüatöre komut gönderir. Aktüatör de bu komuta uygun açma kapama, iletim yalıtım gibi işlemleri gerçekleştirir (Mattila, 2006: 1).



Şekil 1. Akıllı tekstillerdeki temel prensip

1.4.1. Malzemelerin Elektronik Özellikleri

İster pasif ister aktif akıllı tekstil içerisinde yer alsın, akıllı tekstillerin tümü etkiyi algılayacak ve işleyecek; elektronik ve bilgisayar bağlantısı içermektedir. Aktif akıllı tekstillerde bu etkiye tekrardan tepki verebilecek ya yeni bir devre vardır ya da tepkinin iletimi içinde etkinin iletildiği elektronik devre kullanılmaktadır. Bu mekanizmalarda kullanılan elektronik malzemeler ise genellikle Dielektrik, Ferroelektrik, Paraelektrik ve Piezoelektrik malzemelerden oluşmaktadır. Malzemeler seçilirken hem monte edildikleri tekstil malzemesinin türü hem de kullanılan elektronik malzemenin devrede göstereceği iletkenlik ve yalıtkanlık özelliği etkili olmaktadır.

Elektronikte kullanılan malzemeler temelde iletken, yalıtkan ve yarı iletken şeklinde sınıflandırılırlar.

İletken maddeler özdirençleri düşük, atomik dizilimde son yörüngelerinde 1, 2 veya 3 elektron bulunan ve elektrik akımını ileten maddeler iken; yalıtkan maddeler özdirençleri büyük, son yörüngelerinde 5-8 arası elektron bulunduran ve akım geçişini engelleyen maddelerdir. Yarı iletkenler ise özdirençleri yalıtkandan düşük, iletken malzemelerden yüksek olan, elektrik akımının geçişinin kontrol edilebildiği malzemelerdir. Yarı iletken

maddelerin son yörüngelerinde 4 elektron bulunur. Bu maddeler bakıroksit (Cu_2O), çinko oksit (ZnO) gibi bileşik veya Silisyum (Si), Germenyum (Ge) gibi element de olabilmektedir. Yarı iletken teknolojisinde özellikle katkılandırılmış n tipi ve p tipi malzemeler ile çalışılır. Yani saf yarı iletken malzemeye bazı katkı atomları ilave edilir. Bu katkılama düzeyi on milyonda bir seviyesinde kalmasına rağmen maddenin iletkenlik özelliğinde ve karakteristik özelliğinde ciddi iyileşme ve değişimler görülür (Selek, 2008: 30-32).

Katkılama işlemi n ve p tipi olarak gerçekleştirilir. N tipi katkılı malzemelerde, son yörüngesinde 4 elektron bulunan ve 4 elektron daha alabilecek yapıdaki Si veya Ge tabana Antimon (Sb), Fosfor (P) Arsenik (As) gibi son yörüngesinde 5 elektron bulunan maddeler eklenir ve toplam 8 elektronluk son yörünge için 1 elektron sürekli boşta kalır. Katkılama düzeyine bağlı olarak boşta kalan elektron sayıları artar ve düşük miktar enerji ile bu elektronlar kopartılabilir ve bu iletkenlik artışına sebep olur. P tipi malzemelerde ise Si ve Ge tabana İndiyum (In), Galyum (Ga) Boron (B) gibi son yörüngesinde 3 elektron bulunan maddeler katkılanır ve son yörünge toplam 7 elektron olacağından her seferinde 1 delik boşta kalır bu da yörüngelere yerleşmiş elektronların boş deliğe doğru hareketine neden olur (Coşkun,1994: 8-10). Dolayısıyla yarı iletken yapılarda, belli (yalıtkan malzemelere göre daha düşük) bir enerji ile maddenin valans bantlarında bulunan elektronların iletim bantlarına hareketi kontrollü olarak sağlanır ve malzeme kontrollü olarak iletken hale getirilebilir.

Elektrik malzemeleri dielektrik, piezoelektrik, paraelektrik ve ferroelektrik olarak sınıflandırılmaktadırlar. Her ferroelektrik malzeme aynı zamanda piezo malzemedir ve her piezo malzeme de aynı zamanda bir dielektrik malzeme demektir.

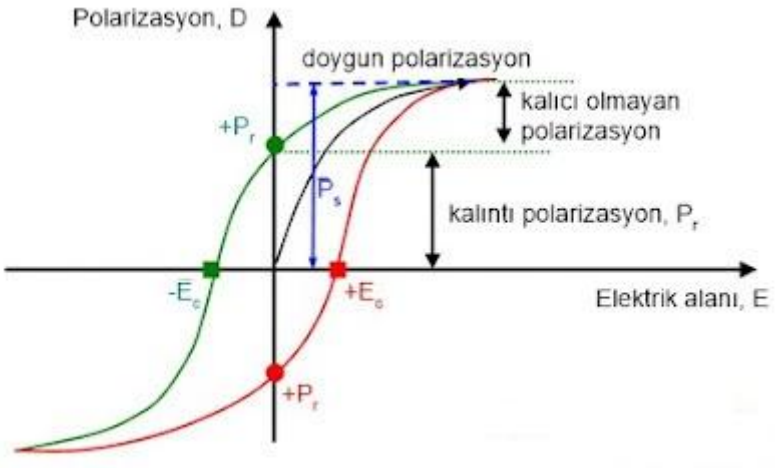
Dielektrik Malzemeler

Yalıtkan malzemeler gibi elektrik akımını geçirmeyen ancak elektrik yüklerini depolama ve yönlendirme özelliği gösteren izolatör maddelerden oluşur. Hava, cam, seramik ve bazı plastik malzemeler dielektrik özellik gösterirler. Dielektrik maddeler

kapasitörlerin temel taşıdır. Elektrikli cihazlarda, tıbbi cihazlarda, optik cihazlarda, otomotiv sektöründe; kutuplaşma, radyasyon ve manyetik alanların engellenmesinde yoğun bir şekilde dielektrik malzemeler tercih edilmektedir ("Dielektrik madde nedir?", t. y.).

Ferroelektrik Malzemeler

Belirli sıcaklık altında iki kutuplu doğal bir elektrik momenti olan maddelerdir. Bu malzemelere dışarıdan bir elektrik alan uygulanarak kutup momentleri değiştirilip yeniden yönlendirilebilir. Günümüzde en sık kullanılan ferroelektrik bileşikler baryum titanat ($BaTiO_3$) ve lityum niobattır ($LiNbO_3$). Bu maddeler sıcaklık ve elektrik alanlardan kolay etkilenmektedir yani bu değişkenlere bağımlıdırlar. Kırılma indislerinin elektrik alanlara olan bağımlılığı bu malzemelerin özellikle elektro-optik malzeme olarak seçilmelerinde etkendir. Doğrusal olmayan kondansatörler, sensörler, sıcaklık düzenleyiciler (stabilizatör) diğer kullanım alanlarına örnek verilebilir (Şekil 2) (Beşergil, 2024: 1).



Şekil 2. Bir ferroelektrik malzemenin polarizasyon- elektrik alan döngüsü; E_c: zorlamalı alan, P_s: kendiliğinden polarizasyon, P_r: kalan polarizasyon
Kaynak: Beşergil, (2024)

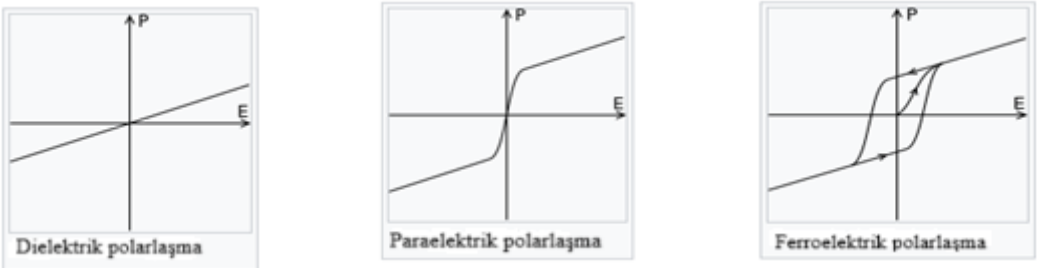
Ferroelektrik malzemelerde doğrusal kutuplaşma görülmezken maddenin içinde bulunduğu elektrik alan sıfır bile olsa bu malzemelerde anlık (spontane) sıfır dışı

kutuplaşmalar görülür. Bunun yanında bu zıt yönde oluşan anlık kutuplaşmalar uygun bir elektrik alan etkisiyle muhafaza edilebilir. Ferro malzemelerdeki bu kutuplaşma, elektrik alana ve döngünün süresine bağlıdır. Ferroelektrik malzemelerin ismi, benzer süreli döngü ve mıknatıslanma özelliği olan ferromanyetik maddelerle benzerlik göstermesindendir (“Ferroelektrik”, t.y.).

Paraelektrik Malzemeler

Çoğu maddenin kutuplaşmasında; uyarılan (indüklenen) kutuplaşma, etki eden dış elektrik alana eşittir ve bu yüzden kutuplaşma grafikleri dielektrik kutuplaşmasındaki gibi doğrusal olarak bulunur. Ancak paraelektrik malzemelerde bu kutuplaşma doğrusal değildir ve elektriksel iletkenlik yalıtkan maddelerdeki gibi kutuplaşma eğrisinin eğimine eşittir (Şekil 3) (“Ferroelektrik”, t.y.).

Maddelerin çoğu faz değiştirme sıcaklığında (Curie sıcaklığı) feeroelektrik özellik gösterirken ve bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında maddeler ferroelektrik özelliklerini yani anlık kutuplaşma yeteneklerini kaybederek paraelektrik forma geçerler. Aynı zamanda ferroelektrik malzemelerin genelinde Curie sıcaklığının üstüne çıkılması ile birlikte malzeme piezoelektrik özelliklerini yitirir. Bu tip malzemelerde paraelektrik aşaması simetrik kristalografik yapı halindedir (“Ferroelectricity”, t. y.)



Şekil 3. Çeşitli malzemelerde kutuplaşma eğrisi
Kaynak: “Ferroelektrik”, (t. y.)

Piezoelektrik Malzemeler

Kristal ve seramik malzemelerin baskı ve mekanik stres gibi fiziksel değişkenler sayesinde elektriksel potansiyel üretme veya tersi olarak elektriksel gerilim uygulandığında mekanik değişiklikler üretebilme kabiliyeti olarak ifade edilir. Kristal yapılı bu malzemelerde simetri eksiklikleri mevcut olup yapılarında bulunan atomların dış kuvvetlerin etkisiyle düzenlenmesi hedeflenir. Belli bir basınç ile iç elektrik yüklerinin yer değiştirmesi sağlanarak elektrik potansiyel farkı elde edilir. Bu potansiyel fark ise kullanılan sinyali tetikleme işlevi görür. Tetikleme işleminde sadece basınç kuvveti değil, titreşim ve ivmeleri de elektrik sinyaline dönüştürebilmektedir. ("Piezoelektrik nedir? Kullanım alanları ve tarihçesi", 2023)

Uygulanan kuvvetin artması elektriksel kutuplaşmayı da artırmaktadır. Tersi durumda eğer bu kristal yapılar bir elektrik alanda ise bu alanın gücüyle orantılı olarak kristal yapılar uzayıp kısalmaktadır (Şekil 4a/b). Günümüzde en çok kullanılan piezo malzemeler kurşun-zirkonyum-titanyum (PZT) seramik, baryum titanat ($BaTiO_3$), kuartz (SiO_2) ve Turmalin'dir ("Piezoelektrik Malzemeler ve Uygulama Alanları", 2023).

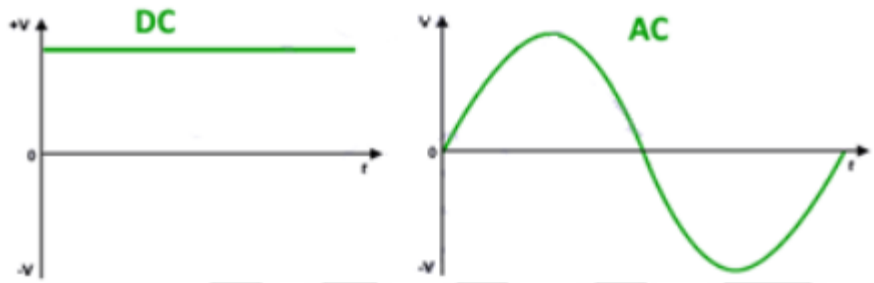
Özünde mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü gerçekleştirdiği için piezo malzemeler aslında bir enerji dönüştürücü görevi görür bu amaçla kullanılır.

Şekil 4. Piezo malzemelerde basınç/kuvvet etkisiyle oluşan gerilim (a) ve elektrik alan etkiyle oluşan genleşme

Kaynak: "Piezoelektrik malzemeler ve uygulama alanları", (2023)

1.5. AC Elektrik Akımı ve Doğrultucu Devreler

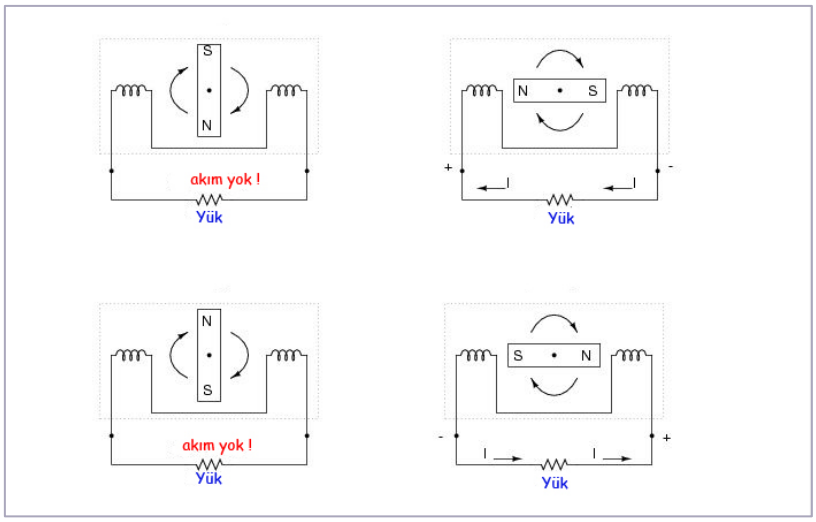
Akım yönü ve şiddetinin zamana göre değişmediği akım doğru akım (direct current) (DC) olarak tanımlanırken akımın yönü ve şiddetinin değiştiği akıma, alternatif akım (alternating current) (AC) (Şekil 5.a/b) denir ("AC devre kesicinin DC voltajda kullanımı", 2022).



Şekil 5.a. Doğru akım 5.b. Alternatif akım

Kaynak: "AC devre kesicinin DC voltajda kullanımı", (2022)

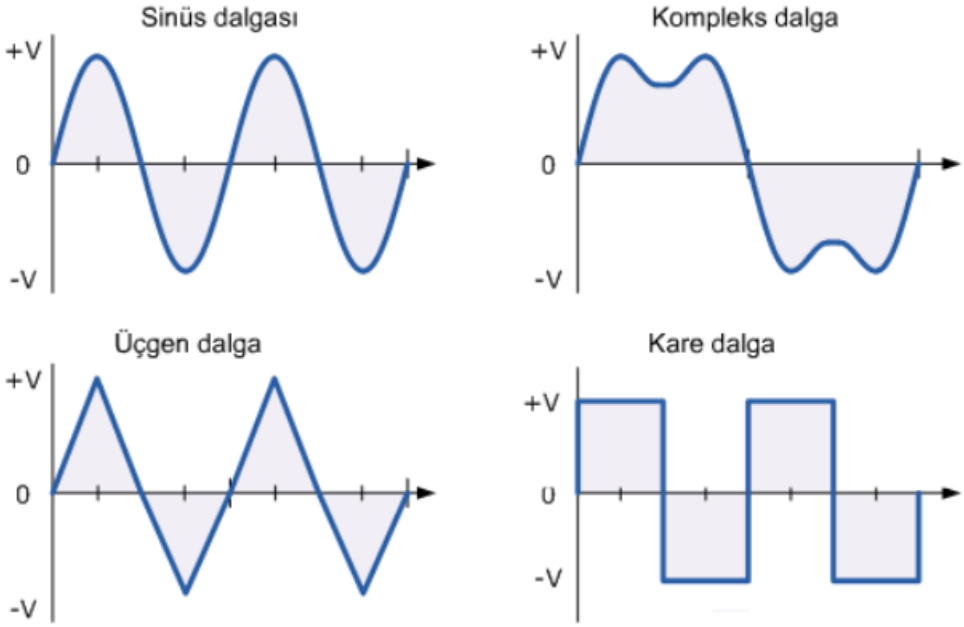
AC'de gerilim veya akımın zamana (t) göre fonksiyonu (y=Asin(ωt)) sinüzoidal şekildedir. Faraday Kanununa göre gerçekleşen bu tip bir akımın üretilmesi; bir manyetik alanda bir iletkenin devinimi sonucu oluşan voltaj indüklenmesinden kaynaklanır. Şekil 6'da görüldüğü üzere sabit iletken bobin ve hareketli bir manyetik alandan oluşan düzenekte iki kutuplu mıknatısın döndürülmesi sonucu bobine etkiyen toplam akı değişmekte ve bir gerilim elde edilmektedir ("Alternatif akımın temel tanımları", 2015). Burada manyetik akının açısal olarak dönmesi sonucu oluşan gerilim önce artmakta, pozitif tepe noktasından sonra düşerek sıfırlanmakta ve tam bir periyot içinde akı yönüne bağlı aynı büyüklükte negatif yönde bir gerilim oluşturmaktadır.



Şekil 6. AC sistemde sinüsoidal gerilim oluşumu

Kaynak: "Alternatif akımın temel tanımları", (2015)

Alternatif devrelerde sinyal, sinüs fonksiyonu (sinüzodial) şeklinde olabildiği gibi kare dalga, üçgen dalga ve kompleks dalga şeklinde de olabilir (şekil 7).



Şekil 7. Dalga çeşitleri

Kaynak: MEB, (2012)

1.5.1. AC Sinyallerde Kullanılan Temel Kavramlar

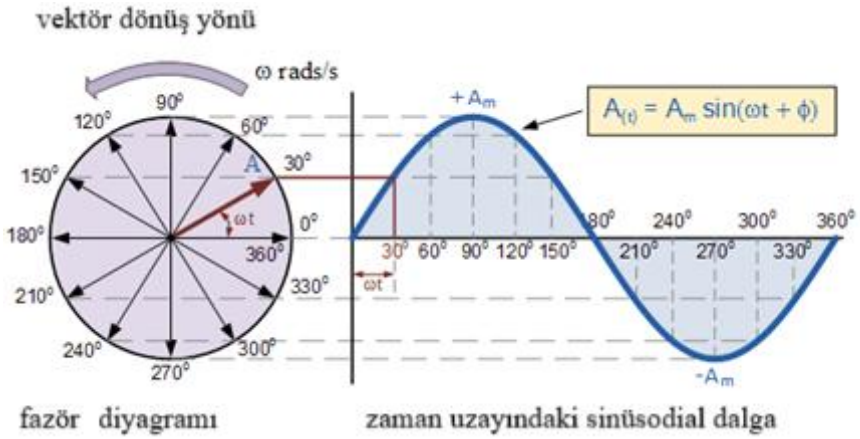
AC akım devrelerinde ve AC sinyallerinde kullanılan temel bazı kavramlar; periyot, frekans, genlik, fazör diyagramları, etkin değer, ortalama değerdir. Bu kavramlar aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

Periyot, Frekans ve Genlik

AC devrelerde akım gibi gerilimler de değişken yön ve şiddete sahip olur. Bu gerilim devrelerinin önemli değişkenleri; genlik, periyot ve frekanstır. Alternatif akımda bir sinyalin kendini tekrar etmesi için geçen süre, periyot (T) olarak ifade edilir ve birimi saniye (sn'dir). Periyotların yarı süresine karşılık gelen zaman ise alternans olarak isimlendirilir ve alternanslar negatif ve pozitif biçiminde ifade edilirler. Birim zamandaki periyot sayısı frekans (f) olup birimi ise Hertz yani 1/sn'dir (Selek, 2006: 33-34). Genlik periyot süresince oluşan Sinüzoidal dalganın en yüksek değer noktasından en düşük değer noktasına kadar olan düşey uzaklığın yarıdır. Yani pozitif veya negatif yöndeki sinüs dalgasının maksimum değeridir.

Fazör Diyagramları

İki ya da daha çok ölçülebilen değer arasındaki yön ve büyüklük ilişkisini tanımlamak için kullanılan grafiksel gösterimler fazör diyagramı olarak isimlendirilir (şekil 8), ("Fazör diyagramı", 2021). Sabit boyutta, 'w' (rad/sn) açısal hızla saat yönünün tersine dönen bir vektörün uzunluğuna Fazör denir. Aşağıdaki şekilde fazörün pozitif yatay eksenle fazörün yaptığı α açısına göre çizilen fazör diyagramı yer almakta olup burada α ve w değeri sabit olduğundan formül 1-1'deki eşitlik elde edilir. Fazörün uç noktasından her φ açısına karşılık gelen X eksenine olan dikey mesafeler A ile gösterildiğinde eşitlik 1.2 ve 1.3'deki ifadeye ulaşılır.



Şekil 8. Fazör diyagramı

Kaynak: "Fazör diyagramı", (2021)

$$\alpha = w.t \tag{1.1}$$

$$\alpha = A_m \sin(\alpha) \tag{1.2}$$

$$\alpha = A_m \sin\,(\omega.t) \tag{1.3}$$

Sinüzodial hareket eden t=0 anındaki Fazörün konum açısı, faz açısı 'φ' olarak adlandırılır ve eşitlik 1.4'deki genel AC devrede akım ifadesine ulaşılır.

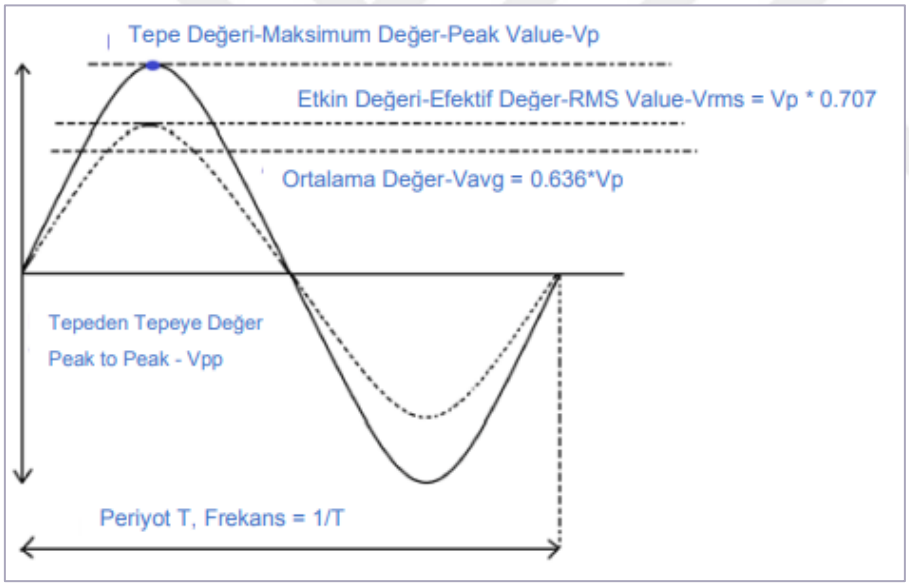
$$A_t = A_m \sin\,(\omega.t + \varphi) \tag{1.4}$$

Sinüzodial gerilim ve akımların büyüklükleri çeşitli şekillerde ifade edilebilmektedir. Bunlardan sıklıkla kullanılanlar, tepe değer, tepeden tepeye değer, ani değer, etkin değer (RMS) ve ortalama değerdir.

Tepe Değeri ve Tepeden Tepeye Değer

Sinüs dalgası şeklindeki fonksiyonda tepe değer, y eksenine göre pozitif veya negatif yönde oluşan ve mutlak olarak birbirine eşit büyüklükteki maksimum noktadaki akım veya gerilim değeridir (Hekim ve Dağlı, 2008: 20-24). Şekil 8'de '$+A_m$ ve $-A_m$' değerleri tepe değerlerini göstermektedir. Sinüs dalgasında pozitif tepe ile negatif tepe arasındaki düşey uzaklık değeri tepeden tepeye değer olarak ifade edilir ve bu değer mutlak tepe değerlerinin iki katına eşittir (şekil 9, eşitlik 1.5).

$$Tepeden\ Tepeye\ Değer = |+A_m| + |-A_m| = 2|+A_m| \quad (1.5)$$



Şekil 9. Alternatif akımda çeşitli büyüklüklerin gösterimi

Kaynak: Kırıkkale Üniversitesi, (t.y.):

Ani Değer

Sinüzodial bir AC akım fonksiyonunda herhangi bir andaki akım ya da gerilime denilir. Gerilimin ani değeri u(t), v(t) ile gösterilirken akımın anlık değeri i(t) ile belirtilir.

