



# **BİDGE Yayınları**

Mühendislikte Yenilikçi Teknolojiler ve Sürdürülebilir Çözümler

**Editör:** Doç. Dr. Bilal Tütüncü

ISBN: 978-625-372-571-6

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2024

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

[www.bidgeyayinlari.com.tr](http://www.bidgeyayinlari.com.tr) - [bidgeyayinlari@gmail.com](mailto:bidgeyayinlari@gmail.com)

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /  
Ankara



# İçindekiler

Uzaktan Hasta Takip Sistemleri: EKG, Nabız ve Solunum İzleme.	4
Ahmet TURAN .....	4
Kompleks Güç Sistemlerinin Korunmasında Mikroişlemci Bazlı Dijital Yönlü Aşırı Akım Koruma Rölelerinin Kullanımı ve Sağladığı Avantajlar.....	45
Alişan AYVAZ.....	45
3d Yazıcı Tasarımı .....	60
Ayşe ÇİÇEK.....	60
Muhsin Uğur DOĞAN .....	60
Uğur ÖZERÇİN .....	60
Yapay Zeka ve Gerçek Zamanlı Görüntü İşleme ile Konteyner Tespitinin Yapılması.....	92
Emir Enes TAŞ.....	92
Nato Aktarma Test Kiti.....	102
Fırat Tokmak .....	102
Octave Ortamında Gürültülü Ses Sinyallerinin Filtrelenmesi ve Spektral Analizi.....	114
Gizem FIRAT.....	114
Fırçasız Doğru Akım Sürücülerindeki Komütasyon Akım Salınımının İyileştirilmesi.....	135
Mehmet KARAYEL.....	135
Tevfik ATAMAN.....	135

# BÖLÜM I

## Uzaktan Hasta Takip Sistemleri: EKG, Nabız ve Solunum İzleme

**Ahmet TURAN<sup>1</sup>**

### Giriş

Teletıp hizmetleri ile hastaların uzman doktorlar tarafından uzaktan izlenmesi için sistemler geliştirilmiştir. Verileri gerçek zamanlı doktorlara bildiren, görüntüleyen ve grafiğini çizdiren dinamik web uygulamaları geliştirilmiştir (Rithic, Narendran, & Marimuthu, 2021). Teletıp, farklı mekânlarda bulunan hasta ve doktorların iletişim teknolojileri ve özel tıbbi donanımlar kullanılarak bir araya getirilmesidir. Özellikle kronik hastaların ve uzun süreli takip gerektiren şikâyetlerde tele-tıp uygulamaları oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Evde bakım uygulamaları, tele-tıp'ın içinde her yaşta insanın hastane ortamından uzak, sosyal yaşamları içinde sağlık durumlarının izlenmesini ve tedavisini sağlamaktadır (Özkaraca,

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, [ahmet.turan@samsun.edu.tr](mailto:ahmet.turan@samsun.edu.tr) Orcid:0000-0001-5653-9695

2013). Böylece doktorların sorumlu oldukları hastalarını ziyaret etmeden takip ederek iş zamanından tasarruf etmeleri ve çok sayıda hastanın takibinin kolaylaşması sağlanmaktadır. Hastalara ait veriler veri-tabanında saklanmak üzere web sunucusuna gönderilir ve akıllı cihazlar kullanılarak web sayfasındaki veriler her zaman ve her yerde görüntülenebilir ve herhangi bir anormal durum karşısında doktor uyarılır (Uzun, 2016). Akıllı sağlık sistemi ile yapılan bu çalışmalarda, hastaların; Kalp Atış Hızı, elektrokardiyogram (EKG), oksijen doygunluğu (SpO2) ve vücut Sıcaklığı gibi bilgileri toplanıp kaydedilir (Rithic, Narendran, & Marimuthu, 2021; Uzun, 2016]. Salgın hastalıkların artmasıyla birlikte teletıp kavramı ve bunun Nesnelerin İnterneti (IoT) ile birleşimi mühendislikte önemli bir konu haline gelmiştir (Mansoori, Siavashi & Majidi, 2021). Nesnelerin interneti'ndeki (IoT) son gelişmeler, sürekli sağlık hizmeti monitörlerinin verileri kısmen işlemesine ve iletmesine olanak sağlamıştır (Özyener & Gür, 2002). Teletıp ve nesnelerin interneti (IoT) kavramları oldukça gelişmiştir. Sağlıkta IoT sistemine örnek olarak; kalp sinyalini algılayıp kalp atışındaki aritmiyi akıllı sinyal işleme yöntemlerini kullanarak tespit eden ve internet üzerinden hasta veya doktorun bir yakınına bilgi veren sistemler geliştirilmektedir [3,6].

Özellikle kardiyovasküler hastalıklar dünya çapında ani ölümlerin başlıca sebeplerindendir (Rahman, Nabeed & Rahman, 2021). Kalp krizi geçiren hastanın donanımlı bir hastaneye getirilmesi için geçen zaman yaklaşık bir ila dört saat arasında değişmektedir. Uzak bölgelerde yaşayan insanların sağlık tesislerine erişimi kolay olmamaktadır (Rithic, Narendran & Marimuthu, 2021). Çoğu durumda hastalar, trafik, hızlı ulaşım hizmetinin yetersizliği gibi çeşitli sorunlar nedeniyle hastaneye hızlı bir şekilde ulaştırılamamaktadır. Bu nedenle evlerde kullanılabilecek mobil EKG izleme sistemleri geliştirilmiştir (Ghadge, Jadhav &

Mahalakshmi, 2019). Ayrıca hastanelerin aşırı kalabalıklaşmasını önlemek için de uzaktan izleme ve takip sistemleri geliştirilmektedir (Rithic, Narendran & Marimuthu, 2021). EKG kaydı normalde hastanın saatlerce veya günlerce hastanede kalmasını gerektirebilir. Taşınabilir veya EKG telemetri cihazları, hastaların EKG'lerini izlemelerine, EKG verilerini kaydetmelerine ve hastaneye aktarmalarına olanak sağlamaktadır. Aktarılan veriler herhangi bir anormallik olması durumunda sağlık merkezlerinde işlenir (Özyener & Gür, 2002). Bu sistemlerle hastaneye gidemeyen kişilerin uzaktan takibi yapılabilecek ve günlük hayatta hastaların izlenimi gerçekleştirilebilecektir (Yakut, Solak & Bolat, 2018). Sağlık izleme sistemleri iyi bir yaşam kalitesi sağlayabilir. Sağlık koşullarının sürekli izlenmesi önemli bir durumdur. Vücut üstü sensörler kullanılarak kan basıncı, anemi, kişinin pozisyonunu (düşmesi durumunda) gibi durum tespiti yapılabilir. Sensörlerden herhangi biri bizim vermiş olduğumuz parametrelerin dışına çıkarsa ambulansa, hastaneye veya hasta bakıcıya mesaj gönderecek ve aynı zamanda bir ekranda ilaç isimlerini görüntüleyerek teşhis koyacaktır (Kavya & Kumar, 2020).

Biyolojik sinyallerin gerçek zamanlı analiziyle, hastaya, doktora, bakıcıya, bir sağlık kuruluşuna hastanın durumu hakkında bilgi verilir. Hastanın genel durumunu belirli bir zaman aralığında ortaya çıkarmak için istatistiksel yöntemler kullanılarak verilerin ayrıntılı analizine olanak tanıyan toplu veri işleme gerçekleştirilir. Örneğin hastaların uyku düzenleri kolaylıkla ölçülebilir. Bu tür basit ve uygun maliyetli sistemler kullanılarak daha iyi tedavi imkanları sağlanabilir (Saleem & ark., 2020). Günümüzde pek çok insan akciğer ve kalp fonksiyon bozuklukları gibi sağlık sorunları yaşamaktadır. Bu sorunlar, ilerlemeden önce hastalıkları kontrol etmenin yanı sıra, hastanın sağlığını korumak için sıklıkla gözetim ve takip gerektirir. Bunun için, özellikle vücut sıcaklığı, SPO, kalp

atış hızı ve EKG gibi dört yaşamsal belirtiyile ilgilenen uzaktan hasta gözetim sistemleri tasarlanıp geliştirilmektedir (Rithic, Narendran & Marimuthu, 2021; Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). Hastanın standardize ve kontrol edilebilir bir ortamda, bisiklet, koşu-bandı, su tankı vb. aletleri kullanarak egzersiz sırasında kalp (EKG, nabız, vd.), dolaşım (arteriyel O<sub>2</sub> satürasyonu) ve solunumsal (VO<sub>2</sub>, VCO<sub>2</sub>, VE, vd.) parametreler ölçülür ve izlenir (Sugandi & ark., 2020). Kalp rahatsızlığı olan kişilerin takibi ve teşhisinin konulmasına yardımcı telemetri sistemleri geliştirilmiştir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021; Oktay, 2019; Çiftçi, Şen & Akkaş, 2021). Bu sistemler Sensörlerden (EKG, nabız, sıcaklık, hareket vb.) alınan verilerin anlık bir şekilde kaydedilmesini sağlar. Bu tür sistemlerde sensörler aracılığıyla okunan veriler, mikrodenetleyiciler ve WIFI vb. haberleşme sistemleri kullanılarak ana sunucuya aktarılmaktadır (Demirtaş & ark., 2018).

Modern Holter cihazları; tıpta, araştırmada veya sporda kullanılmaktadır. Daha küçük, daha akıllı, daha ucuz ve düşük güç tüketimine sahip olacak şekilde hızla gelişmektedir. Günlük yaşamı sınırlandırmadan, doğal bir ortamda, doktor kontrolü olmadan sinyal ölçümü yapılabilmektedir (Vavrinsky & ark., 2020; Bakiya, Kamalanand & Britto, 2021). Giyilebilir olarak tasarlanan bu tür sistemlerle, hastaların, uzaktan takipleri mümkün olmaktadır (Demirtaş & ark., 2018). Uzaktan sağlık takibi ve erken uyarı sistemleri, acil bir durum gerçekleştiğinde hastayı ve doktorları bilgilendirmektedir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). Biyomedikal veriler, mobil cihazlar ve bilgisayarlar üzerinden sisteme bağlanan sağlık personeline ulaştırılmaktadır (Demirtaş & ark., 2018). Fizyolojik sinyaller veri tabanlarına ve akıllı telefonlara aktarılarak, oluşturulan uygulama ile hastalar ve doktorlar tarafından gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). Zaman açısından verimli ve düşük maliyetle bir sporcunun kalp atış

hızını giydiği bir kemerle takip etmek mümkündür (Dündar & Aydın, 2021). EKG işaretinin uzaktan izlenmesi özellikle ne zaman ortaya çıkacağı bilinmeyen ritim bozukluklarının tipini belirlemede yararlı olacaktır. Uzaktan EKG takibinin bir diğer faydası ise çalışırken, yürüyüş veya spor esnasında, günün belirli saatlerinde ortaya çıkan ağrıların bir damar hastalığına bağlı olup olmadığını belirlemede etkili olmasıdır (Rithic, C.H., Narendran, S. & Marimuthu C., (2021)) .

Elektrokardiyografi (EKG) sinyalleri fizyolojik sinyaller arasında büyük öneme sahiptir ve çeşitli kalp hastalıklarının teşhisinde uzmanlara yardımcı olmaktadır (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). Bu ciddi sorun, kalbin durumunun düzenli olarak izlenmesiyle önlenabilir (Rahman, Nabeed, & Rahman, 2021; Vavrinsky & ark., 2020; Passler, Müller & Senner 2019). Elektrokardiyogram, kliniklerde hacimli ve sabit aletler kullanılarak gözlenir. EKG verilerini toplamak için genellikle on iki elektrot kullanır. Ekipmanın taşınabilir olması pek olası değildir. Bu da veri toplama döneminde, hastaların aktivitelerinin ciddi şekilde sınırlar. Bu cihazlar bireysel kullanım için çok pahalı olduğundan, hastaların sık sık hastaneye gitmeleri gereklidir ve bu da kaçınılmaz olarak hastane yükünü ve maliyeti artıracaktır. Bu nedenle, düşük maliyetli uzun süreli EKG sinyali takibi için taşınabilir bir sisteme ihtiyaç vardır (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). Bu noktada giyilebilir sistemler, evde bakım uygulamaları için de önem kazanmıştır (Rithic, Narendran & Marimuthu, 2021) . Giyilebilir ve kablosuz Elektrokardiyograf (EKG), pratik nedenlerden dolayı uzun süreli izleme için yaygın olarak kullanılmaktadır (Sugandi & ark., 2020).

## Kardiyovasküler Sistem

Sistem biyolojisi; hesaplamalı modeller ve zaman serisi analizlerinin yardımıyla, kardiyovasküler sistem gibi biyolojik sistemler içindeki



karmaşık etkileşimlere odaklanan, disiplinler arası bir çalışma alanıdır (Ernst, 2017). İnsan vücudunun dokularında; Oksijen, karbondioksit, besin maddeleri ve diğer çeşitli hayati maddeler, kapalı bir dolaşım sisteminde dolaşan kan tarafından taşınır (Uymaz, 2022). Kardiyovasküler sistemin asıl görevi başta oksijen olmak üzere dokuların ihtiyacı olan maddeleri dokulara ulaştırmak, dokularda oluşan başta karbondioksit olmak üzere atık maddeleri o dokudan uzaklaştırmaktır (Habte & ark., 2019). Kardiyovasküler sistem dinamiğinin önemli yönlerinden birisi düzensizliğidir. Bu düzensizliğin kökeni konusunda fikir birliği yoktur ve halen aktif olarak tartışılmaktadır. Kalp atış hızı değişkenliğindeki karmaşıklığın, solunum sistemi ve dolaşım sisteminin kaotik yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir (Ishbulatov & ark., 2022; Karavaev & ark., 2019).

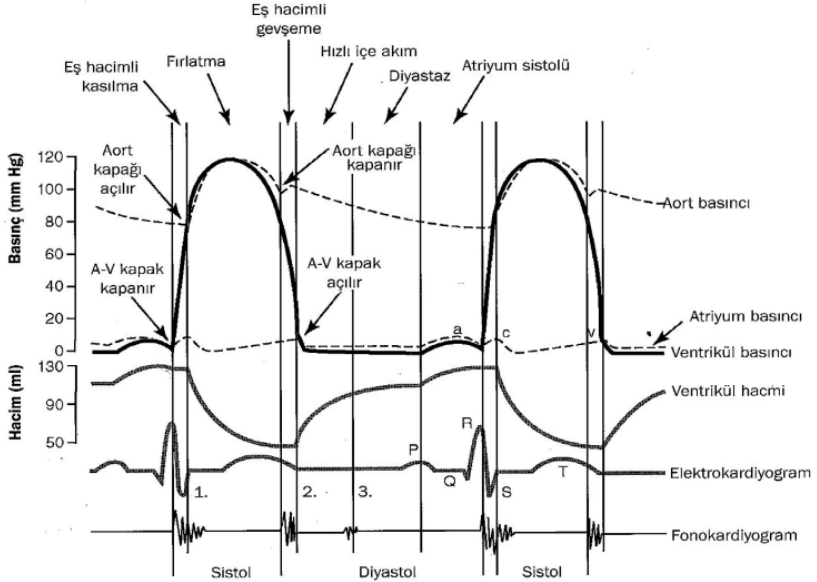
Fiziksel aktivite esnasında kalp, dolaşım ve solunum sistemlerinin fizyolojik düzenekleri uyum içerisinde çalışarak, kasılan kasların artan enerji ihtiyacını karşılaması gerekir. Fiziksel aktivite kardiyovasküler ve pulmoner sistemde bir stres oluşturur. İki sistemin bu yeni duruma uyum sağlaması sağlıklı olmanın bir ölçütüdür. Artan metabolizma hızı dolayısıyla kaslara O<sub>2</sub> akışının uygun oranda yükselmesi gerekir. Aynı anda da kaslarda artan CO<sub>2</sub> üretiminin de akciğerlere ulaştırılıp atmosfere verilmesi gerekir. Bunun için akciğerler, pulmoner dolaşım, kalp ve periferik dolaşımın çalışmasında tam bir uyum olmalıdır (Sugandi & ark., 2020). Bu ayarlama; kalp hızı, atım volümü, kalp debisi, kan basıncı, oksijen tüketimi üzerinde gerçekleşir (Habte & ark. 2019).

### **Kalp Yapısı ve Çalışması**

Kardiyopulmoner sistem, insan vücudundaki dokulara besin ve oksijen taşıyan ve dokulardan karbondioksiti uzaklaştıran kan damarlarından oluşur. Kan kalpten atardamarlar yoluyla taşınır ve

toplar damarlar kanı kalbe geri taşır. Kalp üstte iki odadan (sağ ventrikül ve sol ventrikül) ve altta iki odadan (sağ atriyum ve sol atriyum) oluşur. Atrioventriküler kapaklar atriyumları ventriküllerden ayırır. Kan akciğerlerde oksijeni alır ve karbondioksiti dışarı atar. Kan, pulmoner ven yoluyla kalbe geri döner. Sistemik dolaşımında aort, oksijenli kanı kalpten kılcal damarlar yoluyla vücudun diğer bölgelerine taşır. Vena kava (en büyük toplardamar), oksijeni alınmış kanı vücudun diğer kısımlarından kalbe taşır (Bakiya, Kamalanand & Britto, 2021).

Şekil 2.1’de P dalgası, atriyumların depolarizasyonunu gösterir. P dalgasından hemen sonra atriyumlar kasılır ve atriyum basıncı eğrisinde hafif bir yükselme şeklinde görülür. P dalgasının başlangıcından yaklaşık 0.16sn sonra QRS dalgaları görülür ve bu dalgalar ventrikülün depolarizasyonunu göstermektedir. Depolarizasyonla birlikte kasılma da başlar ve ventrikül basıncı da yükselmeye başlar. Son olarak görülen T dalgası ise ventriküllerin repolarizasyonunu ve gevşemeye başladığı zamanı gösterir. Kan sürekli olarak kalbe gelen büyük venlerden atriyumlara ve bunun %80’i de doğrudan ventriküllere geçer. Kalan %20’si atriyumların kasılmasıyla ventriküllerin geri kalanını doldurur. Atriyumlardaki basınç değişiklikleri: A dalgası, atriyumların kasılması sonucu oluşur. C dalgası, ventriküllerin kasılması sonucu AV kapakların geriye doğru esnemesiyle oluşur. V dalgası ise, AV kapaklar kapalı iken kanın venlerden atriyumlara yavaşça akmasına bağlıdır. Sistol sonrası AV kapaklar açıldığında atriyumlarda biriken kan, ventrikül hacim eğrisindeki yükselmeyle de görüldüğü gibi, ventriküllerin hızlı dolma dönemi de denilen diyastolün 1/3’lük kısmını kapsar. Sol ventrikülün işlevi ile ilgili olarak kalp döngüsünde ortaya çıkan olaylar; Sol atrium basıncı, sol ventrikül basıncı, aort basıncı, ventrikül hacmi, elektrokardiyogram ve fonokardiyogramdaki değişiklikler görülmektedir (Şentürk, 2013).



Şekil 2.1. Elektrokardiogramın kalp döngüsü ile ilişkisi (Şentürk, 2013).

Kalpte uyarımın yayılması, kalp hücreleri tarafından aksiyon potansiyeli (AP) oluşumunu ve bunun çok hücreli dokuda yayılmasını içerir. AP iletimi, hücreler arası elektriksel aktivite, elektriksel hücreler arası iletişim ve kalp dokusu yapısı arasındaki karmaşık etkileşimlerin sonucudur. Uyarım, tek tek hücreler tarafından aksiyon potansiyelinin (AP) üretilmesini ve bunun hücreler arası boşluk bağlantıları yoluyla hücreden hücreye iletilmesi şeklindedir. AP üretimi, doğrusal olmayan hücre zarı iyonik akımları ile hücrenin iyonik ortamı arasındaki karmaşık etkileşim yoluyla gerçekleştirilir. Son yıllarda kalp elektrofizyolojisindeki temel araştırmaların önemli bir kısmı, bu akımları ileten iyonik kanalların ve taşıyıcıların yapısı, kinetik özellikleri, düzenlenmesi ve alt tiplerinin incelenmesi şeklinde olmuştur (Kleber & Rudy, 2004).

## **Kardiyovasküler Hastalıkları**

Kardiyovasküler hastalıklar (KVH) en ölümcül hastalıklar arasındadır ve bunların hafifletilmesi sağlık hizmetlerinde oldukça yüksek maliyetlerdir (Özkaraca, 2013; Kouekeu & ark. 2022; Wessel, Riedl & Kurths 2009). Nüfus artışı ve toplumun yaşlanmasıyla birlikte kardiyovasküler hastalıkların görülme sıklığı da artmıştır (Wessel, Riedl & Kurths 2009). Kardiyovasküler hastalıklar (KVH); koroner kalp hastalığı, felç, geçici iskemik atak, periferik arter hastalığı ve aort hastalığı gibi kalple ilgili hastalıklar bütünüdür. Kalp krizi, kalp yetmezliği ve aritmiler KVH'lar olarak bilinmektedir. Aritmi, kalp ritminin anormal ve düzensiz olduğu bir durumdur. Yaş, kondisyon aktivitesi, kolesterol seviyesi, diyabet, KVH'lar, vücut büyüklüğü, vücut pozisyonu gibi birçok faktör bireyin kalp atış hızını etkileyebilir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). İnsan nüfusunun giderek yaşlanması ve kalp rahatsızlıklarının artışı, tedavi sürecinde ve öncesinde kalbi sürekli kontrol altında tutarak, tüm etkileri gözlemlene ihtiyacını doğurmuştur (Türker, 2018). Kalp sağlığının takibi insan sağlığının da takibi anlamına gelmektedir (Rithic, Narendran & Marimuthu, 2021) . Bu nedenle, mühendisler tarafından çeşitli hastalıkları teşhis etmek ve incelemek için tıbbi cihazlar geliştirilmektedir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021).