Ortalama Değer

Ortalama değer bir frekanstaki ani değerlerin ortalaması olup bu değer sinyalin DC değerine eşittir (Kırıkkale Üniversitesi, (t.y.): 3).

AC devrelerinde sinüs dalgasının yarısı pozitif, yarısı negatif alanda olduğu ve bu dalgalar mutlak eşit büyüklükte olduğundan bir döngü için ortalama değer sıfır olur. Ancak ½ döngü için hesaplama yapmak istendiğinde Vm tepe gerilimine sahip 0-π aralığındaki sinüs hareketi için 1.6'daki eşitlikler bulunabilir (Ceylan, 2012: 191). A; Sinüs fonsiyonunundaki ½ döngünün X ekseninin üzerinde kalan alanını vermek üzere;

$$A = \int_0^{\pi} v\, d\varphi$$

$$A = \int_0^{\pi} V_M\, sin\varphi . d\varphi \qquad A = V_M - (cos\varphi) I_0^{\pi} \qquad (1.6\ a)$$

$$A = V_M - [(cos\pi) - (cos0)] \qquad A = 2V_M \qquad V_{ort} = 2\frac{V_M}{\pi} \rightarrow$$

$$Ortalama\ değer = \frac{1}{T}\int_0^{T} i(t)dt \qquad (1.6\ b)$$

Etkin (Efektif) Değer (RMS)

Etkin veya efektif değer 'root mean square' kelimelerinin kısaltması RMS olarak da bilinmektedir. Sinüzodial bir akımda ortaya çıkan ısıtma etkisinin nicel ifadesine denir diğer bir ifadeyle eşit zamanda, eş bir direncin doğru akımda ortaya çıkaracağı ısı değerine alternatif akımın etkin değeri denir. Eşitlik 1.7'de yer alan formüller ile sinüzodial dalgada tepe değeri için etkin akım ve voltaj dönüşümü elde edilebilir (Hekim ve Dağlı, 2008: 22-23).

Etkin Akım: $I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_p = 0{,}707\ I_p$ (1.7 a)

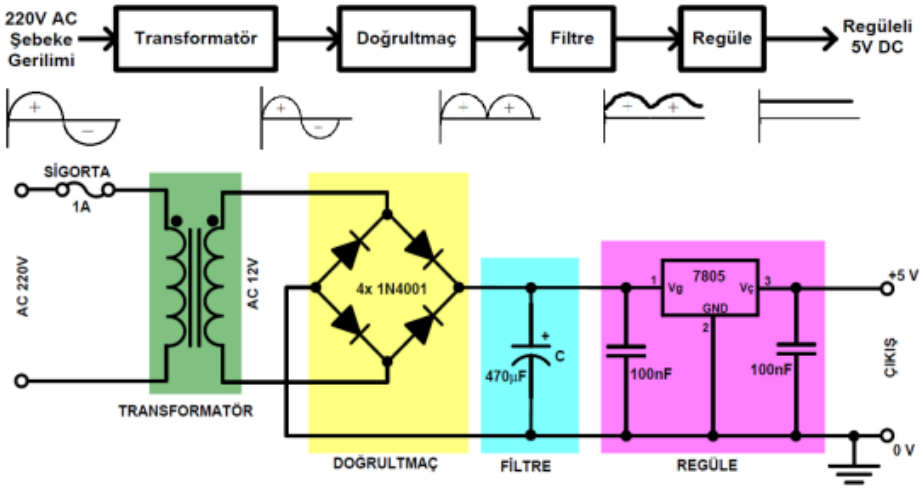
Etkin Gerilim: $V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_p = 0{,}707\ V_p$ (1.7.b)

$$Etkin\ değer = \sqrt{\int_0^T i^2\,(t)dt} = \frac{i_{mak}}{\sqrt{2}} \qquad (1.7.c)$$

Kompleks dalga olarak ifade edilen alternatif sinyaller, sinyalin her periyottaki tepe değerleri, genlikleri farklı olan çeşitli anlık değerlerin birleşiminden oluşmaktadır.

1.5.2. Doğrultucu Devreler

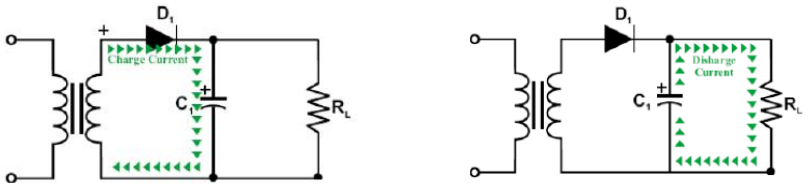
Alternatif akım ve gerilimlerin doğru akım veya gerilime dönüştürme işlemi için kullanılan devrelere *doğrultucu devreler (adaptör veya redrösör)* denilir. Taşıma kolaylığı ve istenilen genlik büyüklüğüne çevirebilme gibi çeşitli nedenlerden dolayı AC olarak üretilen elektrik enerjisi sonrasında transformatörler, doğrultucu devre (güç katı) filtre ve regülatör devreleri ile DC gerilime dönüştürülmektedir (Şekil 10). Bu dönüştürme işlemi için önce transformatörlerde AC gerilimin genliği değiştirilir. (Karadeniz Teknik Üniversitesi, t.y.). Daha sonra doğrultmaç katı kısmında AC gerilim DC gerilime dönüştürülür. Bu iki basamak tüm güç kaynaklarında yapılır çünkü AC gerilimden DC gerilim eldesi bu basamaklar sonrası elde edilir. Üçüncü ve dördüncü basamaklar ise güç kaynağının kalitesini artırmaya yöneliktir ve daha çok kullanılan cihazlara ve tercihlere bağlıdır. Üçüncü basamakta filtre katı mevcuttur bu kısımda DC gerilimdeki dalgalanmalar önlenmeye çalışılır. Dördüncü basamakta regüle katı yer alır ve DC gerilimin sabitlenmesi yapılır (MEB, 2018: 3-4).



Şekil 10. AC gerilimin DC gerilime dönüştürülmesi başmaklarında kullanılan cihazlar
Kaynak: MEB, (2018)

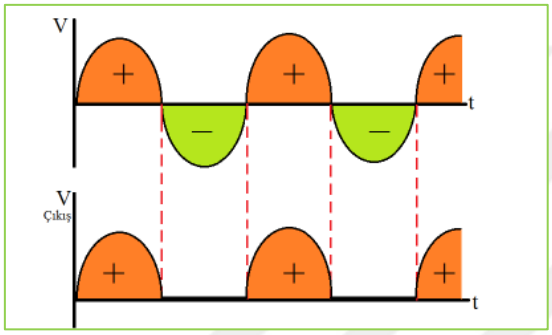
Doğrultucular

Doğrultma devreleri yarım dalga ve tam dalga doğrultucular olarak iki temel tipe ayrılmaktadır. Yarım dalga doğrultucular tek yollu doğrultucu, tam dalga doğrultucular iki yollu doğrultucular olarak sınıflandırılır. Tek yollu doğrultucuya tipik örnek diyotlardır. Diyot pozitif alternans uygulandığında -katot eksi, anot artı uca bağlandığında- iletkendir ve devreye bir kondansatör bağlanırsa, kondansatörün bu alternansta şarj değeri gerilimin maksimum noktasında gerçekleşir. Bu andan itibaren ise yeni pozitif alternans gelinceye kadar kondansatör deşarj halinde akımı sürdürmektedir (Şekil 11) (Adıyaman Üniversitesi, (t.y.):1-2)



Şekil 11. Tek yönlü diyotlarda (kapasitör filtreli) pozitif ve negatif alternans durumu
Kaynak: Adıyaman Üniversitesi, (t.y.)

Yarım dalga doğrultma için kullanılan tek yollu diyotlar kullanılır ve bu devrelerde çıkış sinyali tam düzgün olmaz. Transformatör çıkışlarında yönü ve şiddeti belirlenen frekansa (ki bu rakam Türkiye için sn 100) göre sürekli değişen bir akım elde edilir. Transformatör çıkışında pozitif ve negatif alternanstan oluşan akımın, tek yollu diyotta sadece pozitif yöndeki alternansı alıcıya ulaştırılır (şekil 12). Negatif alternans durumunda diyot akım geçirmez ve sonuçta transformatör çıkışındaki gerilimin neredeyse yarısı akıma dönüştürülür ve bu denli bir gerilim kaybına sebep oldukları için tek yönlü diyotlar, hassasiyeti düşük ve küçük akımlı (50-250 mA) cihazlarda tercih edilir (MEB, 2018: 8-9).

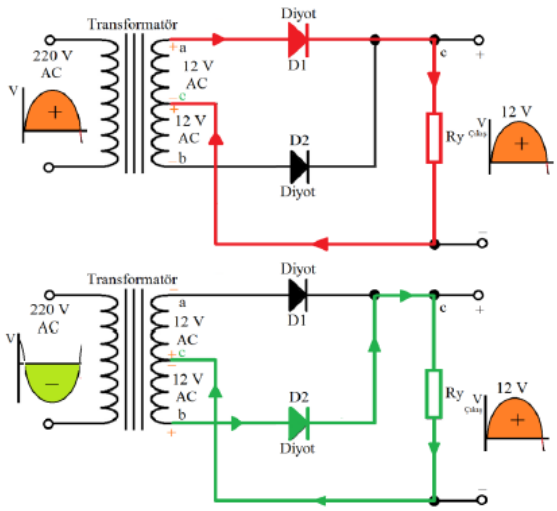


Şekil 12. Transformatör çıkışında tek yollu diyota iletilen alternansların gösterimi

Kaynak: MEB, (2018)

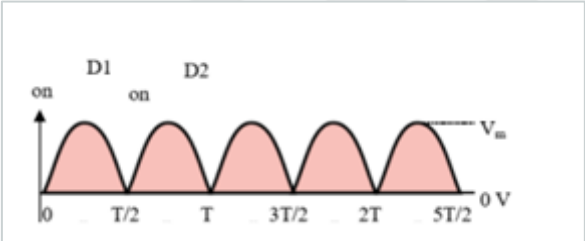
Tam dalga doğrultmaçlar iki diyotlu ve köprü tipi doğrultucular olarak ikiye ayrılamaktadır.

İki diyotlu doğrultmaç sistemleri orta uca sahip transformoterlerde etkindir. Burada sekondere bağlanan D_1 ve D_2 diyotları farklı alternanslarda etkin (iletken) konuma geçerler ve böylece tranformatörden gelen tüm gerilim sinyalleri transformatörün orta uç kısmında birleşir pozitif akım şeklinde çıkışa iletilir (Şekil 13 ve şekil 14) (Adıyaman Üniversitesi, (t.y.):3-5)



Şekil 13. İki diyotlu doğrultucuda pozitif ve negatif alternansların birleşiminin gösterimi

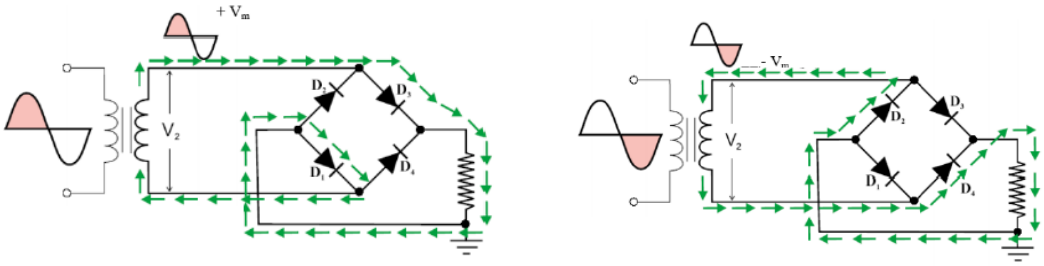
Kaynak: MEB, (2018)



Şekil 14. İki yollu tam doğrultucuda elde edilen çıkış sinyalleri

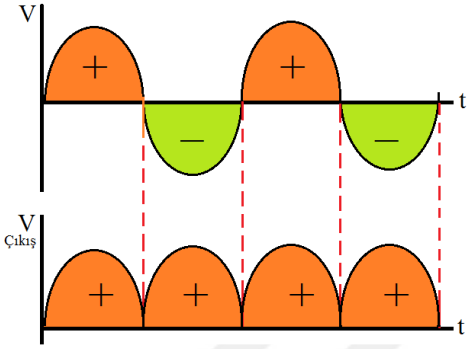
Kaynak: Adıyaman Üniversitesi, (t.y.)

Köprü tipi tam doğrultmaç devrelerinde ise çalışma prensibi temelde iki diyotlu gibidir. Ancak burada toplam dört diyot kullanılır ve şekil 15'de gösterildiği gibi D_1 ve D_3 diyotları iletimde iken pozitif alternans, D_2 ve D_4 diyotları iletimde iken negatif alternans sinyalleri çıkışa iletilir. İki diyotlu devreye göre hem transformatörde orta uca gerek yoktur hem de enerji kaybı en az olan doğrultucu devredir (Şekil 15-16). Girişteki AC gerilimin yaklaşık %90'nı çıkışta DC olarak elde edilir ("Diyot nedir?", 2014).



Şekil 15. Köprü diyotlarda pozitif ve negatif alternans iletimi

Kaynak: Adıyaman Üniversitesi, (t.y.)



Şekil 16. Köprü tipi tam doğrultmaç devrelerinde çıkıştaki dalga görümü

Kaynak: MEB, (2018)

1.5.3. Kararlı Kararsız AC Akımlar

AC devrelerinde gerilim veya akımın sinüzodial olmayıp her periyotta veya yarım periyotta sinyalin genliği veya dalga boyu değişkendir. Bu tip kararsız akımlarda oluşan dalga tipi karmaşık (kompleks) dalga olarak isimlendirilir. AC akım eldesinde oluşan gerilim ve akımların mümkün olduğunca kararlı yapıda olması iletimde kolaylık sağlamakla beraber kullanılan iletkenlerin ve devre elemanlarının daha uzun ömürlü olmasında etkilidir.

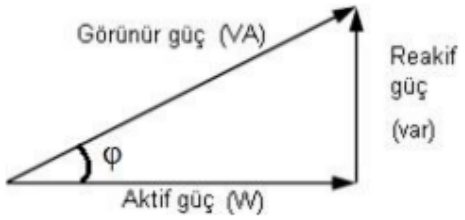
Elektronik devrelerde gerilim kararlılığı; üretilip yük merkezine iletilen güç ile güç sisteminin yük istemi (talebi) arasındaki dengenin düzenli olmasına bağlıdır. Bir sistemde termostat gibi nedenlerden oluşan gerilim azalmalarından sonraki süreçlerde, motor kayma

hareketlerinde, akımlar sabit iken transformatörün sargılarının değişmesi vb. durumlarda yük bu kaynaklanan güç tüketimlerini telafi edici yönde eğilim gösterir (Demircioğlu, 2006: 15)

1.5.4. Elektrik Güç ve Kosinüs Faktörü

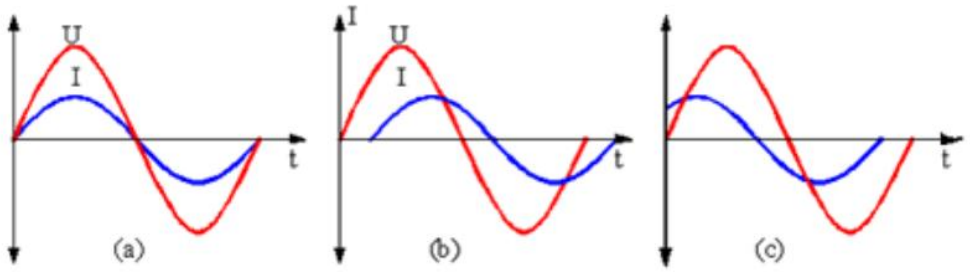
Elektrik devrelerinde birim zamanda yapılan işe elektrik gücü denir ve bu değer devrenin gerilimine (V) ve devreden geçen akıma (I) bağlıdır.

Alternatif akım devrelerinde; doğru akım devrelerinden farklı olarak akım ve potansiyel farkın sürekli değişmesi ve aralarındaki faz farkı olması ayrıca kapasitif ve endüktif yüklerin varlığından dolayı güç, vektörel bileşenlere sahiptir. Bu vektörel bileşenler Aktif Güç (P) (birimi Watt) , Reaktif Güç(Q) (birimi VAR) ve bileşke güç Görünür Güç (S) (birimi VA)' dır (Şekil 17). Aktif veya etkin güç, her an değeri değişiklik gösteren gücün yararlı olan ya da başka bir ifadeyle iş yapan ortalama değerine denilmektedir. Enerji depolayabilme özelliğine sahip kapasisif ve endüktif devre elemanlarında enerji depolanabilir ve bu enerji kaynağa geri aktarılabilir. İşte bu kaynağa geri beslenen güç reaktif güç olarak ifade edilir. Görünür (kompleks) güç ise alternatif devrelerde birlikte bulunan, reaktif yüklere ve rezistif yüklere harcanan reaktif ve aktif gücün bileşkesinden meydana gelir (Amasya Üniversitesi, (t.y.): 1-2).



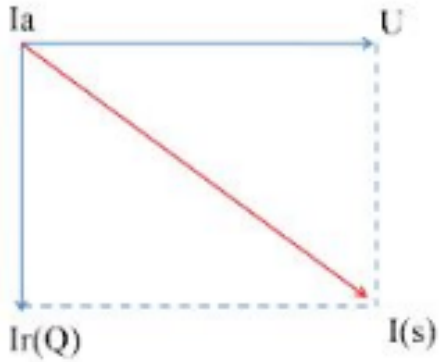
Şekil 17. Alternatif devrelerde güç bileşenleri
Kaynak: Amasya Üniversitesi, (t.y.)

Alternatif devrelerde aktif ve reaktif gücü etkileyen bu farklı yük çeşitleri üç grupta toplanabilir. Eğer akımla gerilim arasında faz farkı mevcut ve yük üzerindeki akım gerilimin çarpanı ise rezisif (direnç) türü yükten bahsedilir. Yük üzerindeki akımın potansiyel farktan arkada olması durumunda endüktif yük tipinden söz edilirken tersine yük üzerindeki gerilimin akımdan daha arkada olması durumundaki yük türüne kapasitif yük denilmektedir. Şekil 18'de farklı yük çeşitlerindeki gerilim-akım grafikleri verilmiştir ("RMS (etkin değer) ve ortalama değer", t. y.).



Şekil 18. Rezisif (a), endüktif (b) ve kapasitif (c) yüklerde direnç-akım gösterimi
Kaynak: "RMS (etkin değer) ve ortalama değer", (t. y.)

Akım ile gerilim arasında kalan zaman açısının kosünüs değerine (Cos φ) güç faktörü veya güç katsayısı denir. Bu açı AC devrelerde kapasitif, endüktif ve omik dirençlere göre değişmektedir (şekil 19) ("Güç katsayısı ölçme", 2012). X-Y düzleminde, Cos φ değeri 0 ve 360 derecede en yüksek 1, 180 derecede en düşük -1 değerine sahipken 90 ve 270 derecelerinde 0 değerini almaktadır.



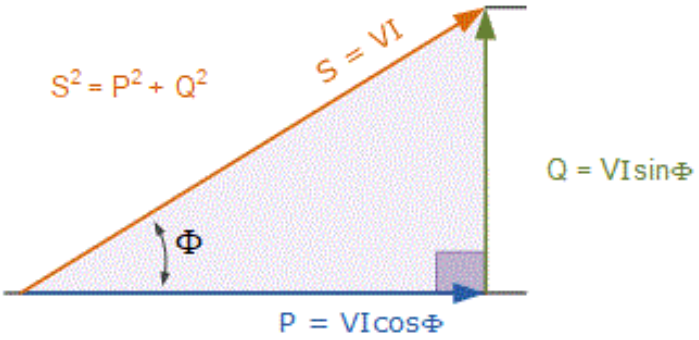
Şekil 19. Akım-gerilim arasındaki Cos φ
Kaynak: "Güç katsayısı ölçme", (2012)

Diğer bir ifadeyle Güç katsayısı (faktörü) aktif güç ile kompleks güç arasındaki orandır ve Cos φ, gerilim ile akım dalgaları arasındaki faz kaymasıdır ("Güç faktörü ve Cos φ" , t. y.). Bu değerler arasında formül 1.8 ve 1.9'deki eşitlikler söz konusudur.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{1.8}$$

$$P = S * Cos\varphi = VI * Cos\varphi \tag{1.9}$$

Aktif güç (P) devrede çok az bir kayıpla yararlı işi yapan güçtür. Reaktif güç (Q) ise elektronik aletlerdeki manyetik alanı oluşturur ve faydalı iş yapan enerji olarak kullanılamadığı gibi iletim araçlarında ve iletim hatlarında boş yere yükleme yapar. Bu yüzden AC devrelerde enerji kaybını en aza indirmek için Q gücünün sıfır olması arzu edilir ("RMS (etkin değer) ve ortalama değer", t. y.).



Şekil 20. Aktif güç, reaktif güç ve RMS ilişkisi
Kaynak: "Güç faktörü ve Cos φ", (t. y.)

1.5.5. Elektrik Depolama Metotları

Günümüzde elektrik depolama yöntemleri çok çeşitli olmakla birlikte mekanik, hidroelektrik pompalama ve elektrokimyasal yöntemler en çok tercih edilenlerdir. Bu yöntemlerden mekanik depolama yeni bir teknoloji olup flywheel olarak adlandırılan kinetik enerjinin kullanımıyla elektrik enerjisi depolama yöntemidir. Sistemin maliyetli olması kullanımını kısıtlamaktadır. Hidroelektrik pompalama dünya genelinde sıklıkla

kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde Hidroelektrik barajlarında elektriğin satış fiyatının azaldığı saatlerde su baraja pompalanır ve ihtiyaç olduğu zamanlarda depolardaki bu sular kullanılarak elektrik üretilir. Ancak bu sistemde kullanılacak olan su depo barajları mevcut hidroelektrik barajlarına ek olarak yapılabildiği ve ana barajdan besleme yapıldığı için sistemin esneklik kabiliyeti pek bulunmaz ("Enerji nasıl depolanacak? Enerji depolama yöntemleri nelerdir?", t. y.)

Elektro kimyasal olarak elektrik enerjisi depolanması, kondansatörler (kapasitör,), bataryalar (pil), yakıt hücreleri ve süper iletken manyetik enerji depolama (SMES) sistemi ile yapılabilmektedir.

Kondansatörler (Kapasitörler)

Kondansatörler iki iletken tabaka arasına dielektrik özelliklere sahip yarı iletken malzeme konulası ile elde edilir. Enerji; elektronların kutuplanarak, negatif ve pozitif yüklü iyonların farklı tabakalarda dizilimi ile elde edilir. Dielektrik ara katmanın görevi iki levha arasında oluşacak yük geçiş arkını önlemektir. C sembolü ile gösterilen kondansatörlerin birimi farad'dır. Klasik kondansatörlerin enerji yoğunlukları 5Wh/m^3 gibi düşük bir değerde iken güç yoğunlukları 1012W/m^3 civarlarında oldukça yüksektir. Bu da onların klasik bataryalara göre hızlı şarj olmasına ve on binlerce defa bozulmadan şarj/deşarj olmalarına imkân vermektedir. Kondansatörler bir kaynağa bağlandığında gerilimin negatif ucuna bağlanan plakası eksi pozitif ucuna bağlanan plakası artı yüklenir. Aradaki yalıtkan madde ise plakalar arası akım geçişini engeller. Gerilim kesildiğinde ise deşarj haline geçen kondansatörde ters akım oluşarak eksi yükler pozitif plakaya doğru hareket eder ve nötrleme işlemi gerçekleşir. Piyasada; seramik kondansatör, elektrolit kondansatör, tantal kondansatör, mika kondansatör, trimer kondansatör, süper kondansatör ve alçak gerilim güç kondansatörü gibi çeşitleri mevcuttur. ("Elektrik enerjisi depolama yöntemleri ve seçim kriterleri", 2021) ("Kondansatör nedir? Ne işe yarar?", t.y.)

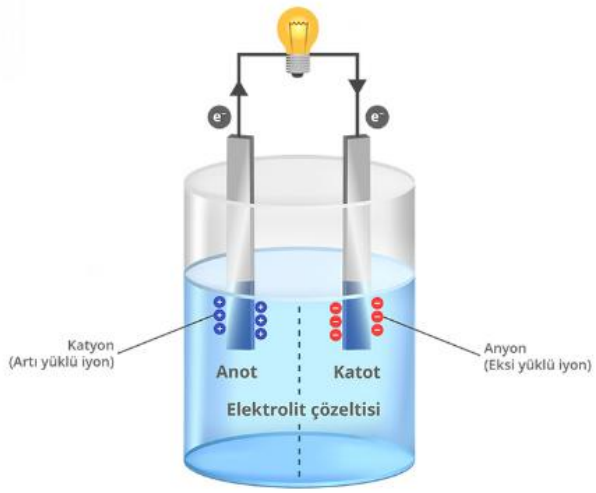
Bataryalar (Piller)

Batarya veya diğer adıyla piller elektrik enerjini kimyasal enerjiye çevirip depolayan ve istenildiğinde tekrar elektrik enerjisi olarak kullanıma sunan depolama araçlarıdır.