EKG sinyalinin morfolojisinde hastalık veya rahatsızlığın bulunmadığı kalp ritmine, Normal sinüs ritmi (NSR) denir. NSR'nin kalp hızı genellikle dakikada 60 ile 100 atışla karakterize edilir. Kalp atış hızı dakikada 100 atışın üzerine çıktığında, ritim sinüs taşikardisi olarak bilinir. Bu bir aritmi değil, daha yüksek kan dolaşımı gerektiren kalbin normal bir tepkisidir. İnsan kalbindeki aritmi hastalıkları kalbin normal çalışma düzeninden farklı olarak çalışmasıdır. Kalp atış hızı çok yavaşsa, bu bradikardi olarak bilinir ve bu hayati organları olumsuz yönde etkileyebilir. Kalp atış hızı çok

yüksek olduğunda, ventriküller, pompalama veriminin düştüğü kasılmadan önce perfüzyonu olumsuz yönde etkileyen tam olarak doldurulmaz (Wanyenze, 2019; Şentürk, 2013). Aritmi, kalp hızının düzensizliğidir ve kalp ritminde anormallik oluşmasına sebep olur (İzci & ark., 2020). İnsanlarda kısa süreli, spontan kalp atış hızı değişkenliğinin (HRV) nedeni belirsizliğini koruyor (Togo & Yamamoto 2001). Kalp atış hızı değişkenliği (HRV), otonom sinir sistemindeki dengesizliklerin sonucu olarak da ifade edilir. HRV ayrıca beyin ve kardiyovasküler sistem arasındaki karmaşık etkileşimin bir sonucu olarak ta ortaya çıkmaktadır (Ernst, 2017). Kalp atım hızı değişikliğinin belirlenmesi, çeşitli kalp bozukluklarının belirlenmesi için önemlidir. Kalp hızı değişikliği, EKG işaretleri üzerindeki ardışık QRS kompleksleri arasındaki zaman farkının değişimi ile algılanmaktadır (Bilgin, 2008). Kardiyak aritmilerin başlangıcını, gelişmesini ve sonlanmasını yöneten mekanizmaları anlamak, bunları kontrol etmeye yönelik yeni stratejiler geliştirmek ve daha da iyileştirmek için çok önemlidir (Bittihn & ark., 2017). Birçok kardiyak aritminin altında yatan etken kalp kasındaki özel bir sinyal iletim şeklidir. Yayılan uyarı dalgasının eğriliği ve bir önceki dalganın repolarizasyon kuyruğu ile etkileşimi oldukça önemli belirleyici bir etkendir (Kleber & Rudy, 2004).

### **Solunum Sistemi ve Akciğerler**

Vücudumuzdaki milyarlarca doku hücresi, soluduğumuz havadan doğrudan gaz alışverişi yapamayacak kadar uzakta bulunur ve bunun yerine kan, oksijeni hücrelere dağıtır. Bu, oksijenin nefes alma sırasında buruna veya ağza ilk girdiği yerde, aldığımız her nefeste meydana gelir. Hava gırtlak ve trakeadan geçerek iki bronşa ayrılır. Her bronş iki küçük dala ayrılarak bronş tüplerini oluşturur. Bu tüpler akciğer içinde çok sayıda yol oluşturur ve sonunda alveol adı

verilen küçük keseciklerle sonlanır (Jiyuan, Kiao & Goodarz, 2017). Akciğerlerdeki alveoller, akciğer toplardamarına giden kılcal damarlar yoluyla oksijen ve karbondioksitin transferinden sorumludur (Raj & ark., 2020). Gaz değişimi, oksijenin (O<sub>2</sub>) karbondioksit (CO<sub>2</sub>) karşılığında akciğer kılcal damarlarına yayıldığı alveollerde gerçekleşir. Gaz değişiminden sonra nefes verme başlar ve CO<sub>2</sub> içeren hava, bronşiyal yollardan dönüş yolculuğuna başlar ve burun veya ağız yoluyla dış ortama geri döner (Jiyuan, Kiao & Goodarz, 2017).

Solunum hızı hastalık değerlendirmesi için kullanılan temel bir klinik ölçümdür (Drummond, Fischer & Arvind, 2020). Giyilebilir platformlar ve optik bir yaklaşımla solunum hızı ölçümü yöntemi geliştirilmiştir. Optik yaklaşımda, cilt üzerine doğrudan temaslı kaynaktan dağılan ışık, karşı tarafta bir sensör tarafından algılanır. Dağılan ışıkta, soluk alıp verilirken cildin gerilmesine karşılık gelen bir titreşimsel bileşen oluşur. Bu bilgiden nefes alıp verme durumu algılanır (Singh & ark., 2020). Çalışılan giyilebilir sistemlerin çoğu yalnızca solunum hızını ölçer. Hem solunum hızını hem de hacmini yüksek doğrulukla aynı anda ölçebilen giyilebilir sistemler geliştirilmektedir. Düşük güçlü piezo dirençli sensörlerle ölçüm için ise nefes alırken göğüs kafesinin ve karın bölgesinin zorlanması kullanılır. Kablosuz veri aktarımıyla günlük ortamlarda kronik solunum yolu hastalıkları olan hastaların izlenmesi mümkün olabilmektedir (Chu & ark., 2019).

Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı (KOAH) sırasında kişi anormal oksijen ve karbondioksit transferi nedeniyle düzgün nefes alamamaktadır. Düzensiz solunum sıkıntısı yaşayan hastalarda dakikada solunum bilgisinin izlenmesi gerekli görülür (Raj & ark. 2020). Cheyne-Stokes solunumu (CSR), çok az veya hiç nefes almama (apne) ve çok ağır bir şekilde nefes alma (hiperpne)

aralığıyla takip eden kısa aralıklarla karakterize edilen periyodik bir solunum şeklidir (Dong & Langford, 2008). Çeşitli fizyopatolojik stres faktörlerinin hassas bir belirteci olarak solunum frekansının (fR) öneminin anlaşılmasıyla, solunumun izlemesine ilgi artmıştır. FR izleme için farklı sensörlere ve teknolojilere dayanan çeşitli teknikler vardır (Massaroni & ark.ü 2021). Solunum hızı, farklı patolojik durumlara (örneğin olumsuz kardiyak olaylar, pnömoni ve klinik bozulma) ve duygusal stres, bilişsel yük, sıcak, soğuk, fiziksel efor ve egzersize bağlı yorgunluk gibi stres etkenlerine karşı duyarlı olan temel bir yaşamsal işarettir (Nicolo & ark., 2020). Uykuda meydana gelen solunum bozukluğunun, kardiyovasküler ve uyku-uyanıklık düzenleme sistemleri arasındaki etkileşimler incelenmektedir (Cheng & ark.ü 2010). Solunum sinüs aritmisinin (RSA) solunum dalga formuna bağımlılığını modelleme ve kardiyorespiratuar eşleşmenin altında yatan mekanizmalar araştırılmaktadır (Kapidzic & ark., 2014). EKG de R-R aralığının düzenliliği solunum döngüsüne göre biraz değişir (Wanyenze, 2019).

Solunum hızı, EKG kaydeden bir kol bandı sinyalinden türetilir. Kol bandı cihazı, birkaç gün sonra bile ciltte tahrişe neden olan kablolar veya hidrojel/yağıstırıcılar kullanmadığından uzun süreli (aylar, yıllar) izleme için oldukça uygundur. QRS eğimlerinin solunumla ilgili modülasyonuna ve R-dalga açısı yaklaşımına dayanan EKG'den türetilen bir solunum (EDR) testi elde edilebilir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar, solunumla ilgili modülasyonun, kronik solunum hastalıkları olan hastaların izlenmesi, epileptik nöbet tespiti dahil olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesine sahip olabilecek solunum hızını elde etmek için QRS eğimlerine ve R-dalga açılarına dayanan EDR yöntemiyle kullanılabilceğini göstermektedir (Lazaro & ark., 2021). Bazı çalışmalarda solunum sistemi RLC devre elemanları ile elektriksel modellenmiştir.

Böylece bazı deneyler ve çalışmalar model üzerinde geliştirilebilmektedir (Raj & ark., 2020).

### **EKG İşareti ve Nabız**

EKG (elektrokardiyogram) sinyalindeki tepeden tepeye aralıklar (iki R dalgası arası) arasında meydana gelen standart sapma değeri kalp hızı değişkenliği (KHD) olarak tanımlanır. KHD kalp atımları arasında meydana gelen aralıkların uzunluğundaki dalgalanmaların derecesidir. KHD ölçmek için Elektrokardiyografi (EKG), Fotopletismografi (PPG) ve Osilometrik yöntemler kullanılır (Uysal, 2017).

Sağlıklı bir insanda kalpteki ortalama atım sayısı 72atım/dk olarak belirlenmiştir Buna göre ortalama atım aralığı 833ms olup standart sapma 40ms şeklindedir (Uysal,2017). BPM (Dakika başına vuruş)'yi almak için nabız sensörü kullanan sistemler önerilmektedir (Vavrinsky & ark., 2020). Gürültülü Elektrokardiyogram (EKG) örneklerinden Dakika Başına Kalp Atım Sayısının (BPM) üretilmesi için Evrişimsel-Tekrarlayan (CNN-RNN) regresyon modeli aracılığıyla yazılım tabanlı yaklaşımlar da kullanılır (Beckingham, Spencer & McKay, 2023).

Fotopletismogram (PPG) sinyalleri kılcal damarlarda meydana gelen hacimsel değişikliklerin optiksel olarak ölçülmesi sonucunda elde edilen sinyallerdir. Kılcal damarlardaki hacimsel değişiklikler de kalbin çalışmasına bağlıdır. Yeni yapılan araştırmalar sonucunda PPG sinyallerinin kişinin fizyolojik ve biyolojik durumu ile ilgili birçok bilgi içerdiği görülmüştür. PPG sinyallerinin elde edilmesi kolaydır ve giyilebilir teknolojilere kolayca entegre edilebilir (Yıldırım, 2017).



İnsanlarda temel frekansı 0,1Hz'e yakın olan kalp atış hızının düşük frekanslı salınımları ile kan basıncı arasındaki senkronizasyon araştırılmaktadır (Karavaev & ark., 2009).

### **EKG Sinyalinin Özellikleri**

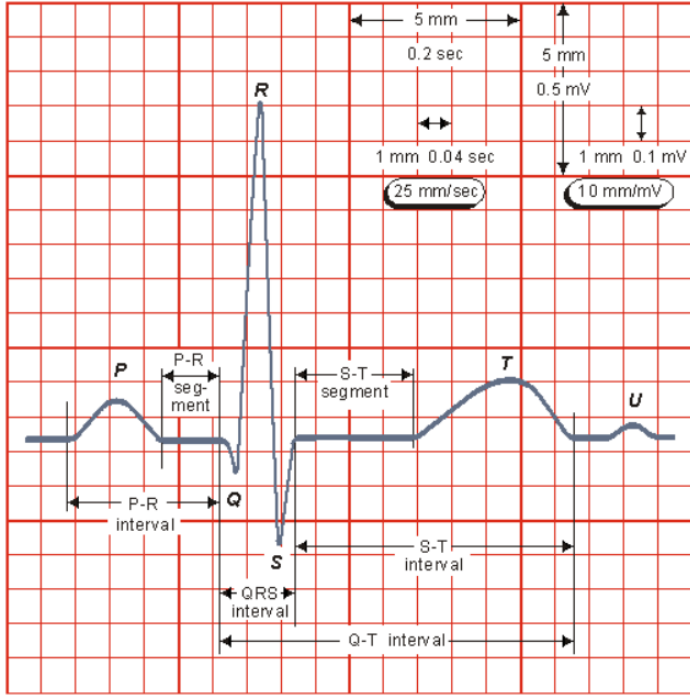
Biyomedikal sinyaller esas olarak belirli patolojik veya fizyolojik durumları teşhis etmek veya tespit etmek için kullanılır. Biyomedikal sinyallerin yaygın örnekleri elektrokardiyogram, elektroensefalogram ve elektromiyografidir (Habte & ark. 2019). Elektrokardiyogram (EKG) kalple ilgili bir elektronik kayıttır. Kalp atış hızı ve ritminin veya QRS kompleksinin şeklinde meydana gelen değişikliklerin tespit edilmesi için kullanılır (Alziarjawey, 2015). EKG'yi teşhis veya tedaviye yardımcı olarak kullanmadan önce temelleri anlaşılmalıdır. 'EKG', elektrokardiyogram veya elektrokardiyograf anlamına gelir. Kalp, kalbin atmasını sağlayan içsel elektriksel uyarılarla çalıştırılan bir pompadır. EKG, bu elektriksel aktivitenin kağıt üzerinde (veri olarak belleğe) kaydedilmesidir (Hampton & Hampton, 2019). Elektrokardiyogram (EKG), kalp hücreleri tarafından üretilen ve kalbin çalışmasını (atmasını) sağlayan ve kalbin elektriksel aktivitesi hakkında bilgi veren durağan olmayan biyomedikal işarettir. Kalbin işlevlerini yerine getirmesi sonucunda oluşan bir biyosinyaldir (Rahman, Nabeed, & Rahman, 2021; Yakut, Solak & Bolat 2018; Habte & ark., 2019). Aslında Elektrokardiyogram, kalp atışıyla ilişkili elektriksel olayların grafiksel bir tasviridir. EKG sinyali, kasılmalardan önce veya sonra meydana gelen kalp kasının ritmik elektriksel depolarizasyonunu veya repolarizasyonunu yansıtır (Dastidar & Panigrahy, 2021). Kalp kasının ve sinirsel iletim sisteminin çalışmasını incelemek üzere, kalpte meydana gelen elektrik faaliyetini gösterir (Rithic, Narendran & Marimuthu, 2021) .

Kalp aritmileri de dahil birçok kalp rahatsızlığının tespitinde kullanılan EKG sinyalleri hastane ortamında, bir sağlık personeli gözetiminde, vücuda elektrotlar yapıştırılarak elde edilmektedir (Yıldırım, 2017). Genellikle bir grup yüzey elektrotu tarafından toplanır. Kaydedilen sinyallerin izine elektrokardiyogram denir (Dastidar & Panigrahy, 2021). EKG kayıtları son zamanlarda küçük, kablosuz EKG vücut sensörleri ile elde edilmektedir. Bu sensör türleri ile zaman ve mekan bağımsız şekilde, otomatik, düşük maliyetli, gerçek zamanlı ve verimli EKG izleme, analizi ve kardiyovasküler bozuklukların teşhisi imkanı sunulmaktadır (Merdjanovska & Rashkovska, 2022).

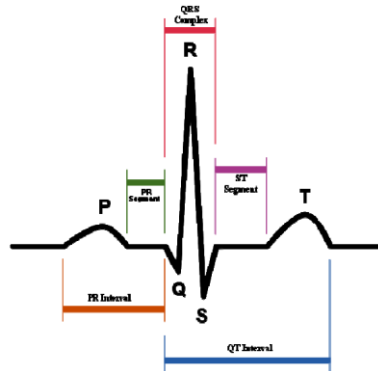
Elektrofizyolojik bilgi taşıyan bu işaret, kalbe ait hastalıkların teşhis edilmesi ya da kalbin durumunun izlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Yakut, Solak & Bolat, 2018). Kalp hastalıklarının araştırılmasında kullanılan bir teşhis aletidir. Özellikle ritim bozukluğunu tespit etmekle ilgili bulguları elde etmek için çok önemlidir (Alziarjawey, 2015). EKG sinyalinin hızlı ve kolay değerlendirilmesi, bu hastalıkların teşhisinde etkili bir tedavi yöntemi sunmaktadır (Wanyenze, 2019). Bilgisayar ortamına aktarılan EKG verileri üzerinden taşikardi, bradikardi ve aritmi rahatsızlıkları tespit edilmektedir (Şentürk, 2013; Alziarjawey, 2015; Dastidar & Panigrahy, 2021). EKG'ye Ait Bazı Aritmiler; Atriyal aritmi, Prematüre atriyal kasılmalar, Atriyal taşikardi, Atriyal fibrilasyon, Prematüre kavşaklı kasılmalar (PKK), Ventriküler aritmi, Prematüre ventriküler kasılmalar (PVK), Ventriküler taşikardi (VT), Atriyoventriküler bloklar (Wanyenze, 2019). Farklı zamanlarda kaydedilmiş EKG verileri kullanılarak aritmi tespiti elde edilebilir (İzci & ark., 2020). EKG, elektriksel uyarıların nerede başladığını ve kalpte nasıl aktığını kaydeder. Kalbin ne kadar iyi pompaladığını ölçmez. Elektriksel uyarıların kalpten geçme şekline iletim denir. Kalbin elektriksel aktivitesindeki

anormallikler, kalbin çok hızlı, çok yavaş ya da düzensiz atmasına neden olabilecek anormal iletim veya ritimlere neden olabilir. Kalpten geçen normal elektrik akışındaki değişiklikler EKG'de gösterilebilir ve hasar görmüş kalp kasının göstergesi olabilir. Kalp kası enfarktüs, hipertansiyon ve pulmoner emboli gibi birçok hastalık sürecinden zarar görebilir (Hampton & Hampton, 2019).

EKG sinyali temel olarak beş farklı sapma noktasına sahiptir;atriyal depolarizasyonu temsil eden P dalgası, bunu ventriküler kasılmayı temsil eden QRS kompleksi (Q, R ve S noktalarından oluşur) takip eder ve bunu bir dalga takip eder. Ventriküler depolarizasyonu gösteren T dalgası ve bazen ventriküler repolarizasyonun son kalıntılarını gösteren bir U dalgası (Dastidar & Panigrahy, 2021). Şekil 1'de görülen Normal Elektrokardiyogram; P dalgası, QRS kompleksi ve T dalgasından oluşur. Daha detaylı olan Şekil 2'de görüldüğü gibi; Normal bir EKG'de altı büyük dalga vardır. Bunlar; P,Q,R,S,T ve U dalgalarıdır. Kardiyak döngü boyunca oluşan olaylar farklı dalga morfolojileri oluştururlar. EKG'deki P atriyal depolarizasyonu, QRS kompleksi ventriküler depolarizasyonu gösterir ve bu nedenle bu dalgalar depolarizasyon dalgalarıdır. T dalgası ise ventriküler repolarizasyona gösterir ve bu nedenle bu dalgalar depolarizasyon dalgalarıdır (Yakut, Solak & Bolat, 2018; Öncü, 2008). U dalgası ise ventriküler repolarizasyonun terminal dönemini temsil eder. Atriyal repolarizasyon teorik olarak var olsa da, pratikte QRS kompleksi içinde kaldığı için izlenemez. İki kardiyak siklus arasında elektrik aktivitenin olmadığı zamanda yatay düzeydeki çizgiye izoelektrik hat adı verilir (Öncü, 2008).



Şekil 1. Normal Elektrokardiyogram (Şentürk, 2013).



Şekil 2. Normal EKG dalga örneği (Öncü, 2008).

EKG verilerinin taklit edilmesi veya kopyalanması zor olduğundan, bu veriler kişi tanımlama gibi biyometrik çalışmalarda diğer verilere göre daha avantajlı hale gelmektedir. EKG sinyallerine dayalı olarak bireyleri tanıma çalışmaları yapılmaktadır (Demir, 2021).

### **EKG, Nabız ve Solunum Sinyalinin Ölçme- Yükseltme- Sayısalılaştırma- Filtreleme ve Aktarılması**

Çalışmalarda genellikle kablosuz EKG alıcı tasarımı, mikrodenetleyici ara yüz tasarımı ve bilgisayar ara yüzü tasarımları yapılmıştır (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021; Oktay, 2019). Biyomedikal sensörlerden (EKG, nabız, sıcaklık, hareket vb.) alınan verilerin anlık bir şekilde kaydedilmesini sağlayan hasta takip sistemi geliştirilmiştir (Demirtaş & ark., 2018). Elektrokardiyogram (EKG) üç EKG elektrodu yardımıyla kaydedilmekte ve amplifikasyon sonrası filtrelenerek iletilmektedir (Bharathi, 2013). EKG cihazının girdisi vücut yüzeyinden elektrotlar vasıtası ile alınan kalbin üretmiş olduğu elektriksel işaretlerdir. Vücut yüzeyinden alınan bu işaretler zayıftır ve gürültü içermektedir. Kalbin çalışması sırasında oluşan bu işaretlerin güçlendirilip gürültüden arındırılması gerekmektedir. Gürültüden arındırılmış EKG işaretlerinin analiz edilerek tanı değeri taşıyan bilgiyi bu işaretlerden elde etmek ve doktorlara kalp rahatsızlıklarının teşhisi konusunda yardımcı olacak bir sisteme ihtiyaç vardır (Şentürk, 2013).

### **Sinyalin elektrotlarla okunması**

EKG sinyali vücuda yerleştirilen elektrotlar aracılığı ile algılanır (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021; Oktay, 2019). Bazı çalışmalarda sadece iki elektrot kullanılır: Sağ Kol (RA) ve Sol Kol (LA), Sağ Kol Tahrikli (RLD) adı verilen ek elektrot yoktur. RA ve LA'nın yanı sıra Ortak Mod Reddetme Oranını (CMRR) artırmak için RLD elektrotunu kullanan çalışmalarda vardır (Sugandi & ark., 2020).

Bazı çalışmalarda EKG, Nabız hızı, SPO2 ve sıcaklık sensörleri kullanılmıştır (Qunoot & Ali, 2020; Alsahi, Marhoon & Hamad, 2020).

### **Elektrotlardan gelen sinyalin EKG işaretine dönüştürülmesi ve güçlendirilmesi**

Hastadan elektrodlar aracılığıyla alınan analog sinyaller AD8232 EKG sensörü (Kalp Hızı Ölçer) yardımıyla algılanır. AD8232 tek uçlu kalp atışı sensörü, elektrodlardan ayrı ayrı gelen sinyalleri birleştirerek EKG sinyalini oluşturur. Vücut yüzeyinden alınan EKG işaretleri zayıftır ve işlenebilmesi için güçlendirilmelidir. Okunan sinyaller zayıf genlik değerlerinde olduğu için yükseltilmelidir. Elektrotlar aracılığıyla algılanan sinyaller mV seviyesindedir ve AD8232 entegresi içinde bulunan amplifikatör sayesinde Analog sinyal güçlendirilir (Mansoori, Siavashi & Majidi, 2021; Rahman, Nabeed & Rahman, 2021; Yakut, Solak & Bolat, 2018; Bilgin, Oktay & Bilgin 2021; Oktay, 2019; Uymaz, 2022; Şentürk, 2013). Algılanan EKG sinyalleri, biyoenstrümantasyon yükseltici devreleri ile yaklaşık 250 kat kuvvetlendirilir (Türker, 2018). Bazı devrelerde Amplifikatör bölümü, sinyali iletilebilecek şekilde 1000 civarında kazanç elde edilecek şekilde yükseltmek için kullanılır (Bharathi, 2013).