Üretiminde kullanılan malzemeye göre Lityum-İyon Bataryalar, Kurşun Asit Bataryalar, Nikel-Kadmiyum Bataryalar, Nikel–Metal Hidrit Bataryalar, Sodyum-Sülfür Bataryalar gibi çeşitleri bulunmaktadır.

Bataryalar tekrarlı kullanım imkânı veren şarj edilebilir veya sadece depolanan enerji kadar kullanım sağlayan tek kullanımlık (şarj edilemeyen) biçimlerde tasarlanabilir. Pillerin çalışma prensibi elektrolit adı verilen iletken (sıvı) ortamda pozitif ve negatif elektrot adı verilen metaller arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara dayanır. Anot ve katot olarak adlandırılan metallerdeki elektronlar, elektrolit içinde serbest hareket ederek katot (pozitif yüklü) kutbuna doğru hareket ederler. Anot (negatif yüklü) kutupta ise elektronların katota doğru gitmesinden dolayı pozitif yükler (katyon) kalır. Böylece elektrolit içindeki iki metalin birisi anyon yüklü birisi katyon yüklü olur. Pilin kullanımı esnasında ise sistem tersine işler (Şekil 21) ("Piller nasıl yapılır?", 2023).

Bataryaların üretimi ve tercih edilmesinde kapasiteleri, sahip oldukları gerilim voltajı ve şarj edilen türde ise pil ömrü boyunca kaç defa şarj edilebilir, şarj edilebilme süresi, olduğu önem taşımaktadır. Günümüzde uzun ömürlü, hızlı şarj edilebilen, yüksek ve yoğun enerjili piller üretilebilmekte ve özellikle elektrikli araçlarda yüksek kapasite ve güvenilir piller kullanılmaktadır ("Batarya nedir? Batarya çalışma prensibi hakkında bilinmesi gerekenler", 2024).



Şekil 21. Pilin çalışma mekanizması

Kaynak: Seçer Esmer, (2021)

Yakıt Hücreleri

Diğer bir elektrik enerjisi depolama yöntemi olan yakıt hücreleri çalışma prensibi olarak pillere benzese de yakıt ve yakıcılarını harici bir kaynaktan alarak üretim sağlarlar. İlk çıktıklarında (1839) hidrojen-oksijen prensibi şeklinde piyasaya sürülmüşlerdir. Üretimlerinin pahalı olması ve bunun yanında özgül enerji kapasitesi olarak pillere göre daha iyi değerde olmasına rağmen özgül güç olarak daha düşük değere sahip olmaları onların çok da tercih edilen bir kaynağa dönüşmesini engellemiştir (Kozak ve Kozak, 2012: 24).

Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)

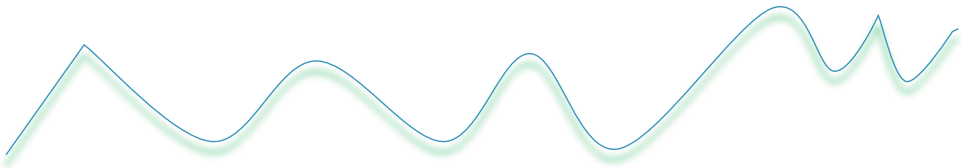
SMES yönteminde içerisinden akım geçirilen süperiletken bobinlerin ürettiği enerjinin manyetik alan içerisinde depolanması işlemine dayanmaktadır. Sistemde depolanan enerji hemen geri alınıp kullanılabilir. Ancak sistemde süperiltkenin sıcaklığını düşürecek bir soğutma donanımı kullanılır ve bu donanım günlük üretilen elektriğin yaklaşık %1-2'si kadardır. Bobin endüktansı (L) ve akım (I) olmak üzere depolanan enerji denklik 1.10'daki gibidir (Kuşdoğan vd., 2000: 199).

$$E = \frac{1}{2} * LI^2 \tag{1.10}$$

1.6. Analog Elektrik Sinyal İşleme

Analog kavramı evrende meydana gelen her şeyin farklı bir tipe çevrilmeden meydana geldiği gibi yansıtılmasıdır. Sinyal ise fiziksel değişkenlerdeki nicelik ve nitelik bilgilerini matematiksel bir fonksiyon olarak gösterilmesidir. Sinyal kavramı; ses, görüntü, radar, tıbbi gibi farklı alanlarda çeşitli ifadeleri barındırır. Anolog sinyallere devamlı (sürekli) (continuous) sinyaller de denilmektedir. Uzay veya zaman gibi sürekli bir değişkenin fonksiyonu olan sinyal çoğunlukla belli aralıkta değerler alır ("Elektrik Sinyali 1 Analog ve Sayısal Sinyal", t.y.).

Analog, bize her değişimin olduğu gibi yansıtılmasını sağlar. Dijitalde olduğu gibi iki farklı değerden bahsedilmez. Analog sinyaller herhangi bir değeri alabilirler ve sonsuz uzunluğa sahip olabilirler (şekil 22).



Şekil 22. X-Y düzleminde gösterilen bir analog sinyal örneği

Analog sinyaller genliği, fazı ve frekansı anlık değişen değerlere sahip devamlı olan sinyallerdir ve çoğunlukla sinüsoidal sinyallerin birleşiminden ya da toplamından meydana gelir. A genlik, F frekans, Ø faz, ω radyal frekans (açısal hız) olmak üzere bir sinüsodial sinyalin (X) temel gösterimi denklem 1.11 gibidir (Karakuş, 2020).

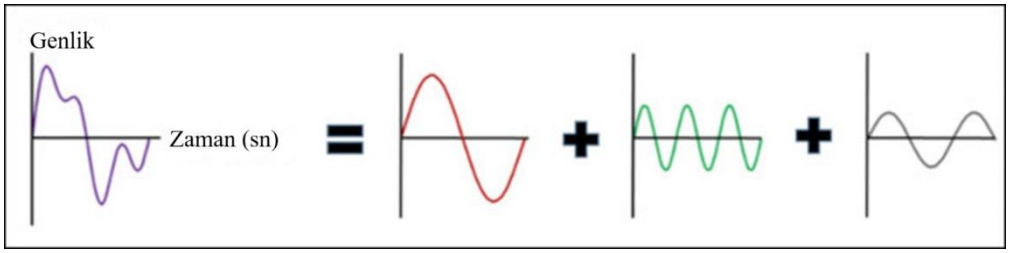
$$X(t) = Asin(\omega t + \emptyset) \tag{1.11}$$

1.6.1. Analog-Dijital Dönüşümü

Analog sinyaller devamlı an be an gerçek veri değerini verirken bunların daha basitleştirilmiş ikili sistem ile ifade edilmiş biçimlerine dijital gösterim denilmektedir. Analog dijital dönüştürücü (ADC) analog verilerdeki sinyalleri ikili; 1 (bir) yüksek, 0 (sıfır) düşük koda, çevirerek bu sinyallerin gerçek dünyada algılanmasını sağlayan bir arayüz oluşturmaktadır. ADC, anlık anolog sinyal görüntüsünü alarak bu sinyal voltajına uygun dijital bir bit sayısı veya ikili bir çıkış kodu yazar. Buradaki anologdan dijital kodlama dönüşümü tamamen dönüştürücünün çözünürlüğüne bağlıdır. Buradaki çözünürlük (2^n -1) (n: bit sayısı) ile hesaplanır ve 4 bitlik ADC 15'te bir çözünürlüğe sahipken 8 bitlik ADC 255'te bir çözünürlüğe sahiptir ("Analog dijital dönüştürücü / Analogue to digital converter", 2021).

1.6.2. FFT Yöntemi

FFT Analizi; çeşitli uygulama alanlarında sinyal analizi gerçekleştirirken en çok kullanılan tekniklerden biridir. FFT, sinyalleri zaman uzayından, frekans uzayına dönüştürür. FFT analizi kullanılarak çok sayıda sinyal özelliği, zaman uzayı verilerinin incelenmesine kıyasla çok daha büyük ölçüde kolaylaştırırken, frekans olarak nodal odakların belirlenmesine yarar. Frekans uzayında, sinyal özellikleri bağımsız frekans bileşenleri ile tanımlanırken, zaman uzayında tüm özelliklerin toplamını içeren tek bir dalga formu ile tanımlanır.



Şekil 23 . Bir karmaşık sinyal (sol) bireysel sinüs dalgalarının (sağ) toplamıdır.
Kaynak: "Fourier dönüşümü nedir?", (2020)

1.6.3. Rezonans Sinyal Kavramı

Bir cismin doğal titreşim frekansına yakın veya eşit büyüklükteki harici bir titreşime maruz kalarak iki titreşimin aynı frekansa gelip sistemin titreşim genliğinin artması durumudur. Günlük hayatta farklı alanlarda görülen rezonans sinyal kavramı elektrik ve elektronikte olumlu ve olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Çünkü rezonans belli bir titreşim ve frekans düzeyinde yükselen enerji transferine neden olur. Elektronik devrelerde sinyal iletimi artırdığı için daha etkin sinyal oluşturup devrelerin verimlerini artırıcı etki yapılabilir ("Rezonans nedir? Ne işe yarar? Olumlu veya olumsuz etkileri nelerdir?", t.y.). Ancak kondansatör gibi harmonik etkilerle çabuk bozulan devre elemanlarında sorun oluşturur. Endüktif iç direncin kapasif iç dirence eşit olduğu frekans rezonans frekansıdır. Frekans artışıyla kondansatörlerde kapasitif reaktans düşer bu da düşük harmonik gerilimlerde yüksek akım çekilmesine neden olur. Harmonik frekansa yakın frekanslı bir kondansatörde kısmi rezonans oluşma ihtimali yüksektir. Kısmi rezonans etkisiyle çekilen yüksek akım kondansatörlerin ısınmasına ve dielektrik kayıplarına neden olur ("Rezonans nedir?", t.y.).

Elektrik devrelerinde devre akımı ve gerilimi aynı fazlı ise rezonansta çalışıyor demektir ve bu devrede güç katsayısı sıfır olur kaynak devreye maksimum güç sağlar.

Mekanik Rezonans ve Doğal Frekans

Bir sistemin veya cismin doğal frekanstaki titreşim yapma eğilimine mekanik rezonans denir. Mekanik rezonansın oluşması iki temel faktörden etkilenir. Birincisi sistemin, doğal frekansa sahip olması -ki bu sistem elemanlarının kütle, esneklik, sertlik gibi kendi karakteristik özellikleri tarafından belirlenir- ikincisi ise dışardaki etkenin sisteme uygun bir frekansta etki etmesidir. Bu dış etki ile sistem doğal frekansta titreşim yapmaya başlar ve mekanik rezonans gerçekleşir. Örneğin binalar, makine parçaları, köprüler, diğer çevre uyaranları (deprem, rüzgâr, araç geçişi vb.) etkisiyle doğal frekansta titreşmeye başlarsa mekanik rezonans ortaya çıkar ve bu da artan salınım etkisiyle daha fazla titreşim oluşmasına neden olur ("Rezonans nedir? Etkileri nelerdir?" 2024).

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çalışmamızın bu bölümünde daha önce piezo teknolojisi ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir.

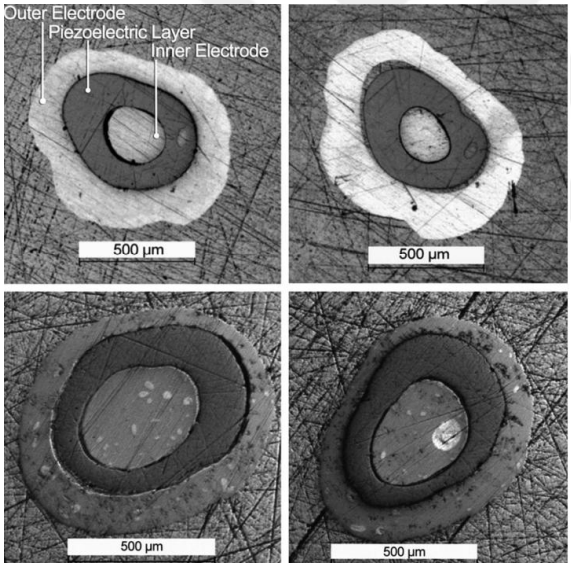
2.1. Literatür Taraması

Piezoelektrik etkisi, materyalin mekanik gerilmelere maruz kaldığında elektrik polarizasyonundaki bir değişikliği ifade eder. Polarizasyondaki bu strese bağlı değişim, materyal boyunca ölçülebilir bir potansiyel fark olarak kendini gösterir. Doğrudan piezoelektrik etkisi olarak adlandırılan bu fenomen, kuvars, Rochelle tuzu ve hatta insan kemiği dahil olmak üzere birçok doğal olarak mevcut kristalli malzemelerde gözlenebilir. Lityum niyobat ve kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi mühendislik malzemeleri, daha belirgin bir piezoelektrik etki sergiler. Günümüzde birçok elektronik cihazda piezoelektrik tabanlı sensörler kullanılmaktadır. Örneğin, akıllı telefonunuzdan bir ses tanıma yazılımı veya Siri gibi bir akıllı asistan kullandığınızda, konuşmakta olduğunuz mikrofon muhtemelen piezoelektrik kullanıyordur. Bilgisayar veya telefonunuzda bulunan piezo kristal ses enerjisini elektrik sinyallerine dönüştürür. Tüm bunlar piezoelektrik etki sayesinde gerçekleşir. Piezoelektrik teknolojisindeki geliştirilmeler ile birlikte daha çeşitli ve gelişmiş uygulamaların keşfi de artabilir. Günümüzde de piezoelektrik elektrik malzemelerin ve cihazların gelişiminin giderek arttığını görmekteyiz.

Akıllı tekstiller günümüzde tekstilin yanı sıra elektronik, bilgisayar, mekatronik, uçak ve uzay, biyoteknik vb. birçok alanın ve bu alanlardaki bilim insanlarının da ilgi konusu olan disiplinler arası bir çalışma konusudur. Özellikle son çeyrekte, piezo lif ve filament üretimleri yaygınlaşmıştır. Bu çalışmalar daha çok ya Piezo materyallerle yapısında farklı bileşimler kullanarak piezo lif ve iplik üretimi şeklinde ya da piezo entegre edilen kumaş ve ipliklere uygulanan basınçla elde edilen elektrik enerjisi üretimleri olmaktadır. Çünkü hem her geçen gün oluşan yeni teknolojiyle daha efektif piezo

malzemeler üretilmek istenmekte hem de özellikleri artırılan piezo malzemelerden daha iyi enerji üretilip verim alınmaktadır.

Martins ve arkadaşları (2014) yaptıkları Polivinil florür Koekstrüzyon ile Elektrik İletken İç ve Dış Katmanlardan Üretilen Piezoelektrik Koaksiyel Filamentler' adlı çalışmada, eriyik koekstrüzyon yöntemi kullanarak dışı polipropilen kaplı PVDF tabakasına sahip bir piezoelektrik fiber üretmişlerdir. Kullanılan yöntemde kılıf kısmı piezoelektrik polimer tabakasından, çekirdek kısmı iletken bir filamandan oluşan piezoelektrik lif elde edilmiştir. Ayrıca sürekli tekrarlanan kuvvetler altında metalik tabaka çabuk zarar gördüğünden bu uygulamalarda elyaf üzerine ilave bir iletken bükülerek liflerin zarar görmesi engellenmek istenmektedir (Şekil 24) (Martins vd., 2014).



Şekil 24. İki tip filament örneğinde iki katmanlı (üst sıra) ve iki tip 2 filament örneğinde üç katmanlı filament kesitinin mikro fotoğrafları (alt sıra).

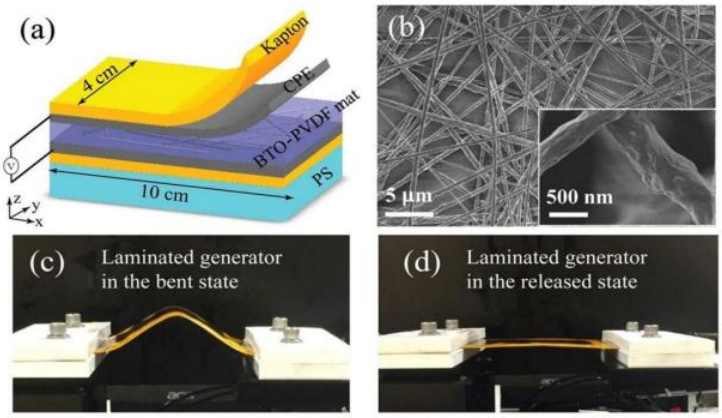
Kaynak: Martins vd., (2014)

Yan ve arkadaşları 2022 senesinde yaptıkları çalışmada, piezo malzeme üretiminde ses dalgalarını elektrik sinyallerine çevirmişlerdir. Bunu yaparlarken insan kulağının ses dalgalarını beyne iletim sırasında elektrik sinyallerine dönüştürme çalışmasından esinlenmişlerdir. Üretilen piezo materyalin makinede yıkanabilir olması ve dökümlülük

gibi kumaş niteliklerini korumasına da özen gösterilmiştir. Kumaş üretim sırasında atkı iplikleri gibi dokunan piezo lifler kumaş hacminin %1'den daha az yer tutmasına rağmen kullanılan piezoelektrik fiberler oldukça etkili ve hassas iletim yapabilmektedir. Çok düşük frekanslardaki, zayıf 10^{-7} atmosferik basınç dalgalarını bile titreşim olarak iletilebilmektedir. Kumaş iletimi mekanik titreşimleri Newton başına yaklaşık 46 pikoculomb gibi bir yüksek piezoelektrik yük katsayısına sahip katmanları algılayabilmişlerdir (Yan vd., 2022).

Dong ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada, mikro yapılı gerilebilir piezo-elektrik liflerin, düzlemsel sistemlerle eşit verimlilikte ölçeklenebilir üretimini göstermiştirler. Mikro dokulu bir yüzeyi birkaç sıvı metal elektrotun entegrasyonu ile birleştiren gelişmiş elastomer lifleri üretmek için termal çekme işlemini kullanmıştırlar. Bu tür lifler, tekrarlanan büyük deformasyonlardan bağımsız olarak yüksek elektrik çıktıları sergilemiş ve %560'a kadar gerinimlere dayanabilmiştir. Ayrıca 490 V, 175 nC'ye kadar yüksek elektrik çıkışlarına sahiptirler ve makinede yıkanabilmektedir. Enerji hasadına ek olarak, bu triboelektrik fiber platformunu çok işlevli giyilebilir sistemler ve akıllı tekstiller için heyecan verici bir yol haline getirerek, kendi kendine çalışan solunum izleme ve hareket algılama yeteneklerini göstermiştirler (Dong vd., 2020).

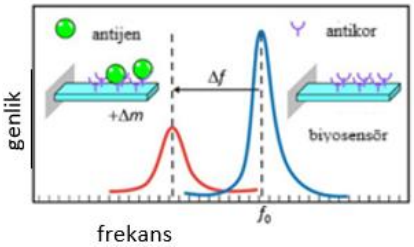
Lu ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptıkları çalışmada, BaTiO3-polivinil ve karbon yüklü polietilen malzeme kullanarak düzlemsel çok katmanlı piezoelektrik üreteçleri ve piozeelektrik lifleri üretmişlerdir. Üretilen malzemede piezoelektrik üreteçler, elektro eğirilmiş BaTiO3 -polivinil içerikli mat, iki adet karbon yüklü polietilen film arasına sıkıştırılmasıyla birleştirilmiştir. Elde edilen piezoelektrik jeneratörler yüksek bir mekanik dayanıma sahip olup üç gün boyunca uygulanan, 'döngüsel bükme serbest bırakma testleri' sonrası dahi iyi bir performans göstermektedirler. Bu tip üretimlerde piezoelektrik liflerin kullanımı lamine tip üreteçlere göre geniş metrajlı ticari kumaşlara direkt dokuma yapılabildikleri için önemli olmaktadır. Piezo üreteçlerde kullanılan elyafların hem yüksek piezoelektrik performansa sahip olmaları amacıyla piezoelektrik katsayısı yüksek olan malzemeler olmasına hem de kilometrelerce uzunluğundaki piezoelektrik liflerin düzgün çekilebilmesi için lif ön kalıbındaki malzemelerin termo-mekanik olarak uyumlu olmasına dikkat edilmiştir (Şekil 25) (Lu vd., 2017).



Şekil 25. Katmanlı piezoelektrik jeneratörlerin tasarımı ve performansı. (a) Elektrospun piezoelektrik mat kullanan lamine bir BTO-PVDF jeneratörünün şeması. (b) Farklı büyütmelerde bir BTO-PVDF matının SEM görüntüleri. Ek, BTO-PVDF nanokompozitinin büyütülmüş bir görüntüsü. (c,d) Katmanlı piezoelektrik jeneratörün bükülmüş ve serbest bırakılmış durumda test edilmesi

Kaynak: Lu vd., (2017)

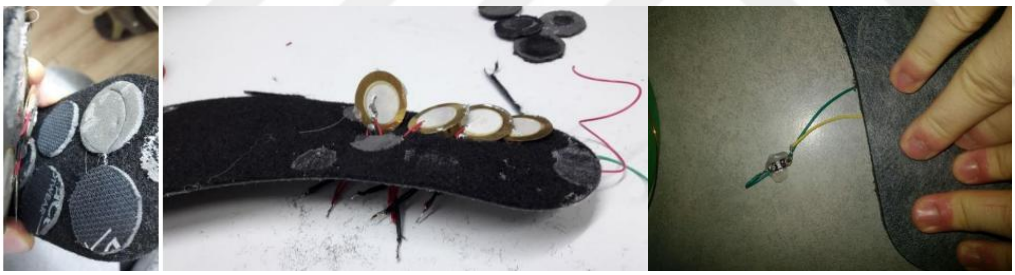
Wang ve arkadaşlarının 2021 senesinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında virüs tespiti için kütle yük sensörleri tasarladılar. Bu yük sensörleri metal çekirdekli piezoelektrik fiber/epoksi matris kompozitlerinin dinamik elektromekanik tepkisini sayısal modelleme yaparak incelemektedir. Kompozitin titreşmesi için bir alternatif akım (AC) elektrik alanı uygulanarak dinamik elektromekanik tepki elde edilmektedir. Kuvars kristallerinin piezoelektrik etkisine dayanan mikro kütle tespiti için yaygın olarak Kuvars kristali mikro terazisi (QCM) kullanılmaktadır. QCM'ler, rezonans frekansının ölçüldüğü bir osilatör devresinin belirleyici unsuru olarak frekans kaymasını kullanmaktadırlar. Bu frekans kaymaları (f), sensörün üst yüzeyine sabitlenen Biyobelirteç antikorlarının daha sonra Antijen antikorlara bağlanarak ve yüzeydeki kütle değişimi (m) ile oluşmaktadır (Şekil 26). Uygulamada kullanılan polimer yapılı kompozitlerlerin hafif, yüksek mukavemetli ve yüksek rijite sahip olmaları esastır çünkü bu özellikler hem piezoelektrik seramiğin yüksek hassasiyetli olmasında hem de kompozitlerin mekanik özelliklerinin daha iyi olmasında etkendir (Wang vd., 2021).



Şekil 26. Piezoelektrik virüs tespit sensörünün çalışmasının şematik gösterimi

Kaynak: Wang vd., (2021)

Gök ve Karagöl 2018 yılında yaptıkları çalışmada ayakkabı tabanına uygulanan piezoelektrik içerikli sensör ile akıllı tekstil uygulaması denemişlerdir. Çalışmanın amacı insanların yürürken kendi elektriklerini üretebilmeleridir. Şekil 27'de gösterilen bu devre Piezoelektrik yapılı malzemelere seri bağlanan bir led ve bağlantı elemanları ile kurulmuştur.



Şekil 27. Ayakkabı tabanına monte edilen piezo lifler ve oluşturulan elektriksel devre

Kaynak: Gök ve Karagöl, (2018)

Tasarlanan sistemden elde edilen gerilim elektrik enerjine dönüştürülerek ledler ile görsel olarak gösterilmiştir. Tasarımda estetik görünüm de ön planda olan unsurlardandır. Çalışmacılar ürünün diğer piyasadaki ürünlerden farkını hem çocuklara hitap etmesi hem de pil vb. gibi herhangi bir depolama ünitesine ihtiyaç duymaması olarak ifade etmişlerdir (Gök ve Karagöl, 2018).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL VE YÖNTEMİ

Bu çalışmada, uygulanan kuvvet ve basıncı elektriksel gerilime çeviren Piezo malzemelerin kıyafetlere dikilmesi ile insanın yürüme, koşma gibi rutin hareketleri sonucunda açığa çıkan gerilim değerleri incelenmiştir.