### **Sinyalin işlenecek mikrodenetleyiciye iletilmesi ve sayısallaştırılması**

Vücuda yerleştirilen elektrotlar aracılığı ile alınan sinyaller yükseltildikten sonra işlenebilir analog bir sinyale dönüştürür (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). Analog sinyaller Mikroişlemci yardımıyla sayısal işarete dönüştürülebilir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021; Oktay, 2019). Filtrelenen EKG işaretleri genellikle gömülü sistem analog dijital çeviriciler (ADC) kullanılarak sayısallaştırılır

ve bilgisayara aktarılır (Türker, 2018). Birçok çalışmada EKG sinyal işleme algoritmaları Raspberry Pi, Odroid, Beaglebone black, ESP 32, Arduino Nano vb. gömülü sistem kartlarında çalıştırılmıştır (Uymaz, 2022; Türker, 2018). Tercih hızla ilişkilendirilebilir örneğin bir Algoritma ESP32-WROOM-32 MCU @240MHz ve bir Arduino Nano MCU @16MHz üzerinde çalışırken sırasıyla 3,38µs ve 383µs sonuç zamanı üretmektedir. Hız gerekiyorsa ESP tercih edilir (Kouekeu & ark., 2022). Kablosuz giyilebilir sensör denetleyicisi için ESP32 kullanımı küçük yapısı dolayısıyla yaygındır (Qunoot, & Ali, 2020). Düşük güçlü 32 bitlik mikro denetleyici olan ESP32 de veri işlemek için, Bluetooth Classic (BT), Bluetooth Low Energy (BLE) kullanılır (Sugandi & ark., 2020). Mikroişlemci yardımıyla dijitale dönüştürülen sinyal, Bluetooth modülüne gönderilerek kablosuz veri iletimi sağlanır (Bilgin, Oktay & Bilgin, 2021). Sunucu olarak Raspberry Pi3 kullanılarak akıllı bir sağlık sistemleri uygulanır (Qunoot, & Ali, 2020).

### **Biyolojik sinyallerde (EKG) Gürültü ve Sinyalin sayısal filtrelenmesi**

Orijinal biyomedikal sinyalin ilave gürültüsü vardır ve doğrudan analiz edilemez. İlgili bilgiyi geliştirmek ve ortadan kaldırmak için biyomedikal sinyal işleme gerektirir (Karimipour & Homaeinezhad, 2014). Genel olarak biyolojik işaretler, birçok nedenden dolayı gürültü alabilen sinyallerdir. EKG işareti de düşük genlikli ve hassas bir işaret olmasından dolayı gürültü içermektedir. Bu problemten dolayı başka bir hastalık için anlamlı olabilecek işaret, EKG sisteminde EKG işareti için gürültü olarak kabul edilebilir. Literatürde bir işaretin teşhis ve izlenmesini engelleyen ve işareti bozan her türlü etki “Artefakt (gürültü)” olarak ifade edilmektedir. Artefaktlar genel olarak, fizyolojik ve fizyolojik olmayan artefaktlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Fizyolojik artefaktlar,

kaydedilmek istenen işaretin dışında, vücutta bulunan başka bir kaynaktan gelen gürültülerdir. Fizyolojik olmayan artefaktlar ise insan anatomisi dışında değişik faktörler tarafından üretilen gürültülerdir (Rithic, Narendran & Marimuthu, 2021) . Yüksek çözünürlüklü Holter EKG kayıtlarında artan yüksek frekanslı gürültüden, solunum ve postüral bakım kaslarının elektromiyogram sinyallerinin yakalanmasının sorumlu olduğu değerlendirilmiştir. Gece uykusu sırasında yüksek frekanslı bu gürültü azaldığı için bu sonuç doğru görülmektedir (Hoshino & ark. 2021). Yükseltme sonrası sinyal işlenebilir analog bir sinyale dönüştürülür (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021; Oktay, 2019). Ardından sayısallaştırılır gürültü ve parazitler filtrelenir (Uymaz, 2022). Sinyal kayıtlarına çeşitli sebeplerle gürültü işaretleri eklenmektedir. Bunların da sinyalden arındırılması gerekir (Şentürk, 2013). Birçok etken dolayısıyla bu sinyaller filtrelenir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021; Oktay, 2019). EKG sinyallerine etki eden çevresel etmenler ve şebeke gürültüsünün olumsuz etkisini bastırmak için filtreler kullanılır (Türker, 2018).

Biyolojik sinyallerde filtreleme, istenmeyen frekanstaki sinyal bileşenlerini ortadan kaldırır ve sinyal bileşenlerini istenen frekansta tutar. Genel olarak, çeşitli sinyal işleme uygulamaları için alçak geçişli filtre, yüksek geçiren filtre, bant geçiren filtre ve bant durduran filtre olmak üzere dört tip filtre mevcuttur (Bakiya, Kamalanand & Britto, 2021). Bazı uygulamalarda 50Hz'lik çentik filtre ve 0,01-132Hz frekans aralığında bant geçiren filtre uygulanmıştır (Türker, 2018). RC alçak geçiren filtre kullanılabilir (Bharathi, 2013). EKG işaretindeki çeşitli gürültüleri ortadan kaldırmak amacıyla IIR (Infinite Impulse Response) tabanlı farklı sayısal filtreler kullanılmıştır. Özellikle IIR tabanlı Butterworth, Chebyshev Tür 1, Chebyshev Tür 2 ve Elliptic sayısal filtreler kullanılmıştır (Yakut, Solak, & Bolat, 2018). Bir alçak geçiren filtre



(AGF) ve yüksek geçiren filtreden (YGF) oluşan bir bant geçiren filtre kullanıldığında bu QRS'nin çalıştığı frekans bandının dışındaki parazitlerin sinyalden uzaklaştırılmasını sağlar (Wanyenze, 2019).

Bilgisayar ortamında aktarılan EKG işaretleri MATLAB programı ile de işlenmektedir. MATLAB programı yardımıyla EKG sinyallerinin dijital filtreleme yöntemleri ile filtrelenmesi ve karar mekanizmasını oluşturulması mümkündür (Şentürk, 2013). Sayısal filtreleme için Pan ve Tompkins algoritmasının matematiksel ifadesi denklem (4.1 - 4.5) ile verilmiştir (Wanyenze, 2019). Alçak geçiren filtre denklem 4.1 ile yüksek geçiren filtre denklem 4.2 ile verilmiştir.

$$y(n) = 2y(n-1) - y(n-2) + x(n) - 2x(n-6) + x(n-12) \quad (4.1)$$

$$y(n) = y(n-1) - 1/32 (x(n) + x(n-16) - x(n-17) + 1/32 x(n-32)) \quad (4.2)$$

Filtrelemeden sonra, sinyal denklem 4.3'deki ifade kullanılarak QRS eğim bilgisini ayırt edilir.

$$y(n) = 1/8 [ 2x(n) + x(n-1) - x(n-3) - 2x(n-4) ] \quad (4.3)$$

Sinyalin, tüm veri noktalarını pozitif yapmak ve daha yüksek frekanslara için, giriş sinyalinin karesi alınır.

$$y(n) = x^2(n) \quad (4.4)$$

Dalga şeklinin özellik bilgisini elde etmek için denklem 4.5'deki gibi kayan pencere entegrasyonunu gerçekleştirir.

$$y(n) = 1/N [x(n-(N-1)) - (x(n-(N-2)) + \dots + x(n))] \quad (4.5)$$

Burada x(n) ve y(n) giriş ve çıkış sinyalleri, N; örnekleme oranına bağlı kayan pencerenin boyutudur (Wanyenze, 2019).

### **Elde edilen verilerin bilgisayara veya cep telefonuna iletimi**

Hastanelerdeki mevcut EKG cihazlarında, hastalardan alınan sinyaller kablolar vasıtasıyla monitöre aktarılmaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için de kablosuz elektrokardiyogram cihazları tasarlanmaktadır (Yakut, Solak, & Bolat, 2018). Sayısallaştırılarak filtrelenen sinyal kablo ile veya kullanılan gömülü sistem içeriğine göre Bluetooth, Wi-Fi, GSM Modülü vb. yöntemlerle bilgisayar veya cep telefonu ortamına iletilir (Uymaz, 2022). Uzaktan iletişim için sinyal frekans modülasyonundan sonra belli mesafelere FM sinyali olarak da iletelebilmektedir (Bharathi, 2013).

Elektrodlarla elde edilen ve sayısallaştırılan EKG bilgisinin Bluetooth kablosuz haberleşme standardında, cep telefonuna veya bilgisayara aktarımı oldukça yaygındır (Bilgin, Oktay & Bilgin, 2021; Oktay, 2019). Cep telefonuna aktarılan sinyaller oluşturulan yazılımında gerçek zamanlı görüntülenebilir kaydedilebilir ve GSM teknolojisi ile bir başka kaynağa aktarılabilir (Can, 2010). Android ara yüzü tasarımı ile kablosuz EKG alıcı devresi arasında Bluetooth bağlantısı sağlanarak EKG kayıt sistemi gerçekleştirilir (Bilgin, Oktay & Bilgin, 2021; Oktay, 2019). İçeriğinde bluetooth haberleşme özelliği bulunmayan mikrodenetleyiciler için HC06 bluetooth modülü kullanılabilir (Yakut, Solak & Bolat, 2018).

Biyomedikal sensörlerden alınan sinyaller, mikrodenetleyici tarafından sayısal verilere dönüştürülerek Wi-Fi modül ile bir sunucuya aktarılabilir (Demirtaş & ark., 2018). Wi-Fi teknolojisi, verileri kablosuz bir şekilde internet bağlantısı ile iletilmesine olanak tanıyan bir iletişim aracı olarak kullanılır (Rahman, Nabeed, & Rahman, 2021). Veri aktarımı birçok farklı ortama yapılabilir. Örneğin ESP32 mikrodenetleyicisi ile WI-FI'den bulut (cloud) sunucu sistemine aktarılabilir veya Atmel mikrodenetleyici ile işlenip IEEE 802.11 Wi-Fi modülü ile iletebilir. Algılanan veriler yazılım algoritmasına göre hastanın kalp atışı 10 saniye boyunca

120bpm ve üzeri ya da 40bpm ve altında kaydedildiğinde EKG verileri seçilerek Clouda kaydedilir. Aynı şekilde IOS ve MAC için Iclouda aktarmak mümkündür. Bu tür akarımlar için U116 GSM modülü gibi ek aparatların WIFI özelliğinden yararlanır. WIFI aracılığıyla veriler UBIDOTS platformuna aktarılarak analiz edilir ve belirlenen kişilere acil durumda SMS atılabilir (Qunoot & Ali, 2020; Uymaz, 2022; Demirtaş & ark., 2018). Projelerde algılanan biyosinyaller ESP32 gömülü sisteminden Wi-Fi ile Raspberry Pi üzerinde oluşturulan MQTT (Message Queuing Telemetry Transport-Mesaj Queuing Telemetri Aktarımı) sunucusuna (broker) aktarılabilir. Böylece kendi MQTT broker'ı oluşturarak verilere ulaşmak mümkün olacaktır (Mansoori, Siavashi, & Majidi, 2021). Elde edilen verilerde, bazı tıbbi sorunların tespit edilmesi durumunda veri Baz istasyonuna gönderilebilir. Ana kontrolör için ESP32 ünitesi kullanılır ve haberleşme için SIM800L GSM modülü kullanılabilir. Ayrıca SMS yoluyla hekimlere bilgi verilir (Alsahi, Marhoon & Hamad, 2020]. Bir android uygulaması ile TCP/IP protokolü üzerinden EKG verileri doktorun veya hasta yakınlarından birinin cep telefonuna bildirilerek gerçek zamanlı görüntülenebilir (Mansoori, Siavashi & Majidi, 2021).