3.1. Piezo Malzemeden Elektrik ve Sinyal Üretimi

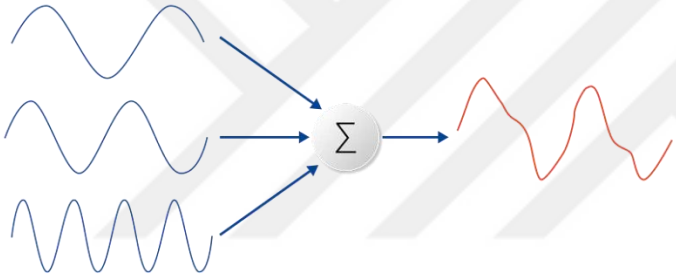
Piezo malzemeler üzerlerine uygulanan basınç veya titreşimlerden elektrik enerjisi üretimi sağlayan yarı iletken malzeme çeşitleridir. Uygulanan basınç veya titreşimler AC gerilim oluşturduğundan elde edilen gerilimi kullanışlı hale getirmek ve doğru akım elde etmek için doğrultucu diyotlar kullanılmaktadır ("Piezoelektrik ile yürürken elektrik üret", 2021).

3.2. Hızlı Fourier Dönüşümde (FFT) Sinyal Anlamlandırma

Evrende meydana gelen titreşim, ses, elektromanyetik dalgalar, sinyaller vb. olaylar dalga fonksiyonu şeklinde oluşur ve çizilirler. Bu dalga fonksiyonları stabil bir genlik ve frekans değerinden ziyade farklı farklı genlik ve frekansa sahip olan çok sayıdaki sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşmaktadır. Zaman uzayında oluşan bu dalga fonksiyonlarını karmaşık yapılarından dolayı zaman uzayında incelemek oldukça zordur. Bu yüzden oluşan dalga fonksiyonlarını daha iyi inceleyebilmek için zaman uzayından frekans uzayına dönüştürmek gerekir. Bu dönüşüm FFT (Fast Fourier Transform-Hızlı Fourier Dönüşüm) olarak isimlendirilir. Kısaca FFT, çeşitli dalga fonksiyonlarını matematiksel veriler kullanarak kendilerini meydana getiren sinüs dalga boyuna çeviren bir fonksiyondur. FFT yöntemi ile bir dalga fonksiyonu temel yapı bileşenlerine bölünerek bu dalga fonksiyonunun detaylı olarak farklı açılardan incelenmesi sağlanmaktadır ("Adams Postprocessor – fast Fourier transform (FFT)", t.y.).

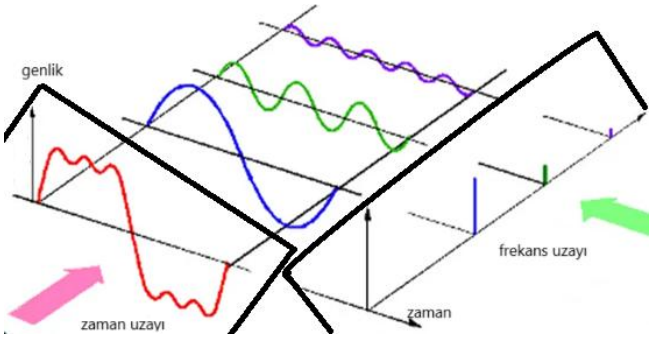
Kısaca FFT herhangi bir dalga sinyalini zaman uzayından frekans uzayına veya tersine frekans uzayından birçok dalga sinyalini birleştirip kendini oluşturan sinüs fonksiyonuna dönüştürebilen bir algoritmadır. Bu özellik FFT'nin farklı uygulamalarda kullanılmasının önünü açmıştır. Bir dalga sinyalinin oluştuğu frekans bileşenlerini değerlendirebilmek o sinyalin davranış ve tabiatı hakkında kıymetli bilgilere ulaşmaya imkân vermektedir ("FFT fast Fourier transform", t.y.).

Şekil 28'de üç farklı faz ve genlikteki sinyaller tek bir sinyal şeklinde ifade edilmektedir. İşte Fourier dönüşümü ile bu gibi karmaşık ve bileşik halindeki sinyaller stabil bir genlik ve faza sahip sinyallere ayrıştırılmaktadır.



Şekil 28. Farklı faz ve genlikteki sinyallerden oluşan bileşik sinyal gösterimi
Kaynak: "FFT fast Fourier transform", (t.y.)

Şekil 29'da ise zaman uzayında yer alan bir dalga sinyalinin ayrıştırılarak frekans boyutunda tanımlanması gösterilmektedir.



Şekil 29. Zaman uzayından frekans uzayına ayrıştırılmış bir bileşik dalga

Kaynak: "Signal processing basics", (2024)

3.2.1 Fourier Dönüşüm Denklemi

Fourier dönüşümü, bir sinyalin zaman uzayındaki gösterimine karşılık frekans uzayındaki temsiline dönüştüren matematiksel bir ifadedir. Böylece frekansın hangi sinyal bileşenlerinden oluştuğu belirlenebilir işaretin dahili yapısı anlaşılabilir. Fourier dönüşümü ile zaman uzayındaki dalgalanmaların hangi frekanslarda seyreldiği hangi frekanslarda yoğunlaştığı bulunur ve görselleştirilir. Bir sinyal çeşitli frekanslardaki bileşenlerine ayrılarak her bir frekansın sinyal içinde kaç defa yer aldığı elde edilir. Bu ise zaman uzayındaki sinyallerin daha soyut fakat daha güçlü bir temsiline imkân vermektedir ("Fourier dönüşümü ve frekans uzayı", 2019).

Zaman uzayındaki bir sinyalin Fourier dönüşümü denklem 3.1 ile tanımlanmaktadır.

x(t); sinyalin zaman uzayındaki karşılığı

j; karmaşık birim (j=-1)

$e^{-j2\pi ft}$: Kompleks üstel fonksiyonu yani sinüzoidal bileşenleri

f; frekans (Hz)

X(f); sinyalin frekans temsilindeki karşılığını (Fourier Dönüşümü) göstermek üzere:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\, e^{-j2\pi f t}\, dt \qquad (3.1)$$

Ters Fourier Dönüşümünde ise frekans uzayındaki ayrıştırılmış sinyal birleştirilerek zaman uzayındaki durumuna getirilir.

Zaman uzayından frekans uzayına dönüştürülen bir sinüs dalgası, bir noktada birikmiş düz bir çizgi olarak temsil edilmekte olup dalganın karmaşıklaşmasıyla (frekans çeşitliliğinin artmasıyla) birlikte sinyalin frekans uzayındaki gösterimi de birden fazla çizgiler içerecek biçime dönüşmektedir.

Sinyallerin değişimleri, frekans uzayında gösterilirken sahip oldukları dalga boylarına göre alçak frekanslı ve yüksek frekanslı olarak ifade edilebilmektedir. Alçak frekanstan kasıt, sinyallerin uzun dalga boyuna sahip yavaş değişimler izlenen hareketlerden oluştuğu yüksek frekanstan kasıt ise sinyallerin kısa dalga boylu ve hızlı değişimler gösteren bir aktiflikte olduğudur. Örneğin bir müzik eserinde tiz notalar yüksek frekans, bas notalar düşük frekans ile belirtilir.

Fourier Dönüşümü iletişim ve haberleşme sistemleri, elektronik devre analizleri, dalga hareketi ve titreşim analizleri, ısı yayılımı görselleştirme, tıbbi cihaz sinyallerini işleme (MRI, EEG cihazları vb.), fotoğrafçılık ve kayıt (dijital foto sıkıştırma-JPG dosyaları), ses kayıtlarını sıkıştırma (MP3 kayıtları), gürültü azaltma gibi çok çeşitli teknik alan ve işlerde kullanılmaktadır. Fotoğraf ve ses sıkıştırmada genel ses ve görüntü düzenini bozmayacak şekilde duyma eşiğimiz dışındaki frekanslarda yer alan sesler ile çok yüksek frekanslı görüntü pikselleri kayıtlardan çıkarılarak daha küçük boyutta fakat ana kaynaktan farkı neredeyse hiç anlaşılmayan ses ve görüntü kayıtları elde edilmektedir ("Fourier dönüşümü: internette müzik ve fotoğraf paylaşımını mümkün kılan matematik!", 2019).

FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü), Fourier dönüşümünün spesifik bir durumu olup aşağıda belirtilen şekilde formüle edilmektedir.

N örnek sayısı, i karekök (-1) değeri, k sırası gelen frekans elemanı, n işlenecek olan sıradaki örneğin indisi, x örneklenen sinyal verisi olmak üzere;

$$\sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-i(\frac{2\pi kn}{N})} \tag{3.2}$$

$$e^{ix} = cosx+isinx \tag{3.3}$$

$$e^{ix}=1+\frac{ix}{1!}+\frac{(ix)^2}{2!}+\frac{(ix)^3}{3!}+\cdots.+\frac{(ix)^n}{n!}$$ *(i'lerin değeri yazılırsa* (3.4)

i^2=-1, i^3=-i, ve i^4=1)

$$e^{ix}=1+i\frac{x}{1!}(-)\frac{x^2}{2!}(-)i\frac{x^3}{3!}+\frac{x^4}{4!}(-)\ldots..\frac{x^n}{n!}$$ *→(artı ve eksi değerler toplanırsa)* (3.5a)

$$e^{ix}=1\left[(-)\frac{x^2}{2!}+\frac{x^4}{4!}(-)\frac{x^6}{6!}\ldots.\right]+i\left[x(-)\frac{x^3}{3!}+\frac{x^5}{5!}(-)\frac{x^7}{7!}\ldots\right] \tag{3.5b}$$

$$= cosx - isinx \tag{3.6}$$

3.6'daki eşitlikte elde edilen ifade, FFT de yerine yazılırsa sanal ve gerçel kısımlı aşağıdaki eşitlik 3.7 elde edilir.

$$\left.\begin{aligned} &Gerçel\ X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]cos^{(\frac{2\pi kn}{N})} \\ &Sanal\ X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n](-sin^{(\frac{2\pi kn}{N})}) \end{aligned}\right\} \tag{3.7}$$

Eşitlik 3.7.'deki değerlerin sanal ortamda bir vektörü temsil ettiğinden ve bu değerlerden bir frekans değeri elde edilmek istendiğinde vektörel boy hesabı kullanılarak 3.8'deki eşitlik elde edilir ve X_k değeri, frekansta dalgalanmalar olduğunda her zaman pozitiftir.

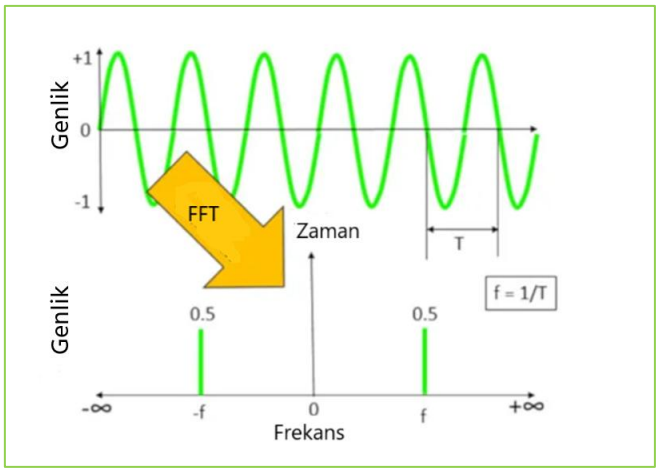
$$X_k = \sqrt{(\text{Gerçel } X_k)^2 + (\text{Sanal } X_k)^2} \quad (3.8)$$

Örnekleme Oranı

Eşitliklerde gerçek frekans değeri; frekans çözünürlüğü ile k'nın çarpımı sonucu bulunur. X_k değerinin, frekansta dalgalanmalar olduğunda her zaman pozitif olduğu ve frekans çözünürlüğünün (F), örnekleme frekansı (SR) ile örnek sayısı (N) arasındaki oran olduğu göz önüne alındığında aşağıdaki 3.9 'daki eşitlik elde edilir ("Hızlı fourier dönüşümü ve frekans ölçme", t.y.**)**.

$$F = \frac{kSR}{N} \quad (3.9)$$

Zaman tabanında yer alan pozitif ve negatif yönlü sinyaller FFT analizlerinde karşılık bulurken, (genlik değeri sabit 0 Hz hariç) hem (+) hem (-) şekilde çift taraflı bir spekturumda oluşurlar ve bu spekturmun genliği zaman alanındaki pozitif ve/veya negatif tepe genliğinin yarısıdır (şekil 30). Ancak FFT analiz tablolarında negatif frekans spekturumu gösterilmediğinden, Dijital veri sistemlerinde FFT analizleri kullanılırken pozitif tepe noktasının iki katı alınır ("Hızlı Fourier Donüşümü (FFT — Fast Fourier Transform" , 2023).



Şekil 30. Frekans alanında sinüzodial dalganın (+) ve (-) genlik gösterimi

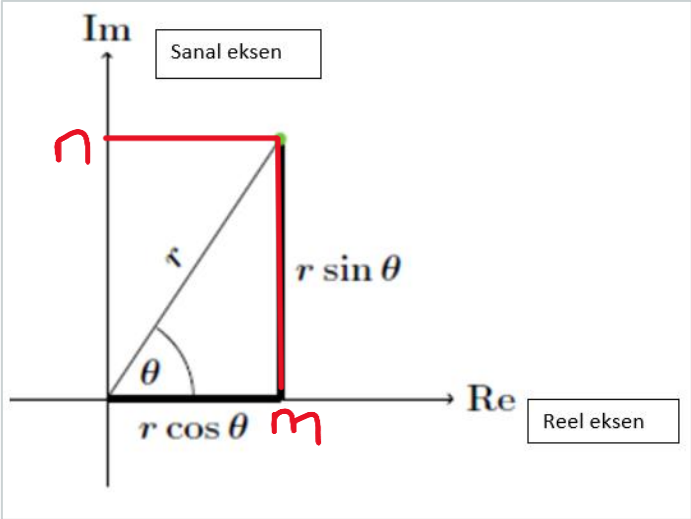
Kaynak: "Hızlı fourier dönüşümü (FFT — Fast fourier transform)", (2023)

Bu yüzden denklem 3.9'de örnekleme sayısının, frekansın en yüksek değerinin 2 katından daha az sayıda olamayacağına dikkat edilmelidir. Çünkü bu durumda örnekleme frekansının yarısını geçen değerler sinyal gösteriminde yer alamaz. Bu genellemeye göre denklem 3.9, denklem 3.10 formuna dönüşür ("Hızlı fourier dönüşümü ve frekans ölçme", t.y.).

$$F = \frac{N*SR}{2*N} = \frac{SR}{2} \tag{3.10}$$

3.2.2. FFT'de Genlik (Amplitude) ve Faz (Phase) Değerleri

Hızlı Fourier dönüşümünde elde edilen frekans, faz ve genlik kavramları aslında denklem 3.1'deki sonuç çıktılarında yer alan karmaşık sayısının gerçel ve sanal kısımlarından karşılık bulmaktadır. Örneğin m+ni şeklindeki bir karmaşık sayının X-Y doğrusal bir karmaşık düzlemde gösterimi şekil 31'de belirtilmekte olup burada genlik değeri 'r' yani hipotenüs uzunluğu iken faz değeri karmaşık sayının yatay düzlemle yaptığı θ açısıdır.



Şekil 31. Karmaşık sayı düzlemi; genlik ve faz kavramı gösterimi

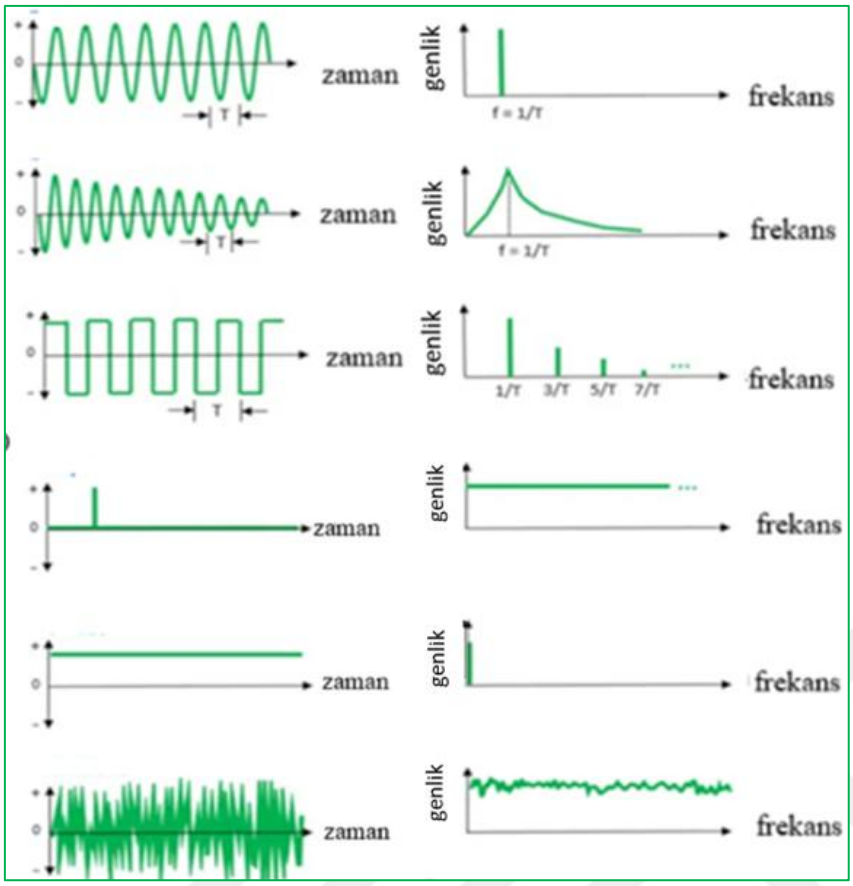
Burada genlik değeri (r) ile faz değeri (θ); matematiksel olarak denklem (3.11) ve denklem (3.12) ile gösterilen ifadeye eşittir.

$$r = \sqrt{m^2 + n^2} \tag{3.11}$$

n=r sin θ; m=r cos θ olmak üzere

$$\theta = tan - 1\ (n/m) \tag{3.12}$$

Şekil 32'de FFT dönüşümü uygulanan zaman tabanındaki farklı tip sinyallerin frekans tabanındaki genlik (amplitude) değerleri gösterilmiştir. Sinüs dalgası (sine wave) tek frekans, tek faz ve bir genlik şeklinde iken genliği değişken sinüs dalgası (damped transient) bir frekans çevresinde tepe oluşması şeklindedir ve bu oluşan tepe, dalganın değişkenliğine göre daha geniş hal almaktadır. Kare dalga (square wave) sabit ölçeklerde azalan tek sayılı harmoni biçimli genlik göstermektedir. İtme, basınç ve darbe gibi anlık uyarılar (impulse) FFT dönüşümünde frekans ekseni boyunca sabit bir genlik şeklinde görüntülenmektedir. Genliği zaman düzleminde sıfır olan sinyalin (offset), frekans ekseninde değeri bulunmamaktadır çünkü FFT dönüşümünde sinyal genliği 0 hertz'dir ve bu durum DC sinyallerinin özelliğidir. Değişken yapılı (random) sinyaller ise FFT dönüşümünde geniş, bir dağılımlı genlik değeri göstermektedir ("Hızlı fourier dönüşümü ve frekans ölçme", t.y.**)**.



Şekil 32. Zaman düzleminde farklı dalga boylarının frekans eksenindeki genlikleri
Kaynak: "Hızlı fourier dönüşümü ve frekans ölçme", (t.y.)

3.2.3. FFT'de RMS Değeri ve Mutlak Ortalama

FFT'de spektral çizgilerin, farklı sinüzoidleri temsil ettiği görüşüne binayen sinyalin pozitif genliği Tepe (peak-pk) değeri ile sinyalin ortalama karekök değeri (RMS) yani RMS genliği aşağıdaki şekilde ilişkilendirilir ("FFT analysis (fast fourier transform): the ultimate guide to frequency analysis", 2023).

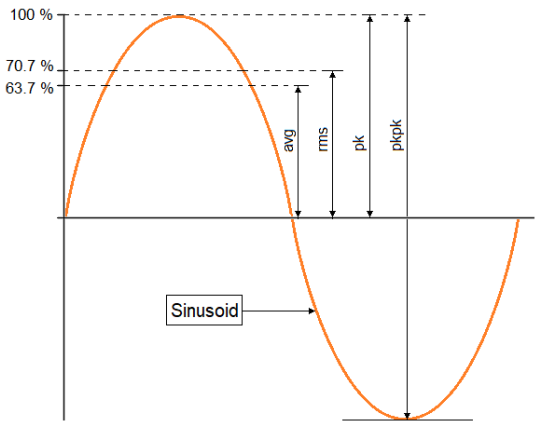
$$rms = \frac{1}{\sqrt{2}} peak \tag{3.13}$$

Pozitif ve negatif tepe değerleri (pk-pk)'nin mutlak değerinin pozitif pk değerinin iki katı olduğu göz önüne alındığında, dalga hareketindeki mutlak değerlerin hepsinin

ortalaması olan mutlak ortalama |avr| ile tepe değerleri arasında şu ilişki (denklem 3.14) mevcuttur. RMS ile mutlak değer ifadelerinin bir dalga sinyali üzerinde gösterimi şekil 33'de verilmiştir ("FFT analysis (fast fourier transform): the ultimate guide to frequency analysis", 2023).

(pk-pk=2pk olmak üzere)

$$|avg| = \frac{2}{\pi} pk \tag{3.14}$$



Şekil 33. Bir dalga sinozoidinde RMS ve AVG değerlerinin gösterimi
Kaynak: "FFT analysis (fast fourier transform): the ultimate guide to frequency analysis", (2023)

3.2.4. FFT'de Sinyal Filtreleme

FFT filtrelemede amaç bazı frekans bileşenlerini zayıflatmak ya da bazı bileşenleri farklı katsayılarla yeniden düzenlemek veya gürültüyü azaltarak, sinyal denetimini gerçekleştirmektir.

Yapılan uygulama sinyalleri anlamlandırma, yani ölçümü yapılmak istenen sinyalden farklı parazitlerin temizlenmesi işlemidir. Bu temizleme farklı filtreleme teknikleri ile gerçekleştirilir. Bu filtreler yapım elemanlarına ve çalışma prensiplerine göre sınıflandırılabilmektedir. Yapım elemanlarına göre pasif filtre ve aktif filtre olarak ikiye

ayrılmaktadır. Kondansatör, bobin ve direnç gibi devre elemanlarını içeren elektronik devrelere pasif filtre uygulanırken, bu gibi temel elektronik devre elemanlarının yanı sıra mikroişlemci, op-amp ya da güç kaynağı bulunan devreler içinse aktif filtreler kullanılmaktadır ("Elektronik filtreler", 2020).

Çalışma prensibine Band geçirgen (band pass), band blok (band block), yüksek geçiren (high-pass), alçak geçiren (low-pass), eşik ve alçak geçiren parabolik (threshold and low-pass parabolic) şeklinde farklı filtre türleri, FFT sinyallerinin incelenmesinde kullanılmaktadır ("FFT filter", t.y.).

FFT analizörlerinin hepsi her filtre tipini desteklemeyebilir. Büyük çoğunluk akustik ağırlıklandırma gibi genel filtreleri desteklerden bazı analizörler daha spesifik filtreleri de desteklemektedir. Kullanılan filtre çeşidi ve kullanılan analizöre göre filtrelerin sinyalleri işlemesi değişmektedir bir kısmı FFT hesaplamasından önce zaman sinyallerini filtreler, bir kısmı ise sinyalleri hesaplama sonrasında filtrelemektedir ("FFT analysis (fast fourier transform): the ultimate guide to frequency analysis", 2023).

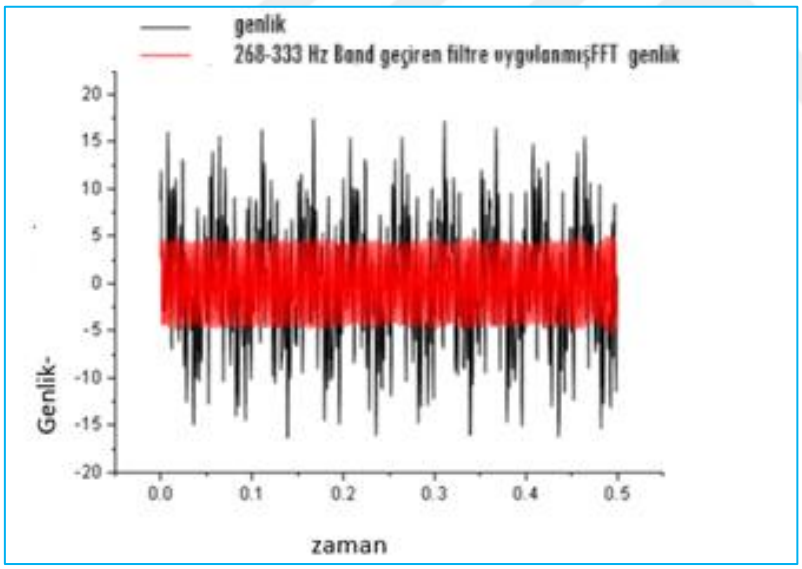
Alçak Geçiren ve Yüksek Geçiren Filtreler

Bir sinyalin istenmeyen ve fc kesme noktasından yüksek olan frekanslarının geçişini durduran veya tasarım isteğine bağlı değiştirebilen filtreler alçak geçiren filtrelerdir. Pasif RC (direnç- kapasitör) filtreleri genellikle 100kHz kadar olan sinyal geçişine izin vermekte olup daha yüksek kapasite için RLC (direnç, endüktör,kapasitör) devresinden elde edilen filtreler kullanılırlar. Pasif dirençli filtrelerde transistör, op-amp vb devre elemanları bulunmadığından sinyal kazancı olmaz bu yüzden girişteki sinyale göre daha düşük çıkış sinyali elde edilmektedir. Tersi durumda fc kesme noktasından düşük olan frekanslarının geçişini durduran veya tasarım isteğine bağlı değiştirebilen filtreler yüksek geçiren filtrelerdir. Bu tip filtre devrelerinde gerilim belli bir düzeye ulaşana kadar tüm sinyal geçişleri engellenir ("Passive high pass filter" t.y.)

Band Geçiren (Band Pass) Filtreler

Band geçiren filtreleme ise belli bir frekans altındaki ve belli bir frekans üstündeki sinyallerin filtrelenmesi ara değerlerin alınması esasına dayanmaktadır. (Bant durduran filtre de tersi prensiple belli bir frekans aralındaki sinyalleri bastırma izole etme esasına göre çalışmaktadır.)

Band geçiren filtreler, analizde kullanılan örneklem grubundaki verilerin alt ve üst frekans limitleri dışında olanları engelleme temelinde olup bu filtreler aslında pasif bir alçak geçiren ve bir yüksek geçiren filtrenin kombinasyonuna dayanmaktadır. Şekil 34'de alt kesme değeri 268Hz, üst kesme değeri 333Hz olan bir band geçiren filtresi kullanılan bir sinyalin FFT analiz edilecek değerleri kırmızı renkte gösterilmektedir.



Şekil 34. Band geçiren (band pass) filtresi uygulanan bir sinyal
Kaynak: "FFT filter", (t.y.)

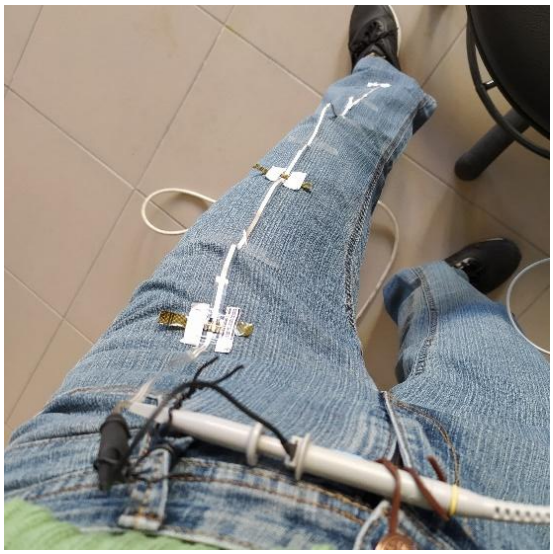
3.3. Deneysel Düzenek

Çalışmamızda kullandığımız deney düzeneğinde, Farnel firmasından temin edilen Piezo şerit, piezo şeriti monte ettiğimiz kot pantolon, iletim kabloları, osiloskop, diyot ve

kapasitör kullanılmış olup insan hareketi esnasında oluşan gerilim osiloskoptan belli zaman periyotlarında kaydedilmiştir. Kaydedilen değerler Orijin programında analiz edilmiş FFT'leri hesaplanmıştır. İkinci aşama da ise piezo şeridin ucuna bir doğrultucu ve elde edilen DC gerilimi depolamak için bir kapasitör bağlanmış ve bulunan gerilim değeri analiz edilmiştir. Deneyde kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

3.3.1. Kumaş

Çalışmada %100 pamuklu standart bir kot pantolon kullanılmış. Pantolonun bir paçasına kemer hizasının altından paçanın yaklaşık 5-6 cm yukarısına denk gelecek şekilde boydan boya piezo şerit birkaç noktasından sabitlenerek dikilmiştir. Şerit ucundaki iletim noktalarına bağlanmış ve probun hareket esnasında kaymasını ve piezo üzerinde fazla çekme kuvveti oluşturmasını önlemek amacıyla pantolon kemerine sabitlenmeye çalışılmıştır. Amaç her adım atışta kumaşın hareketine bağlı olarak oluşan ve piezo şerit tarafından algılanan hareket sinyallerini (gerilimi) elde etmektir (şekil 35).



Şekil 35. Çalışmada kullanılan kumaş ve piezo şerit

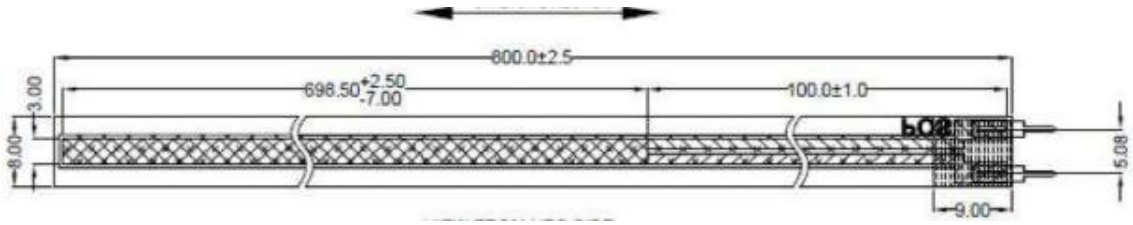
3.3.2. Piezo şerit

Çalışmada kullanılan Piezo şerit Farnell (USA) firmasından temin edilmiştir. Şekil 36 ve Şekil 37'de yer alan ve yaklaşık 80 cm uzunluğunda 0,8 cm eninde olan şeridin bir ucunda (+) ve (-) uçlara bağlanmayı sağlayan 2 adet konnektör bulunmaktadır. Tablo 1'de piezo şeride ait teknik özellikler belirtilmiştir.

Çalışmada Osiloskop probuyla, piezo şeritte oluşan gerilim osiloskopa iletilmiş ve ekranda oluşan gerilimler dijital olarak standart bir USB diske kaydedilmiştir.

Şekil 36. Piezo Şerit

Kaynak: Farnell, (2019)



Şekil 37: Piezo şerit ölçüleri

Kaynak: Farnell, (2019)

Tablo 1

Piezo şerit özellikleri

Parametre	Min.	Tip	Mak.	Birim/
Tüm Uzunluk	797.5	800.0	802.5	mm, (lehim tırnakları hariç)
Tüm Genişlik	7.7	8.0	8.3	mm
Aktif Elektrot uzunluğu	691.5	698.5	701.0	mm
Aktif Elektrot genişliği	2.7	3.0	3.3	mm
Kapasitans	5.4	7.3	9.3	nF@1k Hz
Dağılma Faktörü	-	0.02	0.03	@1k Hz
Gerilim Hassasiyeti (V)	-	0.015	-	V/με
Gerilim Hassasiyeti (Q)	-	110	-	pC /με
Temel Film Kalınlığı	27	30	33	μm
Akma Gerilimi	45	-	-	MPa (uzatma yönü)

Kaynak: Farnell, (2019)

Şeridin farklı hareketlere maruz kaldığında oluşturduğu gerilim düzeyleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2

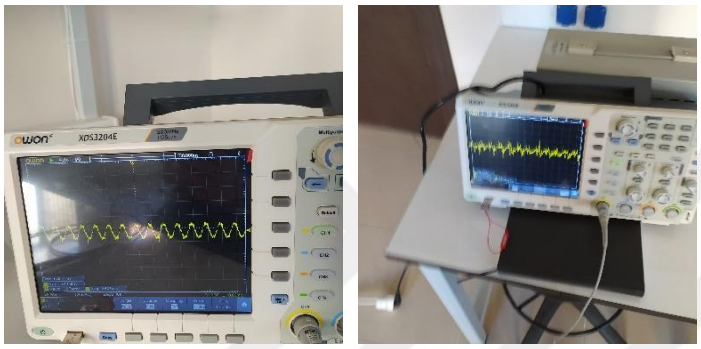
Şeridin tipik yanıt değerleri

0.1 Hz data	Q p-p	V p-p OC
Nabız	0.5-1 nC	75-150 mV
Nefes Alıp Verme (Solunum)	2-7 nC	0.3-1 V
Hareket	100-500 nC	10-70 V

Kaynak: Farnell, (2019)

3.3.3. Osiloskop

Çalışmada Owon markanın XDS3204E model Osiloskopu kullanılmıştır. Ölçümler osiloskop çözünürlük ayarları 2V 500 mikro saniye (µs)'de yürüyüş ve koşu hali, 2V 200µs'de yürüyüş halinde ölçülmüş ve 4. Bölümde belirtilen analiz değerleri ve sonuçları bulunmuştur. Kayıt süresi cihaza bağlı olarak maksimum değer olan 10 sn üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 38).



Şekil 38. Osiloskop

Osiloskop Probu

Piezo şeritte oluşan gerilimi osiloskopa ileten standart bir prob kullanılmıştır.

3.3.4. AC Elektrik Doğrultucu Devre

AC doğrultucu devreler, elde edilen alternatif akımı doğru akıma çevirmek amacıyla kullanılırlar. Bu devrelerde AC akımda elde edilen pozitif ve negatif akım değerlerinin tek yönlü (hepsi pozitif veya hepsi negatif) olarak çıkış bağlantı noktasına gelmesi sağlanır.

Çalışmada AC gerilimi, DC gerilime çevirmek için standart 1 Amperlik köprü diyot kullanılmıştır. Piezo şeridin iki yük ucu köprü diyotun (-) ve (+) uçlarına bağlanırken, elde edilen DC gerilimi depolamak amacıyla bir kapasitör kullanılmıştır.

3.3.5. Elektrik Depolama Birimi

Üretilen gerilimin direkt kullanılmayacağı durumlarda sıklıkla tercih edilen depolama birimlerinden birisi kondansatörlerdir (sığaçlar-kapasitörler). Kondansatörler, iki iletken plaka arasına yalıtkan bir madde koyulması ve uygulanan gerilime bağlı olarak elektrik enerjisini elektrik alan depolanmasını sağlayan devre elemanlarıdır. Kapasitörler 'C' ile gösterilirler ve birimi Farad (F)'tır. Doğru akım (DC) yerine alternatif akımı (AC) iletme özelliğine sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde çoğu devrede farklı amaçlar ile kullanılırlar. Güç kaynağı devrelerinde filtrelemede, rezonans devrelerinde istenilen frekansı üretmede ve güç aktarım hatlarında gerilim düzenlenmesi ve güç akışının kontrolünde sinyal işleme ve frekans filtreleme gibi işlemlerde kullanılırlar. Biz de çalışmamızda piezo malzemeden AC olarak elde ettiğimiz gerilimi DC boyuta çevirmek amacıyla 12 nano farad bir kapasitör kullanılmış ve bulunan DC akımı ile AC akım farkları incelenmiştir.

3.3.6. Dijital Sinyal İşleme

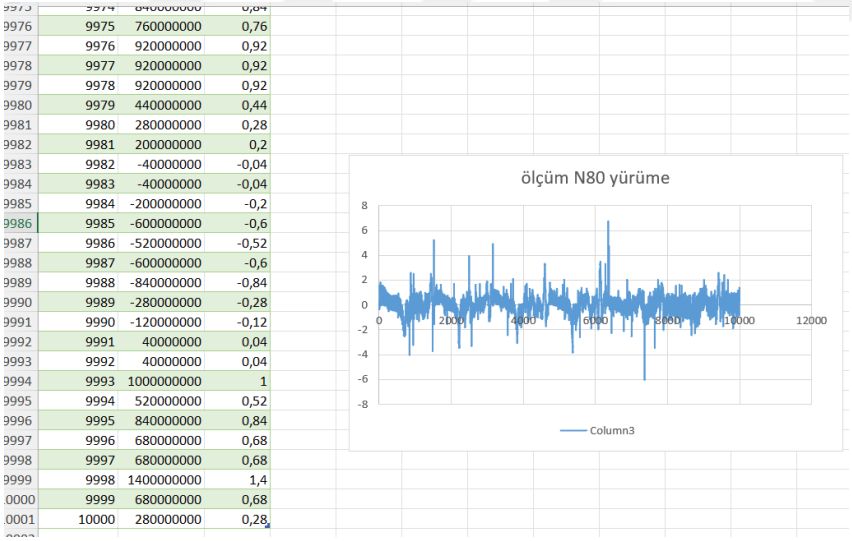
Gerilim, kuvvet, ısı, basınç, ışık, direnç, frekans yol gibi kavramlar elektronik sistemleri içinde analog büyüklük olup sonsuz değerler alabilmektedirler. Digital sistemler ise 0 (sıfır) ve 1(bir) rakamları ile kodlanan ikilik kodlara dönüştürülmüş verileri kullanmaktadırlar.

Çalışmada analog olarak elde ettiğimiz gerilimler, Orijin programı ve FFT analizleri ile programın arka belleğinde dijital olarak işlenmekte, elde edilen değerler frekans uzayında sayısal verilere dönüştürülmektedir.

3.4. Deney Uygulaması

Deneysel çalışmamız iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

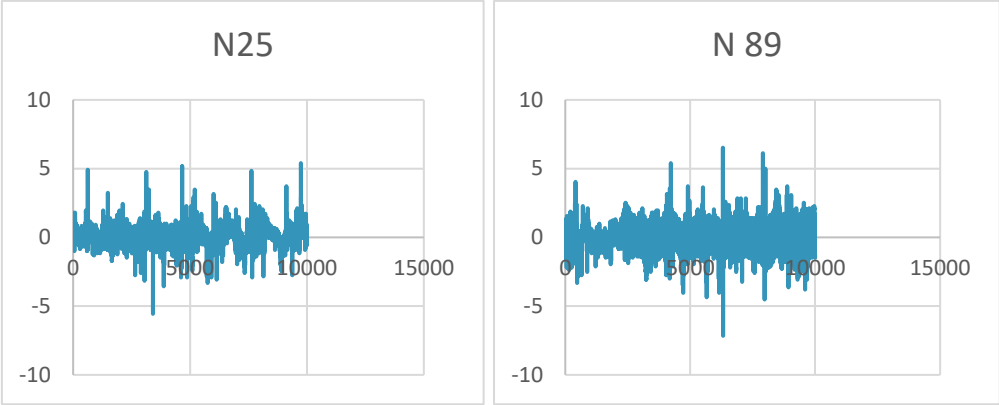
Birinci kısımda standart bir kot pantolon üzerine sol paça boyunca paçanın biraz üstünden (şekil 35) cep ağzı hizasına kadar piezo şerit monte edilerek piezo şeridin iletken uçlarına osiloskop probu bağlanmış, 500 ve 200 mikro saniye (µs) çözünürlükte elde edilen analog veriler harici disk vasıtasıyla kaydedilmiş ve bilgisayara aktarılmıştır. Farklı mikro saniye ayarlamaları anolog gerilimlerin çözünürlük değerlerinde etkili olmakta ve osiloskop ekranında anolog gerilimlerin geçiş hızını belirlemektedir. Ölçümler Osiloskopun kapasitesine bağlı olarak maksimum 10'ar saniye ölçülmüş ve bu 10 saniye osiloskop tarafından 10000 veri aralığına bölünerek sayısal değerlere çevrilmektedir (şekil 39). 500 µs ve 200 mikro µs çözünürlük ayarlarında iki kişi tarafından yürüme ve koşu eylemleri gerçekleştirilmiştir.



9976	9975	760000000	0,76
9977	9976	920000000	0,92
9978	9977	920000000	0,92
9979	9978	920000000	0,92
9980	9979	440000000	0,44
9981	9980	280000000	0,28
9982	9981	200000000	0,2
9983	9982	-40000000	-0,04
9984	9983	-40000000	-0,04
9985	9984	-200000000	-0,2
9986	9985	-600000000	-0,6
9987	9986	-520000000	-0,52
9988	9987	-600000000	-0,6
9989	9988	-840000000	-0,84
9990	9989	-280000000	-0,28
9991	9990	-120000000	-0,12
9992	9991	40000000	0,04
9993	9992	40000000	0,04
9994	9993	1000000000	1
9995	9994	520000000	0,52
9996	9995	840000000	0,84
9997	9996	680000000	0,68
9998	9997	680000000	0,68
9999	9998	1400000000	1,4
.0000	9999	680000000	0,68
.0001	10000	280000000	0,28

Şekil 39. 10 sn'lik herhangi bir yürüyüş sinyalinin genlik/frekans grafiği

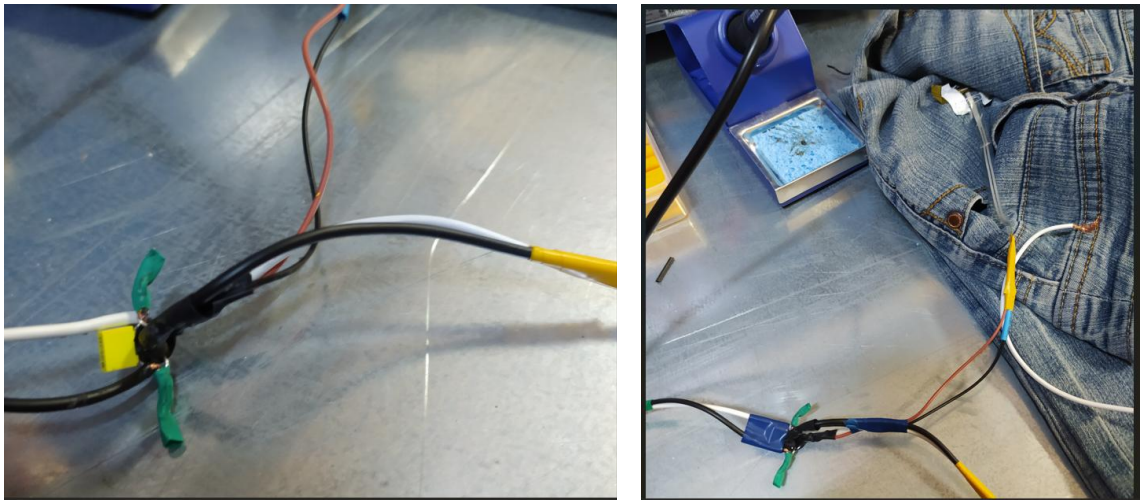
Her kişinin 10 sn lik 100 farklı kayıt verisi, önce excell programında frekans/genlik grafiklerine dönüştürülerek kabaca sinyalin temizliği (ses vb. dış etkilerden ne kadar etkilenmiş) incelenmiş olabildiğince şekil 40'da gösterilen N89 verisi gibi daha parazitli veriler ayıklanmıştır.



Şekil 40. Genlik sinyallerinin basit grafiksel gösterimi

Daha sonra iki kişinin (N ve M) görece daha az parazit karışan 500 µs çözünürlükteki yürüyüş ve koşu, 200 µs çözünürlükteki yürüyüş verileri arasından rastgele seçimler yapılmış ve verilerin FFT analizlerine bakılmıştır

Deneyin 2. Aşamasında ise şekil 41'de gösterildiği şekilde piezo şeridin iletken uçlarına lehimleme işlemi ile kablo eklenerek şerit diyot bağlanabilecek duruma getirilmiştir. Kablo uçlarına 1 mili amperlik (mA) diyot bağlanmış diyotun DC çıkış uçlarına 12 nano faradlık bir kapasitör bağlanmıştır. Bu işlemde diyot AC gerilimi DC gerilime dönüştürme, kapasitör ise gerilimlerin daha pürüzsüz ve düzgün değerlerde okunmasını sağlamak için yapılmıştır. Çünkü kapasitörler, devrelerde filtreleme görevi de üstlenmektedirler.



Şekil 41. Piezo şeride diyot ve kapasitör bağlanmış hali

Deneyin ikinci aşamasında bir kişinin yürüyüş hareketi kayıtları önce AC uçlarından sonra DC uçlarından osiloskopa iletilen gerilim değerleri ile yeniden analiz edilmiştir.

Deneyin her iki aşamasında elde edilen bulgular dördüncü bölümde yer almaktadır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmanın ilk aşamasında farklı kişilerin yürüyüş ve koşma hareketleri sonucu ortaya çıkan gerilim değerleri hareket analizi bağlamında incelenmiştir. İkinci aşamada ise piezo şeride bir kapasitör ve diyot köprüsü bağlanarak DC gerilim elde edilmiş ve bu gerilimin değeri ölçülerek bir depolama yapılmak istense teoride ne kadar bir güç elde edilebilir bunun sonucu değerlendirilmiştir.

Aşağıda farklı aşamalarda elde edilen değerler yer almaktadır.

4.1. Deneyin Birinci Aşaması

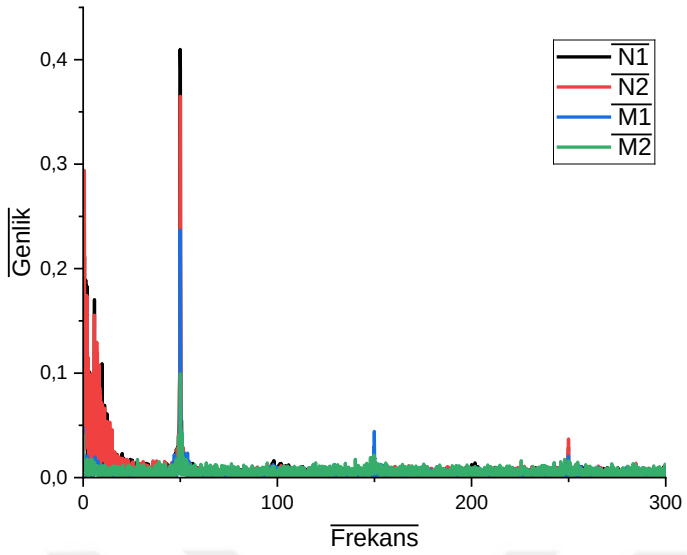
Osiloskopun ayarlarından zaman çözünürlüğü 500 µs ve 200 µs'ye getirilerek kişilerin 500 µs çözünürlüklü osiloskop değerleri için yürüme ve koşma hareketi incelenmiş Daha sonra çözünürlük değeri 200 µs getirilerek kişilerin yürüme hareketi tekrardan incelenmiştir. Deneyin ilk aşamasındaki FFT analizleri sonucunda yürüme ve koşma örnekleri için aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

4.1.1. Aynı Zaman Çözünürlük Değerinde Yürüme ve Koşma Bulguları

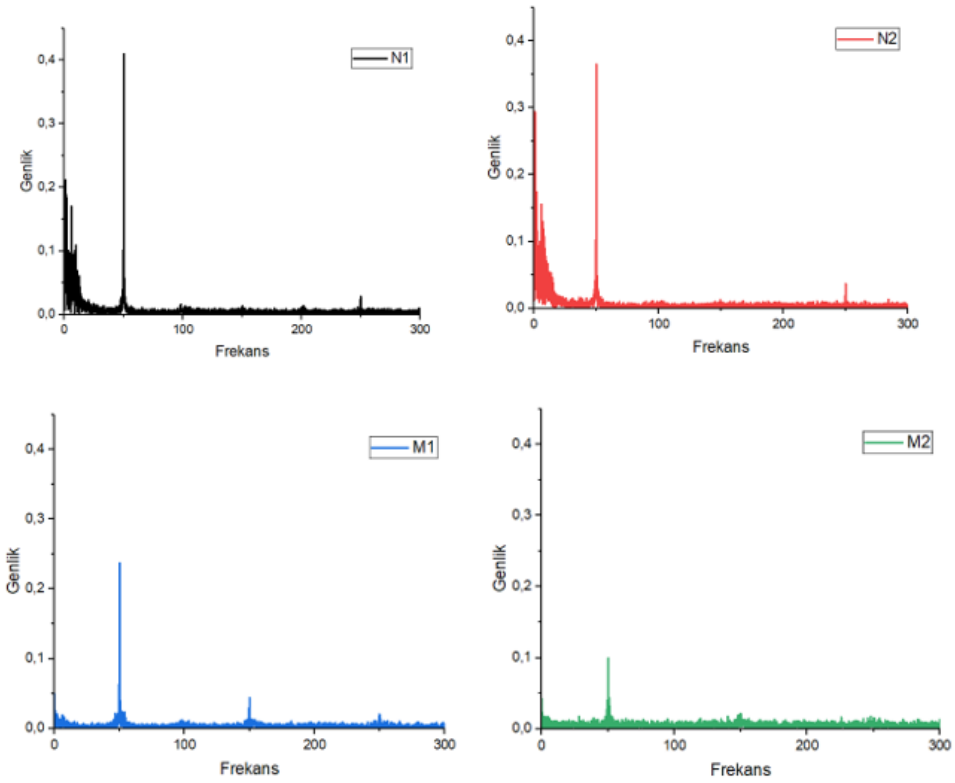
Yürüme Analizleri (Zaman Çözünürlüğü: 500 µs)

N ve M kişilerinin aynı mekânda 500 µs'lik zaman çözünürlüğü ayarında yapılan yürüme sonucunda elde edilen FFT-genlik grafikleri Şekil 42'de yer almaktadır. Şekil 43'de ise iki kişinin bu hareket genliklerinin grafikleri ayrıntılı halde sunulmuştur.