### **EKG Sinyalinin Hastaya, Doktora, vb. İletilmesi.**

Mobil ve masaüstü cihazlara aktarılan biyomedikal veriler sisteme bağlanan sağlık personeline ulaştırılmaktadır. Ayrıca acil durumlarda gömülü sistem ve sunucu yazılımı ile ilgili birimleri uyarabilmektedir. Giyilebilir olarak tasarlanan bu tür sistemlerle hastaların günlük aktivitelerini engellemeden uzaktan takipleri mümkündür (Demirtaş & ark., 2018). Kayıt işleminin sonunda veriler hasta bilgileriyle birlikte hekim E-mail adresine yönlendirilebilir (Bilgin, Oktay & Bilgin, 2021; Oktay, 2019). Böylece bir sağlık uzmanı, hastanın kalp durumunu her an her

yerden kontrol edebilir ve gerekli adımları atabilir (Rahman, Nabeed & Rahman, 2021). Bu sayede, kişi günlük yaşamına devam ederek hastaneye gitmeden tıbbi verilerinin ilgili kurumlara gönderilmesini sağlamış olur (Can, 2010). Hasta bilgileri ve EKG dosyası bilgisayara kaydedilip hasta EKG grafiği çizdirilir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021).

### **Verilerin iletim formatı**

Tipik bir elektrokardiyogram izleme cihazı, büyük miktarda dijital veri üretir. Bu nedenle, EKG sinyal verilerinin sıkıştırılması çok önemlidir. GPRS ağı üzerinden verimli EKG sinyali iletimi için EKG sıkıştırma yöntemleri geliştirilmiştir (Boskovic, & Despotovic, 2005).

### **EKG, Nabız ve Solunum Sinyal Analizi Yöntemleri**

Elektrokardiyogram (EKG) kayıtları, insan kalbinin durumu için bir göstergedir. Çoğu kez Elektrokardiyografi (EKG) sinyalinin manuel analizi, kalp ritmindeki anormallikleri hızlı bir şekilde tanımlamak için yeterli değildir. Bu nedenle kayıtların otomatik analizi, sinyal işleme ve makine öğrenimi alanlarından çeşitli hesaplama yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir (Merdjanovska & Rashkovska, 2022; İzci & ark., 2020). QRS sinyalini gerçek zamanlı olarak TFT LCD ekranlarda gösterebilen cihazlar da tasarlanmıştır (Arslan & Tankut, 2018). Fakat EKG sinyallerinin yalnızca görüntülenmesi yeterli değildir. Bir uyarı sistemi oluşturmak için hayati öneme sahip EKG sinyallerindeki anormal durumların tespit edilmesi gerekmektedir (Bilgin, Oktay & Bilgin, 2021).

### **Kullanılan Yazılımlar**

Bazı çalışmalarda ara yüz yazılımı çok sayıda kütüphane desteği içerdiği için Python dili kullanılır. Ayrıca sinyal işleme algoritmalarını ve sinyali ara yüzde çizdirme işlemini

gerçekleştirirken daha hızlı işlem yeteneğine sahip C++ dili de kullanılır (Türker, 2018). Kullanılan yazılımda (Python vb.) bir karar ağacı algoritması aracılığıyla kalp atışının performansı akıllı bir süreçle değerlendirilir (Mansoori, Siavashi & Majidi, 2021).

### **Kullanılan Yöntemler**

PQRST tespiti için EKG sinyal analizinde; Dalgacık Dönüşümü (WF), Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ve Yapay Sinir Ağları (ANN) gibi Dijital Sinyal İşleme (DSP) teknikleri kullanılmaktadır. Bazı analizler EKG dalga şekli ve zaman arasındaki en yüksek ve alçak değerler arasındaki matematiksel ilişkileri bulmaya dayandırılmaktadır (Alziarjawey, 2015). QRS, P ve T dalgalarını tespit etmek için sürekli dalgacık dönüşümüne dayanan yöntemler geliştirilmiştir. QRS, P ve T dalgaları gürültüden, taban çizgisi kaymasından veya düzensiz kalp atışlarından ayırt edilebilir. Bu amaçla çeşitli veri tabanları kullanılmıştır. Uygulanan yöntemlerde QRS, P ve T dalgalarının tespiti ve sürelerinin belirlenmesi sonrası sonuçlar uzman hekim sonuçlarıyla karşılaştırılır (Yochum, Renaud & Jacquir, 2016). Elektrokardiyogram (EKG) sinyalindeki P-QRS-T dalgalarının gerçek zamanlı tespiti için birçok algoritma sunulmaktadır. Yüksek frekanslı gürültü filtreleme ve taban çizgisi gezinme azaltmayı içeren gerçek zamanlı sinyal ön işleme, ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) uygulanarak gerçekleştirilebilir. QRS kompleksinin gerçek zamanlı tespiti için sinyalin birinci dereceden türevine ve uyarlanabilir eşik ayarına dayalı bir yöntem kullanılabilir (Karimipour & Homaeinezhad, 2014).

Sayısallaştırılmış olan EKG sinyalini analiz etmek için Fourier dönüşümü uygulanarak frekans analizi yapılır (Türker, 2018). EKG sinyallerindeki anormal durumların tespit edilebilmesi için makine öğrenmesi tabanlı yöntemler kullanılmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak EKG sinyali üzerindeki gürültüler ön işleme süreci ile

giderilmekte ve öznitelik çıkarım işlemi yapılmaktadır (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). Bu amaçla sayısal sinyal işleme ve makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılması yorumlayıcıya büyük destek sunmaktadır (Wanyenze, 2019; Akpınar, 2021).

Gömülü sistem tabanlı taşınabilir bir Elektrokardiyografi (EKG) Holter cihazını gerçekleştirmek için çeşitli sinyal işleme metotları uygulayarak, alınan sonuçlara adaptif çözümler üretmek üzere yapay sinir ağı ve genetik algoritma hibrit modeli oluşturulmaktadır. Böylece atriyal fibrilasyon kalp aritmisinin tespiti üzerinde çalışılmaktadır (Türker, 2018). EKG vuru sınıflandırması için çeşitli sinyal işleme, makine öğrenmesi teknikleri ve derin öğrenme algoritmalarının kullanıldığı görülmüştür (Akpınar, 2021). Derin öğrenmenin aritmi sınıflandırması gibi, solunum tahmini alanlarında da kapsamlı bir şekilde test edilmesi beklenmektedir (Merdjanovska & Rashkovska, 2022).

İletilen EKG bilgilerinin yüksek güvenilirliğini sağlayan, iletilen elektro-kardiyo sinyalinin dalgacık sıkıştırması ve filtrelenmesi için algoritmalar sunmaktadır (Ivel, 2021).

### **Veri Kaynağı**

Yapılan bazı çalışmalarda kullanılan EKG işaretleri veri tabanı kayıtlarından alınmıştır (Yakut, Solak, & Bolat, 2018). EKG sinyal analizlerinde; normal ve anormal sinyaller içeren MIT-BIH aritmi, MIT-BIH Normal Sinüs, MIT-BIH Gürültü Stres Testi, QT, PhysioNet/CinC Challenge 2014 ve Physionet/CinC Challenge 2011 competition gibi veri tabanları kullanılır (Yakut, Solak & Bolat 2018; Kouekeu & ark. 2022, Karimipour & Homaeinezhad, 2014). Bu sinyallerden gürültünün giderilmesi ve QRS kompleksinin tanımlanmasından sonra, farklı özellik setleri çıkarılmıştır (Wanyenze, 2019).

## **EKG Sinyalinden Hastalık Teşhisi**

Kalp damar hastalıkları tanısında kullanılan elektrokardiyogram vücut yüzeyinden elde edilen fizyolojik bir sinyaldir (Bilgin, Oktay & Bilgin 2021). EKG'nin kliniksel uygulamalarındaki değerlendirmesi, çeşitli kılavuzlarda belirtilen morfolojik özelliklerin çıplak gözle taranmasına bağlı olarak, değerlendirenin yorumuyla gerçekleştirilmektedir. Daha objektif ve tutarlı bir EKG işareti yorumunun yapılabilmesi için bilgisayar destekli EKG analizi daha hızlı bir yöntem olarak görülmektedir. EKG işaretlerinin doğru tespiti ve doğru sınıflandırılması önemlidir (Diker, 2019). Çalışmalarda, kalpteki normal ve anormal iletimi yöneten mekanizmaları ve biyofiziksel ilkeleri tanımlamak için bilgisayar simülasyonlarından ve deneysel hazırlıklardan elde edilen sonuçlar sentezlenmektedir (Kleber & Rudy, 2004).

Gürültüden arındırılmış EKG işaretleri analiz edilerek, tanı değeri taşıyan bilgiyi bu işaretlerden elde etmek mümkündür. Böylece doktorlara kalp rahatsızlıklarının teşhisi konusunda yardımcı olunmaktadır (Şentürk, 2013). Mobil cihazlardan hesaplamalı EKG analizinde, gelecekteki eğilimlerle ilgili bir genel kanı, günlük EKG takibi sırasında; morfolojik ve ritmik aritmi tespiti, sinyal kalitesi değerlendirmesi, biyometrik tanımlama, solunum tahmini, fetal EKG ekstraksiyonu ve fiziksel ve duygusal izleme vb. farklı uygulamaların hala açık alanlar olduğu yönündedir (Merdjanovska & Rashkovska, 2022). EKG işareti kardiyologlara, kalbin ritim ve çalışması hakkında yararlı bilgiler sunmaktadır. EKG işaretinin analizi, farklı kalp hastalıkları türlerinin belirlenmesi ve tedavi edilmesinde kullanılan etkili bir yöntemdir. Kardiyologlar, bir hastaya ait EKG işaretindeki tipik dalga formlarını belirlerler ve tanı için temel oluştururlar (Diker, 2019). Kalp rahatsızlıkları, EKG

sinyali ve dakikadaki kalp atış sayısı (BPM) olan kalp atış hızı ile tespit edilebilir (Rahman, Nabeed, & Rahman, 2021).

### **Hastalıklar (taşikardi, bradikardi ve ritim bozuklukları)**

Bilgisayar ortamına alınan EKG sinyalleri kullanılarak taşikardi, bradikardi ve ritim bozuklukları otomatik teşhis edilebilmektedir. Bunun için sinyal işleme teknikleri kullanılır (Şentürk, 2013). Elektrokardiyogram (EKG), kalpte oluşan aritmi ve kalp hızı değişkenliği gibi durumların izlenmesi için faydalı bir araçtır. EKG vuruları ritim bozuklukları, kalpteki bazı yapısal değişiklikler gibi çeşitli kalp bozukluklarının belirlenmesine yardımcı olur (Akpınar, 2021). EKG cihazı yardımıyla sinyaller bilgisayar ortamına aktarılır. Bilgisayar ortamına aktarılan EKG verisi üzerinden taşikardi, bradikardi ve aritmi rahatsızlıkları tespit edilebilir (Şentürk, 2013).