Genlik grafikleri incelendiğinde 2 kişinin de 50 Hz'lik frekansta bir doğal salınım yaşadıkları görülmekte N kişisine göre M kişisinin daha harmonik hareket yeteneğinin olduğu söylenebilir.

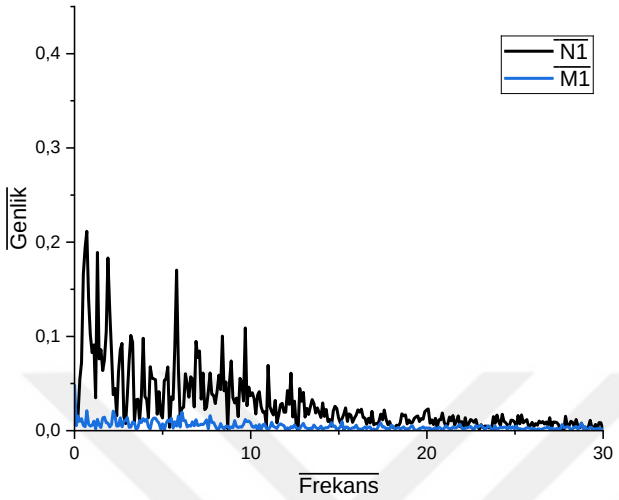


Şekil 42. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları



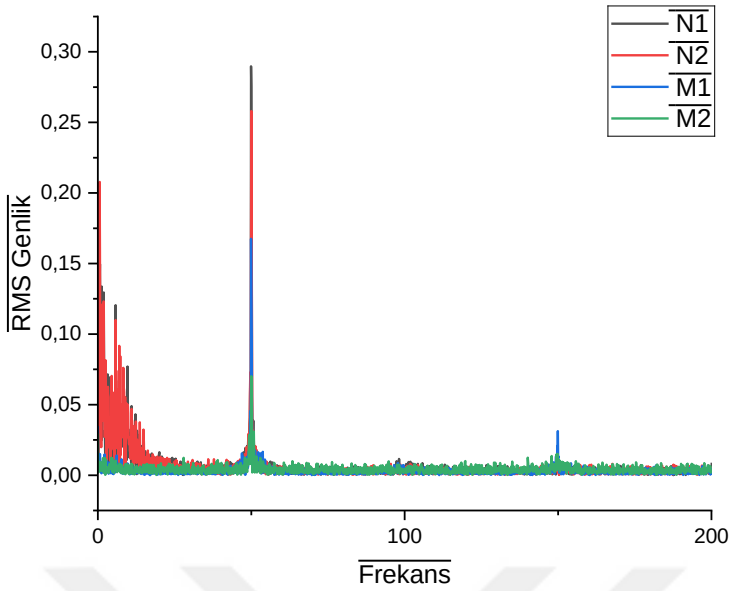
Şekil 43. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları (ayrı)

Aşağıdaki şekil 44'de yer alan grafiklerde ise N ve M kişilerinin şekil 43'de yer alan ilk yürüme formlarına ait yürüyüşlerin 0-30 Hz arası detaylı olarak sunulmuştur.



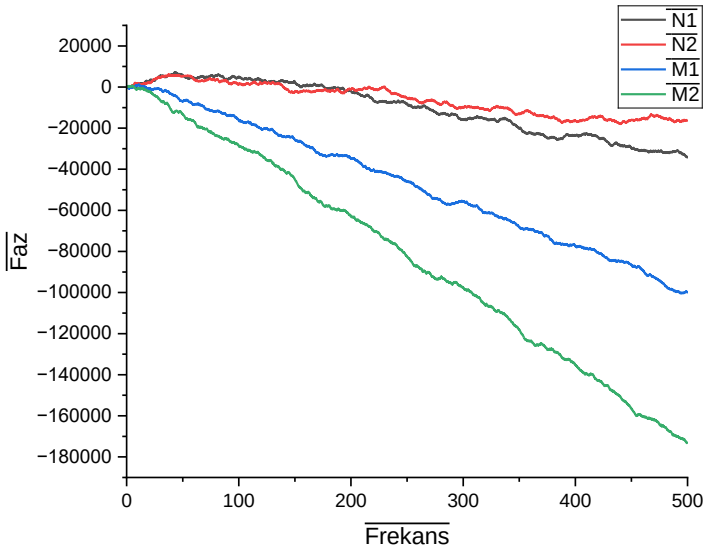
Şekil 44. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki 0-30 Hz frekans aralığında yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları

Aşağıdaki Şekil 45'de kişilerin yürüme hareketlerinin RMS yani efektif veya ortalama genlik değerleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde RMS genlik grafiklerinin normal genlik grafikleri ile benzerlik gösterdiği ancak tepe genlik değerlerinin yüksekliğinin bir miktar azaldığı görülmektedir.



Şekil 45. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin RMS genlik-frekans sonuçları

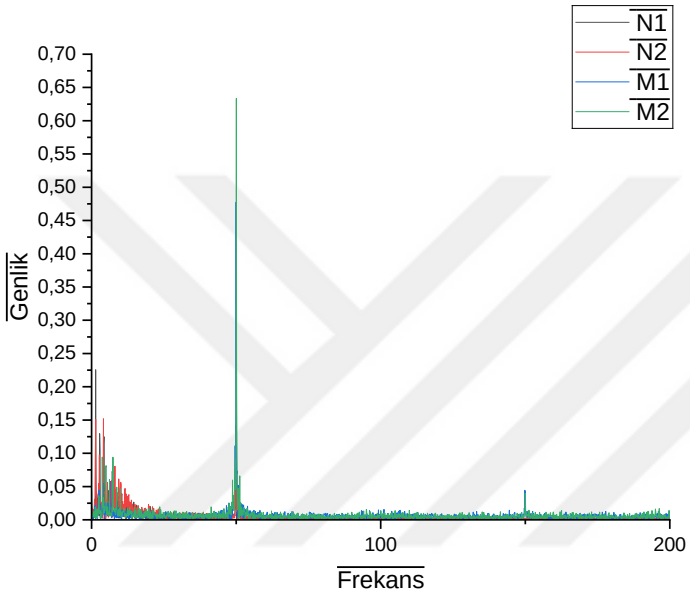
N ve M kişilerinin aynı mekânda 500 µs (mikro saniye)'lik çözünürlükteki Faz değerleri incelendiğinde iki kişinin faz değerlerinin birbirinden oldukça farklı, ancak kendi yürüyüşleri arasında benzerlik gösterdiği görülmektedir (Şekil 46).



Şekil 46. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin faz-frekans grafikleri

Koşma Analizleri (Zaman Çözünürlüğü : 500 µs)

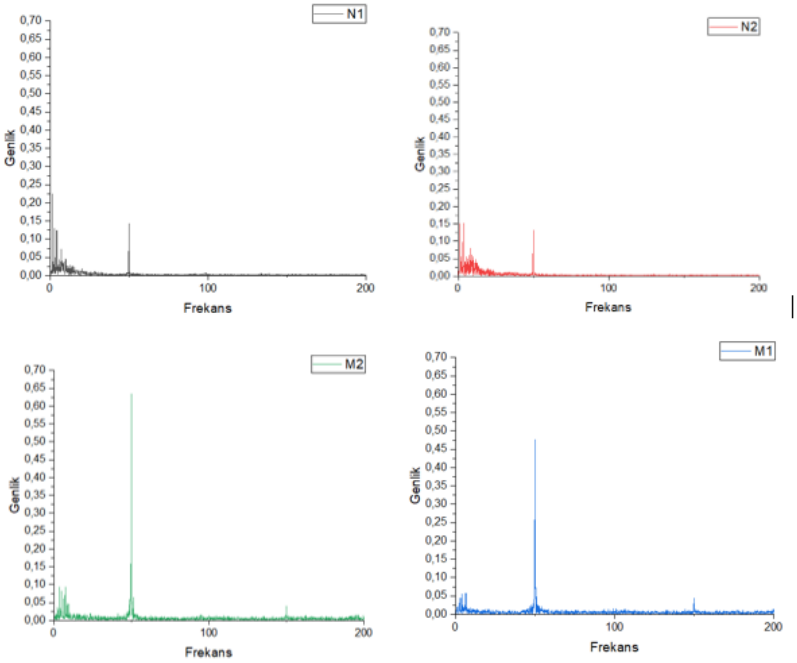
Kişilerin koşu halindeki genlik değerlerine bakıldığında şekil 47'deki sonuçlar gözlenmektedir. Bütün koşu hareketlerinde 50Hz'de bir salınım olduğu görülmekte M kişinin hareketlerinin daha harmonik yapıda olduğu gözlenmektedir.



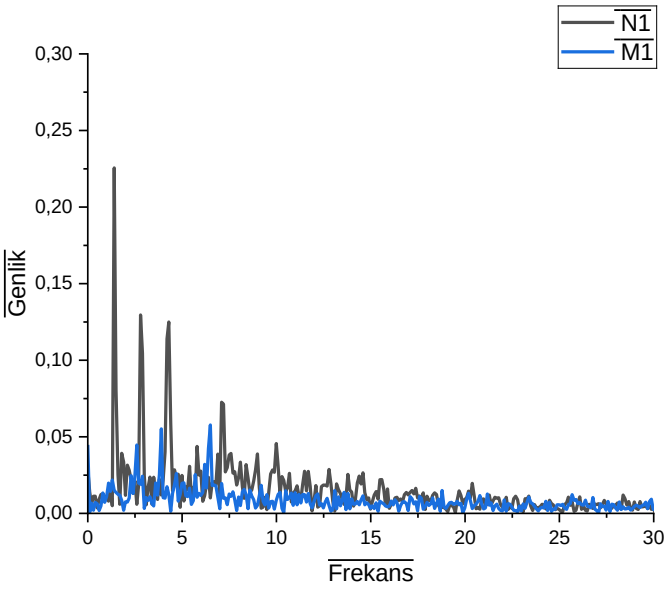
Şekil 47. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki koşma hareketlerinin genlik-frekans sonuçları

Kişilerin genlik değerlerinin ayrı durumdaki grafikleri ise şekil 48'de sunulmuştur. 50Hz frekansta yürümenin tersine M kişisinde daha yüksek genlik değeri gözlemlenmiştir. Bireysel açıdan değerlendirildiğinde 0-50 Hz arasında N ve M kişilerinin kendi koşuları arasında benzer genlik yığılması göstermektedir.

Şekil 49'daki grafikte ise N ve M kişilerinin birinci koşu hareketlerinin 0-30Hz frekans aralığı daha detaylı bir şekilde sunulmuş olup farklılıklar daha net görülmektedir.

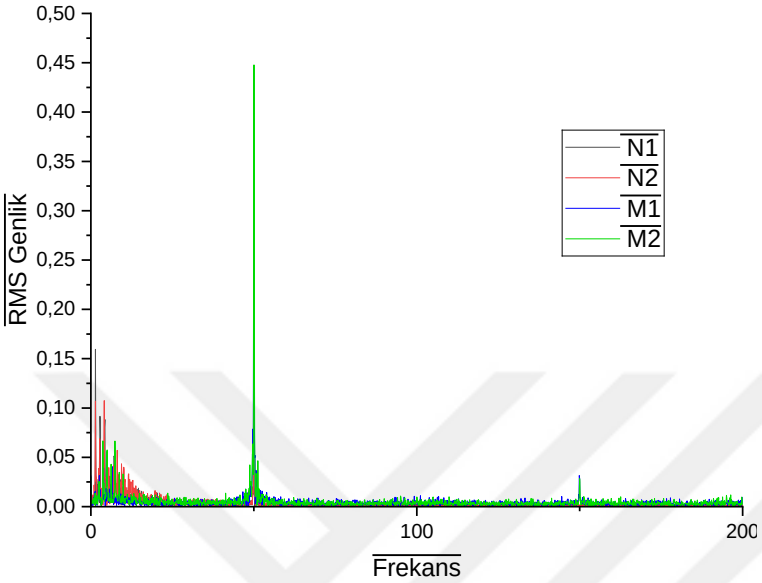


Şekil 48. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki koşma hareketlerinin genlik-frekans sonuçları (ayrı grafikli)



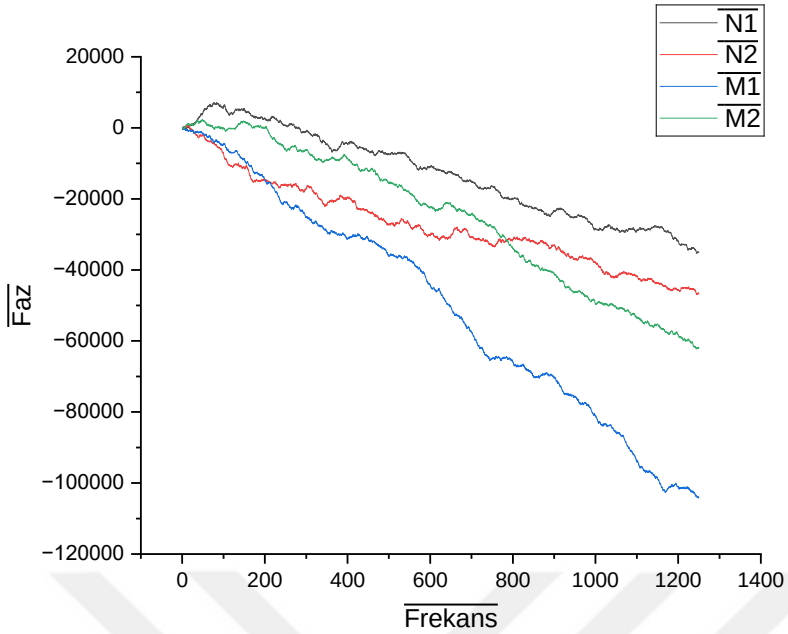
Şekil 49. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki 0-30 Hz frekans aralığında koşma hareketlerinin genlik-frekans sonuçları

Yine FFT sonuçlarına göre şekil 50'de yer alan koşu halindeki RMS genlik değerleri de normal genlik değerleriyle benzeri biçimde şekillenmiştir.



Şekil 50. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki koşma hareketlerinin RMS genlik-frekans sonuçları

Kişilerin koşu halindeki FFT-faz grafikleri şekil 51'de yer almaktadır. Faz grafiklerinden aynı kişilerin kendi koşularında benzer bir faza sahip olduğu, farklı kişilerin ise yürüme hareketinin aksine koşu faz grafiklerinin görece daha birbirine paralel konuma geldiği görülmektedir. Çünkü koşma hareketi yürümenin tersine hemen hemen herkeste ayağın belli bir noktaya kadar kaldırılması ve benzer kas gruplarının yüksek kuvvetle gerilmesi demektir.



Şekil 51. N ve M kişilerinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki koşma hareketlerinin faz-frekans sonuçları

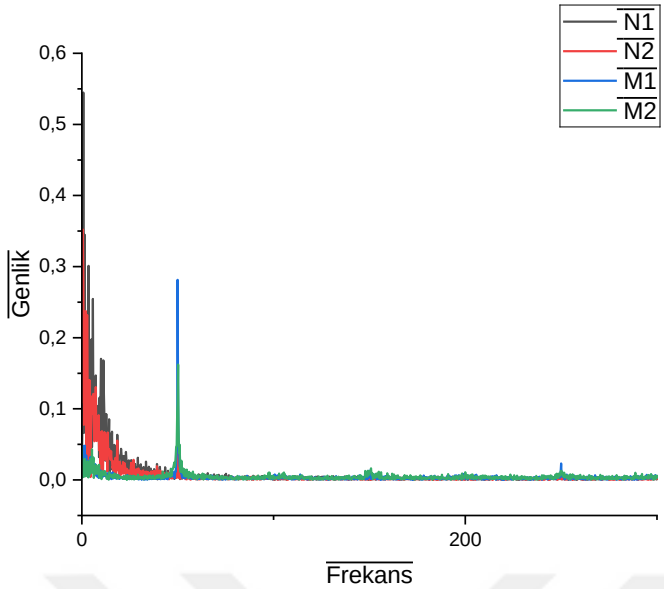
4.1.2. Farklı Zaman Çözünürlük Değerinde Yürüme Bulguları

Yürüme Analizleri (Zaman Çözünürlüğü: 200 µs)

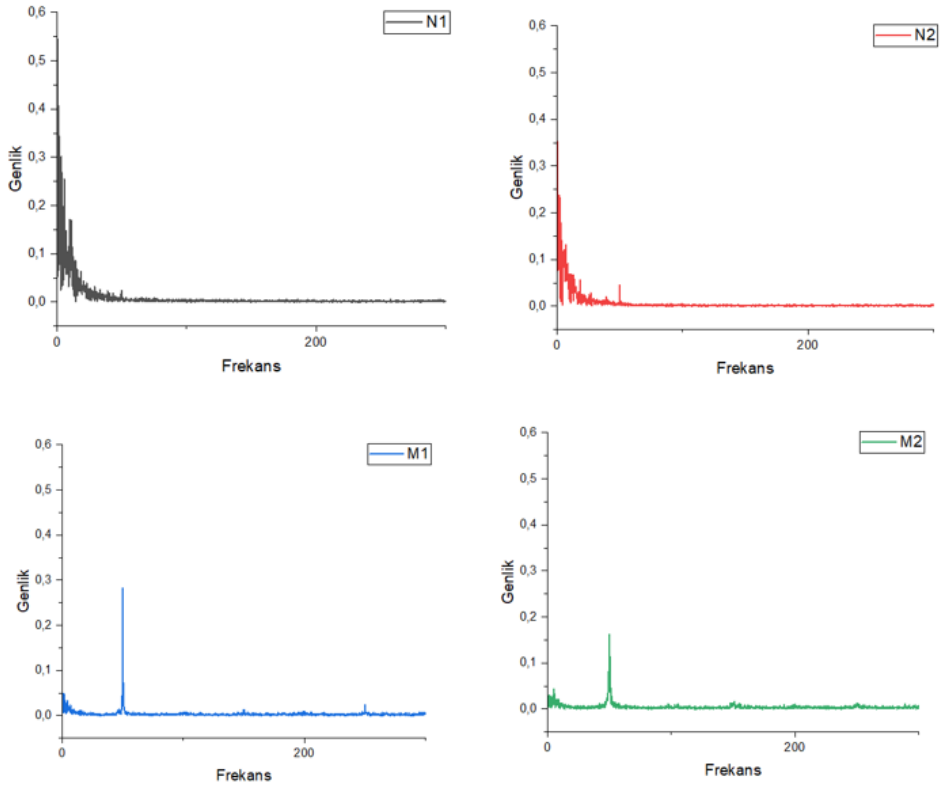
Osiloskopun ayarlarından zaman çözünürlüğü 200 µs'ye getirilerek kişilerin bu çözünürlükteki yürüme hareketleri incelenmiştir.

İki kişinin 200 µs'deki yürümede verilerinin FFT analizleri sonucunda genlik değerlerinin yer aldığı şekil 52 incelenirse, M kişisinin 50Hz daha yüksek genlik değerine ulaştığı görülmektedir. Kişinin bu yürüyüş stilinde daha tek düze adımlama yaptığı göz önüne alındığında hareketin başlangıçtan bitimine kadar geçen sürede daha ritimli yürüdüğü ve harmonik bir hareket yaptığı söylenebilir.

Genliklerin ayrı ayrı dört yürüyüş için olan grafiği ise şekil 53'de gösterilmiştir.

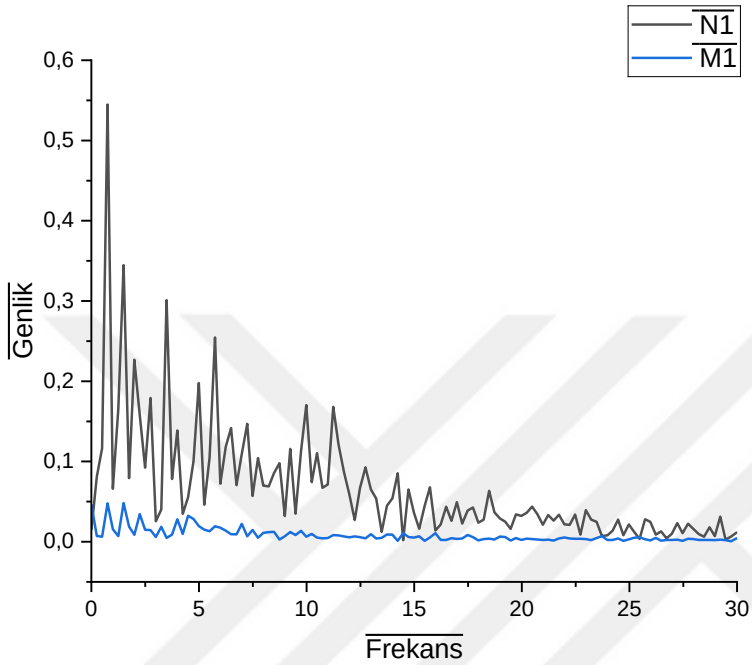


Şekil 52. N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları



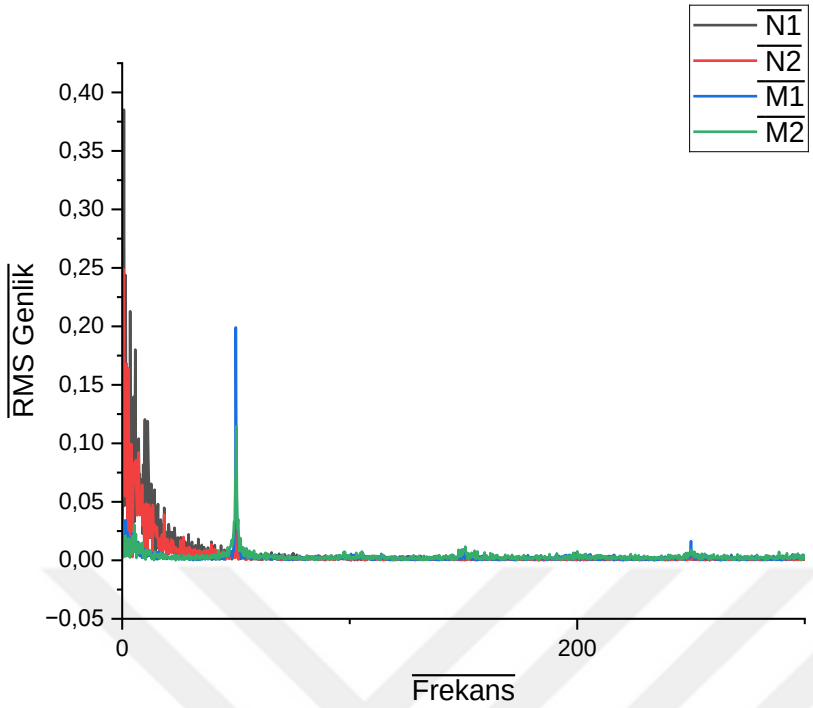
Şekil 53. N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları (ayrı biçimde)

Şekil 54'de ise şekil 53'de yer alan grafiklerde verilen N ve M kişisine ait ilk hareketlerin 0-30 Hz frekans aralığındaki genlik değerlerinin detaylı görünümleri yer almaktadır.

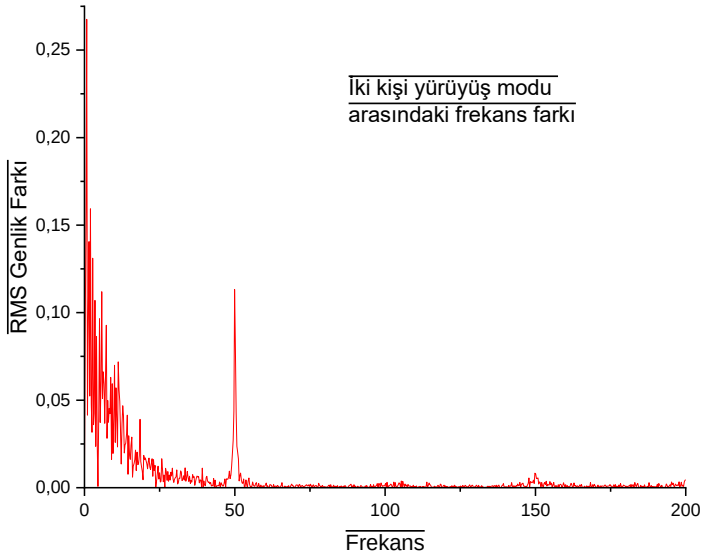


Şekil 54. N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki 0-30 Hz frekans aralığında yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları

Kişilerin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki RMS değerleri incelendiğinde M kişisinin 50Hz'de artan bir genliğe sahip olduğu, N kişisinin genlik değerlerinin ise 0-25Hz arasında yoğunlaştığı görülmektedir (şekil 55). 500 µs zaman çözünürlüğündeki yürüyüşte olduğu gibi yine kişilerin genlik ve faz değerleri birbirlerinden oldukça farklı çıkmıştır. İki kişinin RMS genlik farkının yer aldığı şekil 56'da oluşturulan grafikteki dalgalanmalar da bu farkı açıkça ortaya koymaktadır. Bu grafik oluştururken kişilerin 200 µs çözünürlükteki iki yürüyüşündeki genliklerin aritmetik ortalamasının farkı hesaplanmıştır.



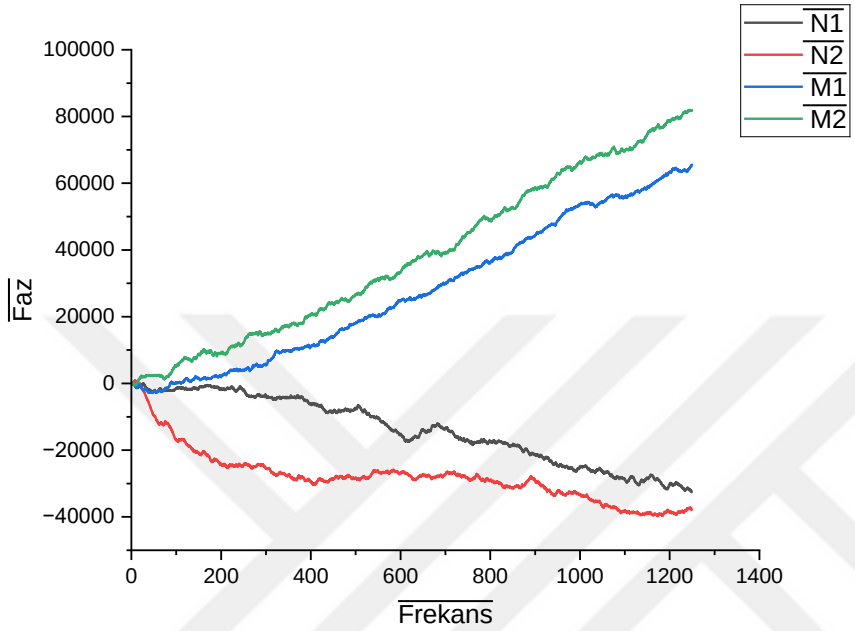
Şekil 55. N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin RMS genlik-frekans sonuçları



Şekil 56. N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin RMS genlik farkı-frekans grafiği

Şekil 57'de 200 µs'de gerçekleştirilen yürüme örneklerinin faz değerleri yer almaktadır. Koşma durumunda birbiriyle aynı yönde (negatif veya pozitif) olan faz

değerleri 200 µs'deki yürümede de yine oldukça farklılaşmıştır. Bunun en önemli nedeni verilerin zaman uzayında daha yüksek çözünürlükte alınmasıyla, birey hareketlerini daha yüksek çözünürlükte analiz edilebilmesidir.

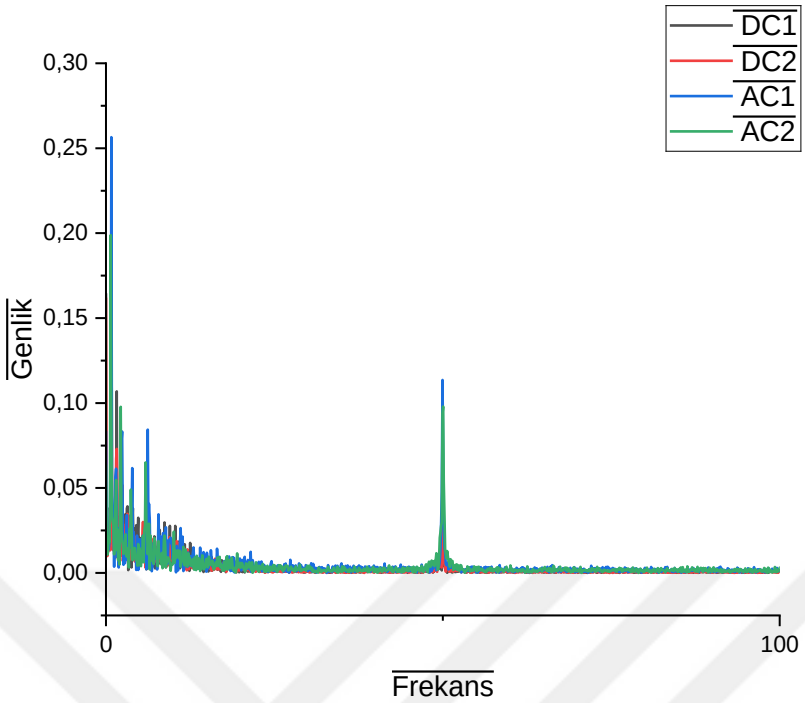


Şekil 57. N ve M kişilerinin 200 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin faz-frekans sonuçları

4.2. Deneyin İkinci Aşaması

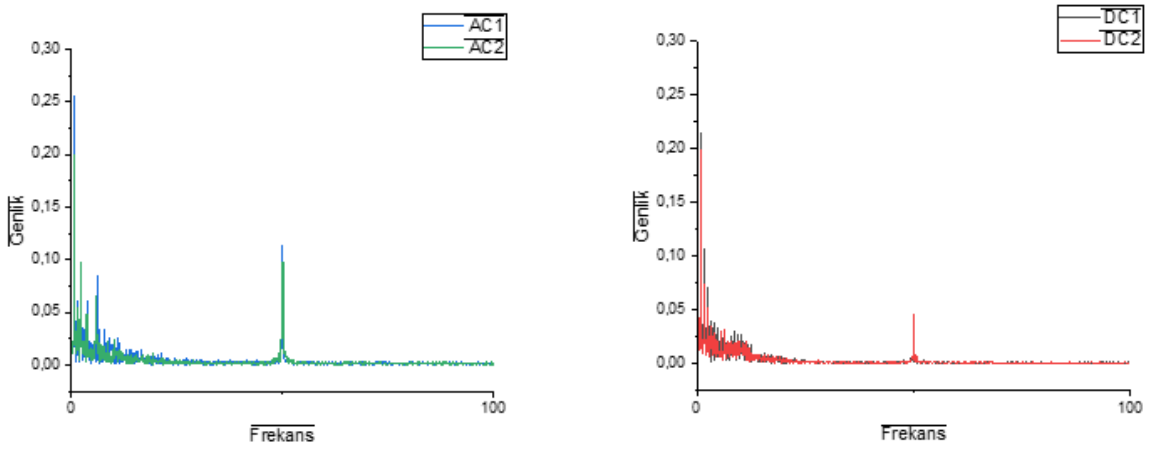
Çalışmanın ikinci aşamasında diyot köprüsü ve kondansatör bağladığımız piezo şerit ile yeniden 500 µs zaman çözünürlüğünde hareket kayıtları alınmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Şekil 58'de N kişisinin AC ve DC gerilim düzeylerindeki genlik değerleri incelenmiştir. DC gerilimler de genlik değerlerinin biraz daha düştüğü ancak salınımların daha harmonik yapıda olduğu gözlenmektedir.

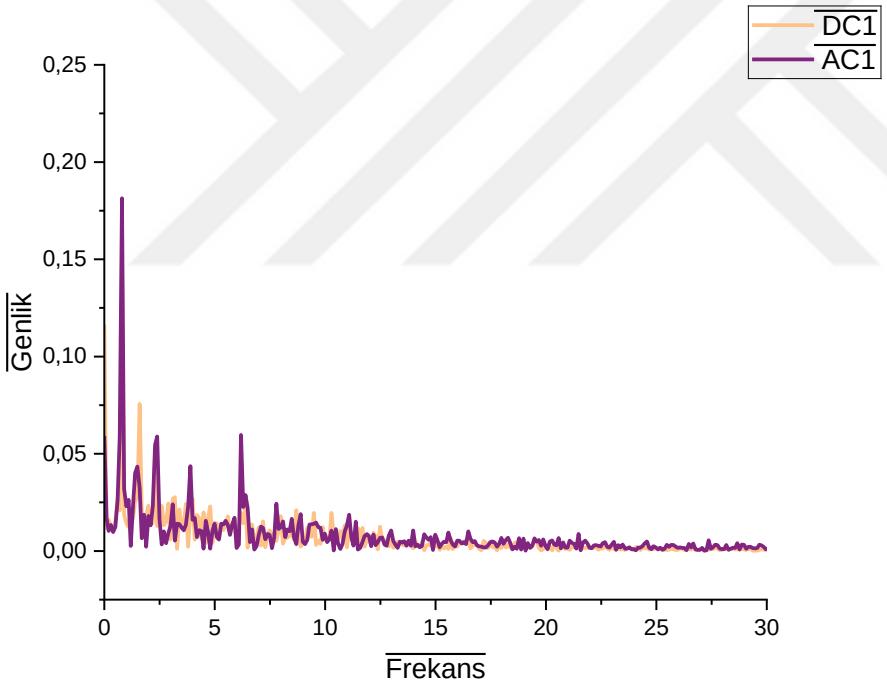


Şekil 58. N kişisinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin AC ve DC ölçümlü genlik-frekans grafiği (bileşik)

Aşağıdaki yer alan grafikte AC ve DC olarak kaydedilen yürüyüş hareketinin genlik değerlerinin grafikleri AC ve DC olarak ayrı ayrı şekil 59'da sunulmuş olup AC ve DC değerdeki iki yürüyüşün genlik değerlerinin 0-30Hz frekans aralığındaki değerleri ise şekil 60 yer almaktadır. Genlik değerlerindeki farklılıkların AC ölçümlerde 0-7,5Hz arasında Dc ölçümlerde ise 0-2,5 Hz arasında daha değişken olduğu, bunun da Dc gerilimlerde bağlanan kondansatörün bir nevi filtreleme görevi yapmasından kaynaklandığı söylenebilir.

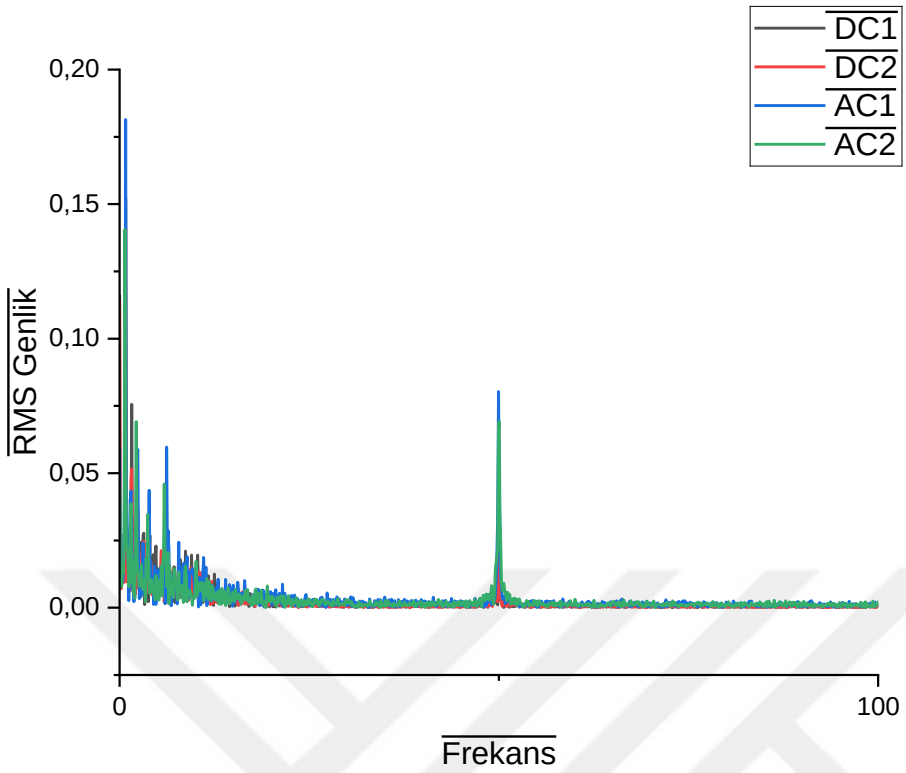


Şekil 59. N kişisinin 500 µs'lik frekanstaki yürüme hareketlerinin AC ve DC ölçümlü genlik-frekans grafiği (ayrı)



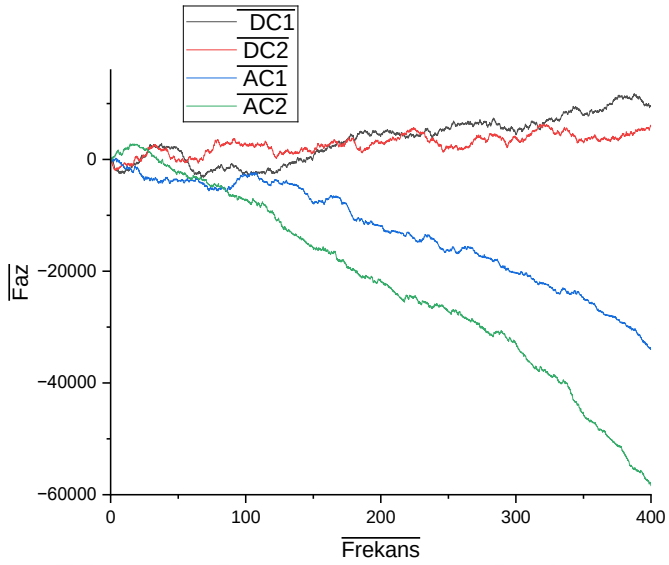
Şekil 60. N kişisinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki 0-30 Hz frekans aralığında AC ve DC ölçümlü yürüme hareketlerinin genlik-frekans sonuçları

N kişisinin RMS genlik frekans grafikleri şekil 61'de yer almaktadır. RMS değerlerinin dağılımında da yine 50Hz'de salınım genliği görülmekte, DC değerlerin AC gerilimlere göre maksimum değerlerde yaklaşık 1 birim azaldığı görülmektedir.



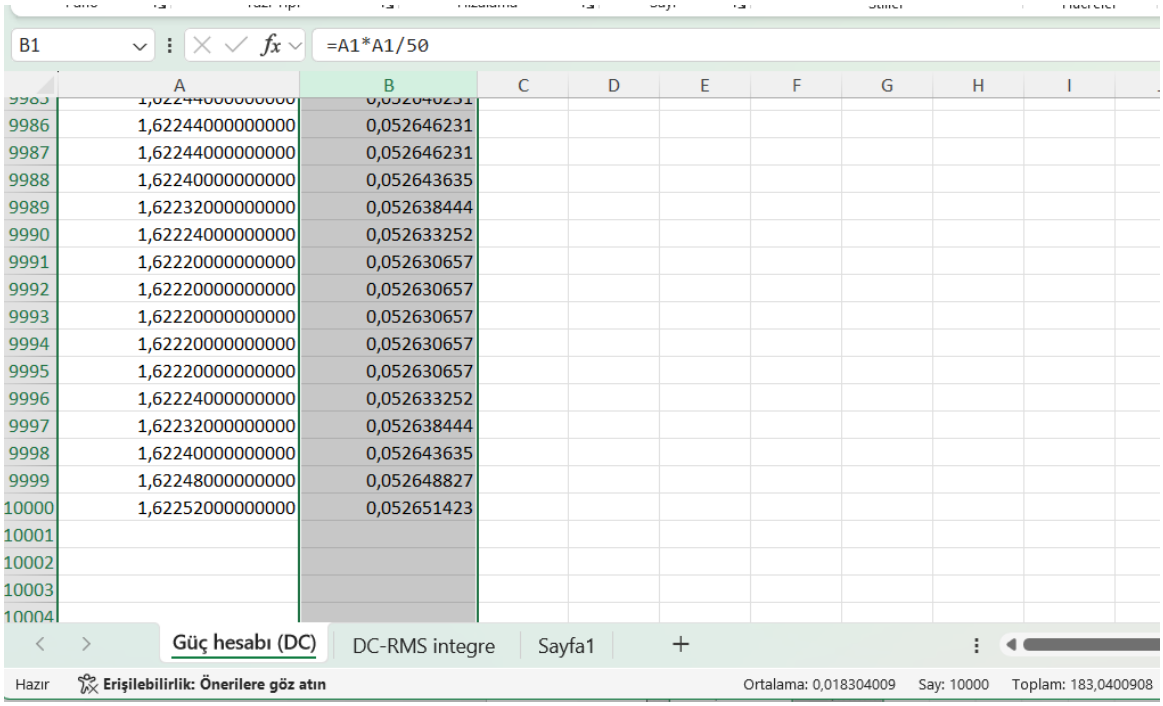
Şekil 61. N kişisinin 500 µs'lik frekanstaki yürüme hareketlerinin AC ve DC ölçümlü RMS genlik-frekans grafiği

Aynı kişinin tekrarlı yürüyüşlerinde hem AC hem DC olarak faz değerlerinin kendi içlerinde paralellik gösterdiği görülmektedir. Bunun yanında DC faz değerleri AC olanlara göre daha stabil ve birbirine daha çok benzemektedir. Bunda kullandığımız kondansatörün etkili olduğu söylenebilir (şekil 62).



Şekil 62. N kişisinin 500 µs'lik zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketlerinin AC ve DC ölçümlü faz-frekans grafiği

Bu aşamada elde ettiğimiz DC genlik değerlerini güç hesabında kullanabilmek amacıyla FFT programında 10 sn'lik yürüyüşün 10000 veriye ayrılan değerlerini integre ederek grafik altındaki tüm genlik alanını bulmaya çalıştık (a sütunu) (şekil 59).



B1 =A1*A1/50

	A	B
9985	1,62244000000000	0,052646231
9986	1,62244000000000	0,052646231
9987	1,62244000000000	0,052646231
9988	1,62240000000000	0,052643635
9989	1,62232000000000	0,052638444
9990	1,62224000000000	0,052633252
9991	1,62220000000000	0,052630657
9992	1,62220000000000	0,052630657
9993	1,62220000000000	0,052630657
9994	1,62220000000000	0,052630657
9995	1,62220000000000	0,052630657
9996	1,62224000000000	0,052633252
9997	1,62232000000000	0,052638444
9998	1,62240000000000	0,052643635
9999	1,62248000000000	0,052648827
10000	1,62252000000000	0,052651423
10001		
10002		
10003		
10004		

Güç hesabı (DC) | DC-RMS integre | Sayfa1

Hazır | Erişilebilirlik: Önerilere göz atın | Ortalama: 0,018304009 | Say: 10000 | Toplam: 183,0400908

Şekil 63. DC gerilim değerlerinin integre edilmiş sonuç değerleri ve 10sn'lik toplam güç miktarı (miliwatt)

Elektriksel olarak basit güç hesabı formül 4.1'de verildiği üzere gerilim (V) ve akımın (I) çarpımı ya da gerilimin karesinin devredeki dirence (R) bölümüdür.

$$Güç = V * I \ = \frac{V^2}{R} \tag{4.1}$$

Buradan hareketle integre edilen ve bize birim frekanstaki gerilimi veren şekil 59'daki her biri sonsuz küçüklükteki 10000 adet genlik segmenti değerlerinin kendisi ile çarpılıp osiloskopun sabit direnç değeri olan 50 ohm (Ω)'a bölünmesi ile elde edilen güç değerleri tablo 59'da hesaplanmıştır. Burada bulunan 183,040 değeri mili watt olup bize 10 sn'lik yürüyüşten elde edilen güç miktarını vermektedir. Bu değer saate çevrildiğinde ise 65,88 watt/h değerine ulaşılmaktadır.

Ancak bu hesaplamada az da olsa ölçüm esnasında gerilim değerlerine karışan ses veya piezo şeritte farkında olmadan sürtme sonucu oluşan ani gerilim yüksekliği kaynaklı parazitlerin temizlenmesi gerekmedir. Ayrıca oluşturulan herhangi bir elektronik devrede dirençlerden kaynaklı akımda küçük miktarda da olsa azalma olacak ve güç değeri biraz daha düşük çıkacaktır. Fakat bu negatif etki, bulunan değeri çok fazla aşağı çekmeyecektir.

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmanın ilk aşamasında farklı kişilerin yürüyüş ve koşma hareketleri sonucu ortaya çıkan genlik değerleri sonuçlarına bakılmış ve osiloskopun zaman çözünürlüğü 500 µs ve 200 µs'ye getirilerek hem zaman çözümleme farkının genlik , RMS genlik ve faz değerine etkisi incelenmiş hem de aynı zaman çözünürlüğü (500 µs) için yürüme ve koşma hareketlerinde kişilerin faz, genlik ve RMS genlik değerleri incelenmiştir.

İkinci aşamada ise piezo şeride bir kapasitör ve diyot köprüsü bağlanarak DC gerilim çıkışı ve AC gerilim çıkışı elde edilebilecek bir birleştirme yapılmıştır. Daha sonra bu elektronik parçaların piezoya bağlanması sonucunda AC ve DC genlik ölçülmüş, AC genlik değerini diyot ve kondansatör bağlanmadan önceki elde edilen değerleri ile karşılaştırma yapma imkânı olmuştur. Ayrıca AC ve DC gerilimlerin büyüklükleri ve faz değerleri incelenerek, bulunan DC gerilim sonuçlarının bir depolama yapılmak istense teoride ne kadar bir güç elde edilebileceği öngörülmeye çalışılmıştır.

Deneyin birinci aşamasın Osiloskopun frekans ayarlarından zaman çözünürlüğü 500 µs'ye getirilerek kişilerin bu frekans değerinde aynı mekandaki yürüme ve koşma sonuçları değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır...

N ve M olarak kodlanan kişilerin ikişer yürüyüşü (toplam dört yürüyüş) değerinin faz değerlerine bakıldığında, kişilerin faz grafiklerinin tamamen zıt yönlerde devam ettiği kişilerin kendi iki yürüyüşleri içinde ise benzerlik gösterdiği görülmektedir.

N ve M kişilerinin genlik sonuçlarına bakıldığında 50Hz frekansta genlik değerinde her iki kişi için de artış olduğu görülmektedir. Bu durum diğer sonuçlarla da tekrarlandığından bizi 50Hz'de malzemeye bağlı olarak doğal bir salınım gerçekleştiği sonucuna götürmektedir. Kişilerin genlik değerleri için N kişisinin değerlerinin 0-25 Hz arasında (ki bu aralık insanların hareketlerinde genliğin olmasını beklediğimiz aralıktır)

daha değişken ve yüksek, M kişisinde ise daha stabil ve düzgündür. M kişisinin yürüyüşünün daha net adımlar şeklinde olduğu, N kişisinin ise adımlama düzeninin daha yere yakın fazla diz büküklüğü olmadan gerçekleştiği, veriler ölçülürken görülmüş olup bu sonuç da bize M kişisinin düzgün ve yerden daha yükseğe ayağını kaldırarak adımlamasına bağlı daha ritimsel bir genlik değerine ulaştırmıştır. Yani M kişisi daha harmonik bir yürüme formuna sahiptir.

N ve M kişilerinin zaman çözünürlüğü 500 µs'deki efektif genlik (RMS) değerlerine bakıldığında 50 Hz değeri hariç, (0-50) Hz frekans aralığında N kişisinin değerlerinin (0-0,225) arasında, M kişisinin ise (0-0,05) aralığında olduğu görülmektedir.

N ve M kişilerinin 500 µs zaman çözünürlüğündeki koşma verileri analiz edildiğinde ise çıkan sonuçlar şöyledir. Faz grafikleri sonuçlarında yürüme hareketinin aksine kişilerin daha benzer eğrilikte devam eden bir dağılıma sahip görece daha paralel olduğu görülmektedir. Aynı kişilerin kendi koşularında ise daha benzer bir faza sahip olduğu dikkat çekmektedir. Çünkü koşma hareketi yürümenin tersine, herkeste ayağın belli bir noktaya kadar kaldırılması ve hemen hemen benzer kas gruplarının yüksek kuvvetle gerilmesi demektir. Kişilerin koşma ritmi ise yürüme hareketine göre kendi içinde daha tutarlıdır koşarken insanlar daha ritmik adımlama yaparlar.

Koşma halinde kişilerin genlik değerleri incelendiğinde kişilerin tüm koşu hareketlerinde 50Hz'de bir salınım yaptığı görülmekte ve bu değer yürümeye göre daha da yükselmiştir. Yürüme hareketine göre M kişisinin de 0-25 Hz aralığında daha değişken bir genlik dağılımına sahip olduğu görüşmüştür. N kişisi için de benzer bir durum geçerlidir. Sonuçlar bize yine M kişisinin hareketlerinin daha harmonik yapıda olduğu göstermektedir.

FFT sonuçlarına göre N ve M kişileri için RMS genlik değerleri de normal genlik değerleriyle benzeri biçimde dağılım göstermektedir. RMS genlik değerleri N kişisi için (0-50) Hz aralığında (0-0,175) M kişisi için (0-0,1) değeri arasında değişkenlik gösterdiği görülmüştür.