Aritmi, kalp ritmdeki anormallik oluşmasına sebep olan kalp hızının düzensizliğidir. Elektrokardiyografi (EKG) sinyalinin manuel analizi, kalp ritmindeki anormallikleri hızlı bir şekilde tanımlamak için yeterli değildir. Aritmi tipinin tespiti için 2B evrimsel sinir ağları (ESA) mimarisine dayanan derin öğrenme çalışmaları yapılmaktadır. ESA mimarisinde kullanılabilen bir girdi olabilmesi için, her EKG sinyali kalp atımlarına bölünmüştür, daha sonra her kalp atımı 2B gri tonlamalı kalp atımı görüntüsüne dönüştürülmüştür. Görüntü tanımadaki başarısı nedeniyle 2B ESA modeli kullanılmıştır. Eğitilen modelin sonuçları farklı EKG aritmik sinyal tiplerinin sınıflandırılmasında ESA ve resim oluşturma tekniği yüksek doğrulukta sınıflama başarısına ulaştığını göstermiştir (İzci & ark., 2020).

### **QRS kompleksi**

Kalp hastalığını tespit etmenin bir yolu EKG sinyallerinde PQRST aralığında anormalliklerin varlığını tespit etmektir. Bu tür



çalışmalarda üç ana süreç kullanılır; veri toplama, sinyal ön işleme ve özellik çıkarma. Denekler üzerinde; P dalga noktaları, QRS kompleksleri ve T dalgalarını elde etmek için rahat bir durumda kısa bir süre boyunca sinyal kaydedilir (Demir, 2021). Elektrokardiyografi (EKG), kalp ritminin görselleştirilmesi ve analizi için en sık kullanılan yöntem ve cihaz olmaya devam etmektedir. QRS kompleksi tespiti bu amaç için yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda, QRS kompleksinin önceden depolanan EKG sinyallerinden tespit edildiği çeşitli PC tabanlı QRS tespit algoritmaları önerilmiştir. Bununla birlikte, giyilebilir tıbbi cihazlar alanındaki ilerlemelerle desteklenen kişiselleştirilmiş tıbbın genişlemesiyle birlikte, düşük kaynaklı mikro denetleyici birimleri (MCU) için sağlam, doğru, gerçek zamanlı ve hesaplama açısından verimli algoritmalar geliştirilmiştir (Kouekeu & ark. 2022). QRS kompleksinin analizi kardiyak aritmilerin tespitinde önemli bir rol oynar. Benzer şekilde PR aralığı ve QT aralıkları da kalple ilişkili çeşitli bozuklukların sınıflandırılması için analiz edilebilir (Dastidar & Panigrahy, 2021). EKG sinyalinin Q, R, S ve T dalgaları gibi özelliklerini bulmak için basit ve hızlı bir arama algoritması tasarlanmıştır. Sistem, anormal değerleri tespit etmek için kullanılan tıbbi işaretlere yönelik analiz gerçekleştirir (Alsahi, Marhoon & Hamad, 2020).

## **Sonuç**

Telemetri ve giyilebilir teknolojilerde en uygun yöntem ve teknoloji tercih edilmelidir. Son zamanlarda sağlık kuruluşları hasta takip sistemlerindeki gelişen teknolojiyi kullanarak hastaların anlık veriler üzerinden takip ve değerlendirmesini yapmaktadırlar. Bu tür teknolojiler geliştirilirken ayrık sistemleri birleştirmek yerine sistem bileşenlerini tek bir elektronik kart üzerinde birleştirerek çalışmak

daha etkin sonuçlar vermektedir. Daha z gürültü, daha estetik, hafif, az güç tüketen sistemler tasarlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

66-Akpınar, M.H. (2021). EKG vuru imgelerinden kardiyak aritmilerin makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri ile sınıflandırılması. Master Thesis, Fırat University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

59- Alsahi, Q.N., Marhoon, A.F. & Hamad, A.H., (2020). Remote patient healthcare surveillance system based real-time vital signs. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, vol.16 No.4, doi:10.22153/kej.2020. 10.003

51-Alziarjawey, H.A.J. (2015). ECG signal processing techniques by using ASP.NET application based on GUI in MATLAB. Master Thesis, Yıldırım Beyazıt University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

64-Arslan, İ., & Tankut, F. (2018). Taşınabilir elektrokardiyografi cihazı yapımı. Yakın Doğu Üniversitesi biyomedikal mühendisliği bölümüne sunulan bitirme projesi raporu. Lefkoşa.

18- Bakiya, A., Kamalanand, K. & Britto, R.L.D.J. (2021). Biomedical and Robotics Healthcare Series; Mechano-Electric Correlations in the Human Physiological System. doi:10.1201/9781003109181.

58- Bharathi, M., (2013). Wireless transmission of real time electrocardiogram (ECG) signals through radio frequency (RF) waves. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol.4, Issue 4, 1471.

48- Beckingham, T., Spencer, J. & McKay, K. (2023). CNN-RNN architecture to calculate BPM from underwater ECG samples. *Appl Intell* 53, 21156–21166. doi:10.1007/s10489-023-04522-7

12- Bilgin, G., Oktay, M. & Bilgin, S., (2021). Kardiyak olay kaydedici ve telemetri sistemi için yeni bir bileklik tasarımı. Mehmet Akif Ersoy University, Journal of the Institute of Science and Technology, 12(1), 104-120, doi:10.29048/makufebed.889637

34-Bilgin, S., (2008). Kalp hızı değişkenliğinin dalgacık dönüşümü ve yapay sinir ağları kullanılarak analizi. Ph. D. Thesis, Sakarya University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

35-Bittihn, P., Berg, S., Parlitz, U., & Luther, S. (2017). Emergent dynamics of spatio-temporal chaos in a heterogeneous excitable medium. *Chaos*, 27 (9): 093931. doi:10.1063/1.4999604

63-Boskovic, A., & Despotovic, M. (2005). An Efficient Approach to ECG Signal Transmission via GPRS. *EUROCON 2005 - The International Conference on "Computer as a Tool", Belgrade, Serbia*, 2005, pp. 76-79, doi:10.1109/EURCON.2005.1629862.

62-Can, S. (2010). EKG işaretinin cep telefonu ile iletilmesi, Master Thesis, Gazi University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

41- Cheng, L., Ivanova, O., Fan, H.H., & Khoo, M.C. (2010). An integrative model of respiratory and cardiovascular control in sleep-disordered breathing. *Respir Physiol Neurobiol.* 30;174(1-2):4-28. doi:10.1016/j.resp.2010.06.001.

45-Chu, M., Nguyen, T., Pandey, V., Zhou, Y., Pham, H.N., Bar-Yoseph, R., Radom-Aizik, S., Jain R., Cooper, D.M. & Khine,

M. (2019). Respiration rate and volume measurements using wearable strain sensors. *NPJ Digit Med.* 13;2:8. doi: 10.1038/s41746-019-0083-3.

15- Çiftçi, B., Şen, Z., & Akkaş, M. (2021). Nesnelerin İnterneti Tabanlı Kablosuz Taşınabilir EKG Cihazı. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*(26), 91-95. doi:10.31590/ejosat.949795

53-Dastidar, A. & Panigrahy, D., (2021) Preprocessing of the electrocardiogram signal for a patient parameter monitoring system. *Electronic Devices, Circuits, and Systems for Biomedical Applications and Intelligent Approach, Elsevier*, Chapter-6, p:115-134. doi:10.1016/B978-0-323-85172-5.00026-5

57- Demirtaş, M., Tulum, G., Sagbas, M., & Umut, A. (2018). Çevrimiçi Çalışabilen Çoklu Ortama Uygun Hasta İzleme Sistemi. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.* 1-1. doi:10.16984/saufenbilder.337262.

56- Demir, N., (2021). EKG Sinyalleri Kullanılarak Kişi Tespiti, Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

68-Diker, A. (2019). Uç öğrenme makineleri kullanarak EKG işaretlerinin sınıflandırma başarımlarının iyileştirilmesi. Ph. D. Thesis, Fırat University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

38- Dong, F., & Langford, W.F., (2008). Models of Cheyne-Stokes respiration with cardiovascular pathologies. *J.Math. Biol.* 57(4):497-519. doi:10.1007/s00285-008-0173-3.

43- Drummond, G.B., Fischer, D., & Arvind, D.K., (2020) Current clinical methods of measurement of respiratory rate give imprecise values. *ERJ Open Res.* 28;6(3):00023-2020. doi: 10.1183/23120541.00023-2020.

19-Dündar, Ö.M. & Aydın, A., (2021). Sporcuların kalp atım hızının ESP-Now kullanılarak kablosuz iletimi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c.9, s.3, 633-646, doi:10.36306/konjes.879392

21- Ernst, G., (2017). Heart-rate variability-more than heart beats? *Front. Public Health*, 5,240. doi:10.3389/fpubh.2017.00240

8- Ghadge, U., Jadhav, A. S. & Mahalakshmi, P., (2019). ECG tracking and analysis using bluetooth and support vector machine algorithm. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies(i-PACT)*, pp.1-4, Vellore, India, doi:10.1109/iPACT44901.2019.8960237

23- Habte, T.T., Saleh, H., Mohammad, B. & Ismail M., (2019). Background on ECG processing: In *Ultra Low Power ECG Processing System for IoT Devices*, New York: Springer, pp. 13-26.

52-Hampton, J. & Hampton, J. (2019). *The ECG made easy. (Ninth Edition) Elsevier Ltd.* Edinburgh London New York Oxford Philadelphia St Louis Sydney.

61-Hoshino K., Tohyo, Y., Hara, M., & Akashi, Y. (2021).A study on the frequency characteristics of highfrequency noise components in ventricular late potentials measured with a high-resolution holter electrocardiograph, *Journal of Clinical Physiology*, 2021, Volume 51, Issue 3, Pages 147-155, doi:10.34363/jocp.51.3\_147.

24- Ishbulatov, Y.M., Bibicheva, T.S., Gridnev, V.I., Prokhorov, M.D., Ogneva, M.V., Kiselev, A.R. & Karavaev, A.S., (2022). Contribution of cardiorespiratory coupling to the irregular dynamics of the human cardiovascular system. *Mathematics* 10(7):1088, doi:10.3390/math10071088

67- Ivel, V.P., Gerasimova, Y.V., Moldakhmetov, S.S., Petrov, P.A., & Gerasimov, I. A. (2020). Wireless Holter monitoring system with a dual-core processor, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, doi:10.1088/1757-899X/919/2/022040

32- İzci, E., Değirmenci, M., Özdemir, M.A. & Akan, A., (2020). ECG arrhythmia detection with deep learning. *28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp.1-4, Gaziantep, Turkey, doi:10.1109/SIU49456.2020.9302219

36-Jiyuan, T., Kiao, I., & Goodarz, A. (2017). The human respiratory system. doi:10.1007/978-94-007-4488-2\_2.

42-Kapidzic, A., Platisa, M.M., Bojic, T., & Kalauzi, A. (2014). RR interval-respiratory signal waveform modeling in human slow paced and spontaneous breathing. *Respir Physiol Neurobiol.* 1;203:51-9. doi:10.1016/j.resp.2014.08.004.