200 µs'lik frekans aralığında ölçülen yürüme verilerinin analizlerine bakıldığında koşma durumunda birbiriyle aynı yönde (negatif veya pozitif) olan faz değerleri, 500 µs zaman çözünürlüğünde olduğu gibi 200 µs zaman çözünürlüğündeki yürümede de yine oldukça farklılaşmıştır. Ancak kişilerin faz kendi içinde tutarlı yönde görece paralel gitmesi dikkat çekmekte ve bize her kişinin bir yürüyüş stili olduğunu teyitler niteliktedir.

Zaman çözünürlüğünün artması ile özellikle faz bağlamında daha hassas çözümleme yapılabilir. Bu ise yürüyüş kararlılığını daha iyi ortaya koyar fakat işlenen veri miktarını artırır. Burada önemli olan optimum çözünürlüğün belirlenmesidir. Bu çalışma kapsamında optimum çözünürlük net olarak belirlenememiştir ancak 200 µs ile 500 µs arasına tekabül ettiği düşünülmektedir.

Kişilerin 200 µs zaman çözünürlüğündeki yürüme hareketindeki genlik değerleri incelendiğinde M kişisinin 50Hz daha yüksek genlik değerine ulaştığı görülmektedir. Fakat yine M kişisinin 0-25 Hz arasındaki genlik değerlerinin daha stabil olduğu N kişisinin genlik değerlerinin daha değişken olduğu bir kez daha görülmüştür. M kişisinin bu frekansta ölçülen yürüyüş stilinde de daha tek düze adımlama yaptığı hareketin başlangıçtan bitimine kadar geçen sürede daha ritimli yürüdüğü ve harmonik bir hareket yaptığı söylenebilir. Kişilerin 200 µs zaman çözünürlüğündeki RMS değerleri incelendiğinde, N kişisinin genlik değerlerinin ise 0-25 Hz arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu frekans aralığı için RMS değerleri M kişisi için (0-0,05), N kişisi için (0-0,25) arasında değişkenlik göstermektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında diyot köprüsü ve kondansatör bağladığımız piezo şerit ile yeniden hareket kayıtları alınmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde bir kişi üzerinden ölçüm yapılmış ve değerlendirilmiştir.

Kişinin hem AC hem DC çıkış ucundan osiloskopa aktarılan genliklerin analiz sonuçlarına bakıldığında DC ve AC faz değerlerinin kendi içlerinde paralellik gösterdiği

görülmektedir. Bunun yanında DC faz değerleri AC olanlara göre daha stabil ve birbirine daha yakın birbirine daha paralel bir görüntü oluşturmaktadır. Bunun da kullandığımız kondansatörün filtreleme etkisinden kaynaklandığı söylenebilir. Burada kondansatörün düşük değerli olması, hareketteki yüksek frekansların elektronik olarak filtrelenmesi sonucunu doğurur. İnsan hareketinden kaynaklanan doğal frekans değerlerinin 0-30 Hz arasında olması beklenen bir durumdur.

Kişinin AC ve DC ölçümlerindeki genlik değerleri incelendiğinde DC ölçümlerde genlik değerlerinin biraz daha düştüğü ancak salınımların daha harmonik yapıda olduğu gözlenmektedir. Burada şunu da belirtmek gerekir ki bu ölçümlerde AC değerleri ilk piezo şeride direk bağlanan osiloskoptan alınan değerlere göre düşmüştür. Bunun nedeni de piezo şeride bağlanan diyot köprüsünde gerilimlerin bir kısmının geri besleme yapmasıdır.

Sonuçlardaki AC ve DC ölçümlerindeki RMS genlik değerlerine bakılacak olursa yürüyüşü gerçekleştiren N kişisinin önceki yürüyüşlerinde gözlemlendiği gibi 0-25 Hz arasında değişken dağılımlı bir RMS genliğe sahip olduğu hem AC hem DC genlik değerlerinde ise birinci aşamaya göre daha düşük RMS genliğe ulaştığı görülmektedir. DC RMS genlik değeri AC ölçüme göre de daha düşük kalmıştır.

Yine bu aşama da çalışmanın başında hedeflediğimiz elde edilen gerilimlerin depolanması ve güç hesabının yapılmasına yönelik 10 sn lik yürüyüşün 10000 kısma ayrılan osiloskop değerlerinin toplamından oluşan 1 yürüyüş hareketinin DC genlik değerlerini FFT programında integre edip osiloskopun sabit direnç değeri 50Ω üzerinden bir güç hesabına gittiğimizde 10 sn için 0,183 watt/sn 1 saat için 65,88 watt/h güç değerine ulaşılmıştır. Ancak buradaki hesaplamada az da olsa gerilim değerlerine ses veya piezo şeride farkında olmadan sürtme sonucu oluşan ani gerilim yüksekliği kaynaklı parazitlerin temizlenmesi ve oluşturulacak bir elektronik devredeki akım azaltıcıların hesaba katılması gerekmektedir. Tüm bu negatif etkiler dahi teoride bulunan güç değerini çok fazla azaltmayacaktır.

Bütün bu sonuçlar değerlendirildiğinde; piezo malzeme ile tasarlanan bir akıllı giysi kullanılarak kişilerin gündelik hareketleri (yürüme ve koşma eylemleri) ile önemli bir gerilim elde edilmiş olup ölçülen gerilimin genlik değerleri farklı kişilerde ve 300'ü aşkın toplam ölçümde 6-10 V arasında bulunmuştur. Bu gerilim değeri, depolanması halinde bir cep telefonu bataryası veya vücut sensörlerini çalıştırabilecek seviyede olup yenilebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilecek boyuttadır. Depolanan enerji sayesinde kişiler sadece kendi hareketleri ile hem akıllı giysideki sensörü hem de bu giysiye verilen bir enerji çıkış noktasıyla diğer küçük elektronik aletlerini başka bir elektrik gücüne gerek olmadan şarj edebileceklerdir.

Bunun yanında elde edilen FFT sonuçlarına bakıldığında bu tip aktif veya ultra akıllı bir tekstil malzemesi ile kaydedilen gerilimlerden kişilerin öncelikle yürüyüş, koşu hatta gündelik hareketleri takip edilerek kendilerine özgü bir hareket formu belirlenebilir. Bu hareket formunun tekrardan giysi hafızasına veya giysi sensörüne bağlı bir bilgisayara yüklenmesi ile de kişilerin, o anki ölçülen gerilim değerleri eski (normal) değerleri ile karşılaştırılabilecek ve sadece bir takip mekanizması ile rutin hareketlerindeki farklılıklar gözlenebilecektir. Özellikle yaşlı, hasta, engelli veya yalnız yaşayan bireylerin vücut değerleri bir EKG ölçümü gibi değerlendirilerek rahatsızlık ve anomaliler saptanabilecek ihtiyacı olan kişilerin yardımına yakınları veya sağlık ekipleri aciliyetle ulaşılabilecektir. Tüm bunlara ek olarak günlük ölçülen bu veri sonuçlarına bakarak bazı sağlık alanlarında daha erken ya da kolay teşhis mümkün olabilecektir. Örneğin bir hekim bu tip bir analiz sonucu ile kişinin, çok hızlı yürüme, sert yere basma vb. ortopedik olarak yaptığı yanlışları veya çarpma, burkma gibi kazaları yorumlayıp, tespit edebilir. Bu da zaten bu analiz sensörlü giysiyi kullanan kişilerin basit rahatsızlıklarının kolay tespit edilmesini hem hekimin hem hastanın daha az zaman harcaması sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

AC devre kesicinin DC voltajda kullanımı. (2022, 8 Nisan). Erişim adresi: https://imbelectric.com/ac-devre-kesicinin-dc-voltajda-kullanimi/ (Erişim tarihi: 15.08.2024)

Adıyaman Üniversitesi. (t.y.). Deney 4: Doğrultucu devreler. *Elektrik Elektronik Bölümü Analog Elektronik Laboratuvarı deney föyleri.* (s. 1-9) Erişim: 17 Kasım 2024, https://static.adiyaman.edu.tr/files/10/tr/b%C3%B6l%C3%BCmler/elektrik-elektronik-muhendisligi-bolumu/belgeler/deney-foyleri/analog-elektronik-laboratuvari/deney4.pdf

Adams Postprocessor – Fast Fourier transform (FFT), (t.y.) Erişim adresi: https://bias.com.tr/haber/blog/adams-postprocessor-fast-fourier-transform-fft (Erişim tarihi: 12.08.2024)

Alternatif akımın temel tanımları. (2015, 10 Temmuz). Erişim adresi: https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/alternatif-akimin-temel-tanimlari/4379#ad-image-0 (Erişim tarihi: 10.09.2024)

Amasya Üniversitesi. (t.y.). Deney 3: Alternatif akım devrelerinde güç ve güç katsayısı. *Elektrik-Elektronik Mühendisliği Elektrik Devreleri-II Laboratuvarı deney föyleri.* (s.1-5) Erişim: 12 Ağustos 2024, https://muhendislik.amasya.edu.tr/media/15858/deney-3.pdf

Analog Dijital Dönüştürücü / Analogue to Digital Converter (2021, 29 Temmuz). Erişim adresi: https://devreyakan.com/analog-dijital-donusturucu-analogue-to-digital-converter/ (Erişim tarihi: 15.12.2024)

Batarya nedir? Batarya çalışma prensibi hakkında bilinmesi gerekenler. (2024, 19 Mart). Erişim adresi: https://energyexporter.com/blog/138/what-is-a-battery-what-you-need-to-know-about-the-battery-operating-principle (Erişim tarihi: 27.09.2024)

Beşergil, B. (2024). Ferroelektrik malzeme (ferroelectric material). Birsen Beşergil blog. Erişim: 22 Eylül 2024, https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/ferroelektrik-malzeme-ferroelectric.html

Ceylan, M. (2012). *Alternatif Akım Devreleri*. Seçkin Yayıncılık 2. Baskı: Ankara.

Coşkun, E. (2007). Akıllı Tekstiller ve Genel Özellikleri. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Coşkun, E. ve Oğulata, R. T. (2008). "Akıllı Tekstiller ve Genel Özellikleri". *Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, 18 (3), 100-109.

Coşkun, İ. (Ed.). (1994). *Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi*. Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları: Ankara.

Demircioğlu, S.B. (2006). Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Sınırlarının Yerel Bara Parametreleri Kullanılarak Gerçek Zamanlı Değerlendirilmesi. Yayımlanmamış Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Dielektrik madde nedir? (t. y.). Erişim adresi: https://pidu.com.tr/dielektrik-madde-nedir/ (Erişim tarihi: 21.09.2024)

Diyot nedir? (2014, 28 Aralık) Erişim adresi: https://www.elektrikrehberiniz.com/elektronik/diyot-nedir-10343/ (Erişim tarihi: 22.10.2024)

Dong, Ç., Leber, A., Gupta, T.D., Chandran, R., Volpi, M., Çu, Y., Nguyen-Dang, T., Bartolomei, N., Yan,W. And Sorin, F. (2020). "High-efficiency super-elastic liquid metal based triboelectric fibers and textiles" *Nature Communıcatıons*, 11 (3537). (https://doi.org/10.1038/s41467-020-17345-8).

Elektrik enerjisi depolama yöntemleri ve seçim kriterleri. (2021, 22 Nisan). Erişim adresi: https://aktif.net/elektrik-enerjisi-depolama-yontemleri-ve-secim-kriterleri/ (Erişim tarihi: 08.08.2024)

Elektronik filtreler. (2020, 6 Haziran). Erişim adresi: https://maxwellmuhendislik.com.tr/2020/06/06/elektronik-filtreler/ (Erişim tarihi: 13.11.2024)

Enerji nasıl depolanacak? Enerji depolama yöntemleri nelerdir? (t. y.). Erişim adresi: https://www.yesilodak.com/roportaj-enerji-nasil-depolanacak-enerji-depolama-yontemleri-nelerdir#). (Erişim tarihi: 07.08.2024)

Elektrik sinyali 1 analog ve sayısal sinyal. (t.y.). Erişim adresi: https://www.elektrikport.com/makale-detay/elektrik-sinyali-analog-ve-sayisal-sinyal/15115#ad-image-0 (Erişim tarihi: 11.05.2024)

Erdem İşmal, Ö. ve Yüksel, E. (2016). "Tekstil ve Moda Tasarımına Teknolojik Bir Yaklaşım: Akıllı ve Renk Değiştiren Tekstiller". *Yedi,* (16), 87-98. (https://doi.org/10.17484/yedi.58858).

Erol, A. D., Çetiner, S. (2017). "Elektronik Tekstillere Yönelik Akıllı Kumaş Sensörleri". *Tekstil ve Mühendis,* 24 (108), 305-320. (https://doi.org/10.7216/1300759920172410810).

Farnell, (2019). Sleep monitor strip. *Te Connectivity Sensors* (s.1-4). Erişim: 05 Ağustos 2024, https://www.farnell.com/datasheets/2921323.pdf

Fazör diyagramı. (2021, 16 Eylül). Erişim adresi: https://www.elektrifikasyon.com/fazor-diyagramlari-ve-fazor-cebiri/ (Erişim tarihi: 17.06.2024)

Ferroelectricity. (2010, 1 Eylül). Erişim adresi: https://en.wikipedia.org/wiki/Ferroelectricity (Erişim tarihi: 05.03.2024)

Ferroelektrik. (t. y.). Erişim adresi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Ferroelektrik (Erişim tarihi: 08.03.2024)

FFT analysis (fast Fourier transform): the ultimate guide to frequency analysis. (2023, 10 Mayıs). Erişim adresi: https://dewesoft.com/blog/guide-to-fft-analysis (Erişim tarihi: 09.10.2024)

FFT fast Fourier transform. (t.y.). Erişim adresi: https://svantek.com/academy/fft-fast-fourier-transform/ (Erişim tarihi: 24.10.2024)

FFT filter. (t.y.). Erişim Adresi: https://www.originlab.com/doc/tutorials/fft-filter (Erişim tarihi: 16.12.2024)

Fourier dönüşümü: internette müzik ve fotoğraf paylaşımını mümkün kılan matematik! (2019, 1 Nisan). Erişim adresi: https://evrimagaci.org/fourier-donusumu-internette-muzik-ve-fotograf-paylasimini-mumkun-kilan-matematik-7728#google_vignette (Erişim tarihi: 18.10.2024)

Fourier dönüşümü nedir? (2020, 26 Mart). Erişim adresi: https://blog.dta.com.tr/fourier-donusumu-nedir/ (Erişim tarihi: 22.10.2024)

Fourier dönüşümü ve frekans uzayı. (2019, 17 Eylül). Erişim adresi: https://www.mehmetalikucuk.com/elektrik-elektronik/fourier-donusumu-ve-frekans-uzayi/ (Erişim tarihi: 05.10.2024)

Gök, M.O. ve Karagöl, İ. (2018). "Piezoelektrik Uygulamalı Ayakkabı Tasarımı". *Journal of Social And Humanities Sciences Research (JSHSR)*, 5 (22), s.888-893. (https://doi.org/10.26450/jshsr.434).

Güç faktörü ve Cos φ. (t. y.). Erişim adresi: https://ergunelektrik.com/guc-faktoru-ve-cos-%CF%86/ (Erişim tarihi: 14.05.2024)

Güç katsayısı ölçme. (2012, 26 Aralık). Erişim adresi: https://www.elektrikrehberiniz.com/kompanzasyon/guc-katsayisi-olcme-2542/ (Erişim tarihi: 19.06.2024)

Hekim, M. ve Dağlı, A. (2008). *Alternatif Akım Devre Analizi.* Lisans Yayıncılık: İstanbul.

Hızlı fourier dönüşümü (FFT — fast fourier transform. (2023, 20 Aralık). Erişim Adresi: https://medium.com/teknopar-akademi/h%C4%B1zl%C4%B1-fourier-don%C3%BC%C5%9F%C3%BCm%C3%BC-fft-fast-fourier-transform-391a3cb71284 (Erişim tarihi: 17.09.2024)

Hızlı fourier dönüşümü ve frekans ölçme. (t.y.). Erişim Adresi: https://www.atasoyweb.net/Hizli-Fourier-Donusumu-Ve-Frekans-Olcme (Erişim tarihi: 15.12.2024)

Indian Technical Textile Association (ITTA). (t.y.). Technical Textile Segments. https://ittaindia.org/about-technical-textile/ (Erişim tarihi: 17.02.2024)

İTKİB (2008). *Türkiye'de ve Dünya'da Teknik Tekstiller Üzerine Genel ve Güncel Bilgiler Raporu.* Erişim: 18 Mart 2024, http://www.itkib.org.tr/duyurular/sirkuler/dosyalar//TEKNIK_TEKSTIL_RAPOR_2008.pdf

Karadeniz Teknik Üniversitesi (t.y.). Deney 5: Doğrultucu Devreleri. *Elektrik Programı deney föyleri*. (s. 1-6) Erişim: 8 Eylül 2024, https://ktu.edu.tr/dosyalar/trabzonelektrik_3c43a.pdf

Karakuş, C. (2020). "Sinyaller ve Sistemler Sinyaller" [PowerPoint slaytı]. 12 Aralık 2024 tarihinde https://ckk.com.tr/ders/SignalsSystems/SS%2010%20Sinyaller.pdf adresinden erişildi.

Kırıkkale Üniversitesi (t.y.). Devre teorisi ve ölçme laboratuvarı II. Elektrik Elektronik Mühendisliği laboratuvar föyleri. (s. 1-5) Erişim: 20 Eylül 2024, https://panel.kku.edu.tr/Content/eem/labs/devre2/dtol2_deney_1.pdf

Kondansatör nedir? Ne işe yarar? (t. y.). Erişim adresi: https://www.entes.com.tr/kondansator-nedir-nerelerde-kullanilir/ (Erişim tarihi: 29.09.2024)

Kozak, M. ve Kozak, Ş., (2012) SDÜ "Enerji Depolama Yöntemleri". *SDU International Journal of Technologic Sciences,* 4 (2), 17-29.

Kuşdoğan, Ş., Kurt G., Arsoy, A., (2000). "Süperiletken Magnetik Enerji Depolama Sisteminin İncelenmesi ve Teknolojik Değerlendirmesi". *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu,* 8-12 Kasım 2000, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Bursa Şubesi, Bursa. 199-202.

Lu, X., Qu, H. & Skorobogatiy, M. (2017). "Piezoelectric Microstructured Fibers via Drawing of Multimaterial Preforms", *Scientific Reports,* 7 (2907), 1-12. (DOI:10.1038/s41598-017-01738-9).

Martins, R. S., Gonçalves, R., Azevedo, T., Rocha, J.G., Nóbrega, J. P. G., Carvalho, H., Mendez, S. L. (2014). "Piezoelectric Coaxial Filaments Produced by Coextrusion of Poly (Vinylidene Fluoride) and Electrically Conductive Inner And Outer Layers". *Journal of Applied Polymer Science,* 131 (17), 8749-8760. (https://doi.org/10.1002/app.40710)

Mattila, H., R., (2006). *Intelligent Textiles and Clothing*. Woodhead Publishing Limited: Cambridge.

MEB (2012). Elektrik-Elektronik Teknolojisi. *Osilatörler ve Filtre Devreleri* (s. 10) Erişim: 25 Kasım 2024, https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Osilat%C3%B6rler%20Ve%20Filtre%20Devreleri.pdf

MEB (2018) Elektrik-Elektronik Teknolojisi. *Doğrultmaçlar ve Regüle Devreleri* (s. 3-4) Erişim: 12 Ağustos 2024 https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller/Do%C4%9Frultma%C3%A7lar%20ve%20Reg%C3%BCle%20Devreleri.pdf

Mecit, D., Ilgaz, S., Duran, D., Başal, G., Gülümser, T. ve Tarakçıoğlu, I. (2007). "Teknik Tekstillerin Kullanım Alanları 1. Bölüm." *Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi*, 3 (2), 79-82.

Meriç, D. (2016). Akıllı Tekstillerin Ürün Tasarımında Kullanım Olanakları ve Moda Tasarımına Yönelik Uygulamalar. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Meriç. D. ve Üreyen, M. E. (2019). "Akıllı Tekstil Malzemelerinin Tekstil ve Moda Tasarımına Katkıları". *International Socıal Scıences Studıes Journal*, 5 (30), 535-545. (http://dx.doi.org/10.26449/sssj.1250).

Passive high pass filter. (t.y.). Erişim adresi: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_3.html (Erişim tarihi: 24.11.2024)

Piezoelektrik ile yürürken elektrik üret. (2021, 24 Temmuz). Erişim adresi: https://www.projehocam.com/piezoelektrik-ile-yururken-elektrik-uret/ (Erişim tarihi: 18.08.2024)

Piezoelektrik malzemeler ve uygulama alanları (2023, 25 Ekim). Erişim adresi: https://www.ceyrekmuhendis.com/piezoelektrik-malzemeler-ve-uygulama-alanlari (Erişim tarihi: 28.07.2024)

Piezoelektrik nedir? Kullanım alanları ve tarihçesi. (2023, 3 Kasım). Erişim adresi: https://www.aydemperakende.com.tr/blog/piezoelektrik-nedir-kullanim-alanlari-ve-tarihcesi (Erişim tarihi: 09.08.2024)

Piller nasıl yapılır? (2023, 21 Temmuz). Erişim adresi: https://www.products.pcc.eu/tr/blog/piller-nasil-yapilir/ (Erişim tarihi: 18.08.2024)

Rezonans nedir? (t.y.). Erişim Adresi: https://www.entes.com.tr/rezonans-nedir-olumsuz-etkileri-nelerdir/. (Erişim tarihi: 07.10.2024)

Rezonans nedir? Etkileri nelerdir? (2024, 28 Mart). Erişim Adresi: https://malzemebilimi.net/rezonans-nedir-etkileri-nelerdir.html#:~:text=Mekanik%20rezonans%2C%20bir%20sistemin%20do%C4%9Fal,titre%C5%9Fim%20yapmas%C4%B1%20durumunda%20ortaya%20%C3%A7%C4%B1kar. (Erişim tarihi: 10.10.2024)

Rezonans nedir? Ne işe yarar? Olumlu veya olumsuz etkileri nelerdir? (t.y.). Erişim Adresi: https://tense.com.tr/tr/rezonans-nedir-ne-ise-yarar-olumlu-veya-olumsuz-etkileri-nelerdir/ (Erişim tarihi: 10.10.2024)

RMS (etkin değer) ve ortalama değer. (t. y.). Erişim adresi: https://www.acdc.com.tr/tr/bilgi_merkezi.htm?id=28&key= (Erişim tarihi: 10.07.2024)

Smart textile, smart clothing (2022, 28 Şubat). Abiteks Blog. Erişim: 28 Kasım 2024, https://www.abiteks.com.tr/blog/smart-textile

Seçer Esmer, S. (2021). Kendi pilimizi yapalım. *Bilim Genç.* (s.1-5) Erişim :18.10.2024, https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/kendi-pilimizi-yapalim

Selek, H. S. (2006). *Doğru Akım (DC) Devre Analizi*. Seçkin Yayıncılık 5. Baskı: Ankara.

Selek, H. S. (2008). *Analog Elektronik 1*. Seçkin Yayıncılık: Ankara.

Signal Processing Basics (2024, 21 Haziran). Erişim Adresi: https://medium.com/@ChanakaDev/signal-processing-basics-67a06d9ff92f (Erişim tarihi: 10.08.2024)

Teknik tekstiller nedir, kullanım alanları, özellikleri. (2012). Tekstil Sayfası. Erişim: 15 Ekim 2024, https://tekstilsayfasi.blogspot.com/2012/12/teknik-tekstiller-kullanm-alanlar.html (Erişim tarihi: 04.02.2024)

UİB (2021). *Teknik Tekstiller Raporu*. Erişim: 15 Mart 2024, https://uib.org.tr/tr/kbfile/teknik-tekstil-raporu

Van Langenhove, L., Puers, R., & Matthys, D. (2005). “Textıles For Protectıon”. R. A. Scoot (ed.). in: *Intellıgent Textıles For Protectıon*. (pp. 176–195). Woodhead Publishing Limited in Association with The Textile Institute, U.K.

Wang, Y., Shi, Y. & Narita, F., (2021). “Design and finite element simulation of metal-core piezoelectric fiber/epoxy matrix composites for virus detection”. *Sensors and Actuators A: Physical*, 327, 1-8. (https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112742)

Yan, W., Noel, G., Loke, G., Meiklejohn, E., Khudiyev, T., Marion, J., Rui, G., Lin, J.,Cherston, J., Sahasrabudhe, A., Wilbert, J., Wicaksono, I., Hoyt, R.W., Missakian, A., Zhu, L., Ma, C., Joannopoulos, J., & Fink, Y. (2022). “Single fibre enables acoustic fabrics via nanometre-scale vibrations”. *Nature*, 603, 616-623. (https://doi.org/10.1038/s41586-022-04476-9)