60- Karimipour, A. & Homaeinezhad, M.Z., (2014). Real-time electrocardiogram P-QRS-T detection–delineation algorithm based on quality supported analysis of characteristic templates. *Computers in Biology and Medicine*, vol.52, pp.153-165. doi: 10.1016/j.combiomed.2014.07.002

25-Karavaev, A.S., Ishbulatov, Y.M., Ponomarenko, V.I., Bezruchko, B.P., Kiselev, A.R. & Prokhorov, M.D. (2019). Autonomic control is a source of dynamical chaos in the cardiovascular system. *Chaos* 29,12110129. doi:10.1063/1.5134833

50-Karavaev, A.S., Prokhorov, M.D., Ponomarenko, V.I., Kiselev, A.R., Gridnev, V.I., Ruban, E.I. & Bezruchko B.P. (2009). Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system. *Chaos* 1. 19(3): 033112. doi:10.1063/1.3187794

10- Kavya, R. & Kumar, S., (2020). Health monitoring system. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt*, 17(9),1258-1265. <https://archives.palarch.nl/index.php/jae/article/view/3746>

27-Kleber, A.G., & Rudy, Y. (2004). Basic mechanisms of cardiac impulse propagation and associated arrhythmias. *Physiol Rev.* 84(2):431-88. doi:10.1152/physrev.00025.2003.

28-Kouekeu, L.C.N., Mohamadou, Y., Djeukam, A., Tueche, F. & Tonka, M., (2022). Embedded QRS complex detection based on ECG signal strength and trend. *Biomedical Engineering Advances*, vol.3, Id:100030, doi:10.1016/j.bea.2022.100030

46- Lazaro, J., Reljin, N., Bailon, R., Gil, E., Noh, Y., Laguna, P., & Chon, K.H. (2021). Electrocardiogram derived respiratory rate using a wearable armband. *IEEE Trans Biomed Eng.* 68(3):1056-1065. doi: 10.1109/TBME.2020.3004730.

4- Mansoori, E., Siavashi, A. & Majidi, M., (2021). Sensing, wireless transmission, and smart processing of heart signals. *5th*



*International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, pp. 1-6. doi:10.1109/IoT52625.2021.9469710.

39-Massaroni, C., Nicolo, A., Sacchetti, M., & Schena, E. (2021). Contactless methods for measuring respiratory rate: a review. *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no.11, pp.12821-12839,1 doi:10.1109/JSEN.2020.3023486.

54- Merdjanovska, E., & Rashkovska, A., (2022). Comprehensive survey of computational ECG analysis: databases, methods and applications. *Expert Systems with Applications*, vol 203, 117206. doi:10.1016/j.eswa.2022.117206.

40- Nicolo, A., Massaroni, C., Schena, E., & Sacchetti, M. (2020). The importance of respiratory rate monitoring: from healthcare to sport and exercise. *Sensors (Basel)*. 9;20(21):6396. doi: 10.3390/s20216396.

14-Oktay, M., (2019). EKG olay kaydedici ve hekim telemetri sistemi tasarımı. Master Thesis, Akdeniz University, Institute of Science and Technology, Türkiye

55-Öncü, M.R., (2008). Acil tıp asistanlarınca yorumlanan elektrokardiyografilerin doğruluk ve güvenilirliğinin değerlendirilmesi. Medical Specialization Thesis, Uludağ University Tıp Fakültesi, Türkiye.

2-Özkaraca, O., (2013). Giyilebilir bir EKG sisteminde uzaktan sinyalin algılanması ve işlenmesi, Ph. D. Thesis, Gazi University Informatics Institute, Türkiye.

5- Özyener, F. & Gür, H., (2002). Kardiyorespiratuvar egzersiz testleri: uygulama ve değerlendirme, neden, nasıl? 7. *Uluslararası Spor Bilimleri Kongresi, Türkiye.*

20- Passler, S., Müller, N. & Senner, V., (2019). In-ear pulse rate measurement: a valid alternative to heart rate derived from electrocardiography? *Sensors (Basel)* 21;19(17):3641, doi:10.3390/s19173641

6- Qunoot, N., & Ali, F. (2020). Design Health care system using Raspberry Pi and ESP32. *International Journal of Computer Applications.* 177. 33-38. doi:10.5120/ijca2020919863.

7- Rahman, A., Nabeed, T. & Rahman, T., (2021). Remote monitoring of heart rate and ECG signal using ESP32. 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), Changsha, China, pp. 604-610, doi:10.1109/AEMCSE51986.2021.00127

37-Raj, M.D., Kumar, V.S.N, Raghul, S., Selvan R.P.R., & Rajah, S.S. (2020). Electrical modeling and analysis of human respiratory system. *Bulletin of Scientific Research* 2(1):43-48. doi:10.34256/bsr2017.

1-Rithic, C.H., Narendran, S. & Marimuthu C., (2021). ECG and pulse oxygen level monitoring and arrhythmia classification using CNN. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol.6, Issue.8, pp.171-176, doi:10.33564/ijeast.2021.v06i08.028

11- Saleem, K., Bajwa, I.S., Sarwar, N., Anwar, W. & Ashraf, A., (2020). IoT Healthcare: design of smart and cost-effective sleep

quality monitoring system. *Journal of Sensors*. vol. Article ID 8882378, 17 pages, doi:10.1155/2020/8882378

13- Sugandi, B., Satria, H., Arif, H., Nelmiawati, N. & Mulyadi, I., (2020). Low cost wireless ECG patch using ESP32. *Jurnal Integrasi*, vol 12. no:1 31-35, doi:10.30871/ji.v12i1.1764.

26- Şentürk, Ü., (2013). EKG sinyallerinin bilgisayarda görüntülenmesi, ayrıştırılması ve analizi. Master Thesis, Marmara University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

33-Togo, F. & Yamamoto, Y., (2001). Decreased fractal component of human heart rate variability during non-REM sleep. *Am J. Physiol Heart Circ Physiol*. 280(1): H17-21, doi:10.1152/ajpheart.2001.280.1.H17

30-Türker, A.Y., (2018). Gömülü sistem tabanlı elektrokardiyogram holter cihazının tasarlanması ve yapay sinir ağı genetik algoritma hibrit modeli ile aritmi tespiti, Master Thesis, Sakarya University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

22- Uymaz, S.C., (2022) Development of holter ECG, Master Thesis, Aydın Adnan Menderes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master's Programme in Mechanical Engineering, Türkiye, 2022.

47- Uysal, F., (2017). Kalp hızı değişkenliği ölçüm sistemi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi.

3- Uzun, M., (2016). Cardiovascular system and exercise, *journal of cardiovascular nursing*. 7 (Sup2) :48-53, doi: 10.5543/khd.2016.77487

17- Vavrinsky, E., Subjak, J., Donoval, M., Wagner, A., Zavodnik, T. & Svobodova, H., (2020). Application of modern multi-sensor holter in diagnosis and treatment. *Sensors*. 20(9):2663. doi:10.3390/s20092663

31-Wanyenze, A., (2019). Yapay sinir ağları tabanlı topluluk öğrenme yöntemi ile EKG sinyallerinin sınıflandırılması. Master Thesis, Selçuk University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

29-Wessel, N., Riedl, M., & Kurths, J. (2009). Is the normal heart rate “Chaotic” due to respiration? *Chaos*, 19,028508, doi:10.1063/1.3133128

9- Yakut, Ö., Solak, S. & Bolat, E.D., (2018). EKG işaretindeki gürültülerin temizlenmesi için IIR tabanlı sayısal filtre tasarımı. *Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi*, 21(1): 173-181, doi:10.2339/politeknik.386970

49- Yıldırım, Ö., (2017). Kalp aritmisinin çift dalga boylu PPG sinyalleri kullanılarak belirlenmesi. Master Thesis, Karadeniz Teknik University, Institute of Science and Technology, Türkiye.

65-Yochum, M., Renaud, C., & Jacquir, S. (2016). Automatic detection of P, QRS and T patterns in 12 leads ECG signal based on CWT. *Biomedical Signal Processing and Control*, vol.25, pp.46-52, doi:10.1016/j.bspc.2015.10.011

AD8232 Datasheet (2012-2020), Analog Devices Single-Lead, Heart Rate Monitor Front End

ESP32-WROOM-DA Datasheet (2023) Preliminary v0.6 Espressif Systems

## BÖLÜM II

### **Kompleks Güç Sistemlerinin Korunmasında Mikroişlemci Bazlı Dijital Yönlü Aşırı Akım Koruma Rölelerinin Kullanımı ve Sağladığı Avantajlar**

**Alişan AYVAZ<sup>1</sup>**

#### **Giriş**

Yönlü aşırı akım koruma röleleri (YAAKR), güç sistemlerinin korunmasında ekonomiklik ve basitlik gibi avantajları ile önemli rol oynamaktadırlar (Srinivas, 2019). YAAKR'lar akımın genliğine ve yönüne bağlı olarak çalışmaktadırlar ve koruma yaptıkları yönde üzerlerinden geçen akımın genliği normal çalışma koşullarının sınırı olarak belirlenmiş olan başlatma akımı ayarını (pickup setting, PS) geçmesi sonucu arıza durumunu algılamaktadırlar. Günümüz güç sistemlerinin gittikçe karmaşıklaşan yapısı, koruma sistemlerinin ve buna bağlı röleler arası koordinasyonun önemini de arttırmıştır. Koruma sistemlerinde röleler arası koordinasyon güvenilir ve seçici bir koruma için

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Amasya/Türkiye, Orcid: 0000-0001-6449-6541, alisanayvaz@live.com

kritiktir (Choudhary & Das, 2023). Arıza durumlarına karşı ekipmanlar üzerindeki stresi mümkün olduğunca azaltmak ve güç sistemlerini arızalar dolayısıyla oluşabilecek hasarlardan korumak için YAAKR'ların mümkün olduğunca hızlı aksiyon alması ve doğru bölge veya bölgelerin devre dışı kalmasını sağlamalı, geri kalan kısımların ise işletmeye devam etmesi noktasında seçici olması gerekmektedir (Ayvaz, 2024). Fakat YAAKR'lar ile bunun uygulanmasındaki en büyük zorluk röleler arası koordinasyon kısıtının ve röle ayar kısıtlamalarının olmasıdır.

YAAKR'lar koruma sistemlerinde birincil ve ikincil koruma görevinde olabilmektedirler. Burada birincil koruma görevinde olan röleler arızalara karşı önlem alınmasında öncelikli roledirler. Birincil korumada bir problem olması durumunda ikincil koruma mekanizması ile güç sisteminin güvenliği garanti altına alınmaya çalışılmaktadır (Hatata vd., 2022). Fakat arıza olmayan bölgelerde lüzumsuz enerji kesintilerini önlemek için birincil ve ikincil koruma görevleri arasında koordinasyonun sağlanması önemlidir.

Bu kapsamda, güç sistemlerindeki çok sayıda rölenin olması ve bu rölelerin birincil koruma görevi ve birden çok olabilen ikincil koruma görevi dolayısıyla YAAKR'lar arasındaki koordinasyon bir optimizasyon problemi olarak tasarlanmaktadır (Acharya & Das, 2022). Bu problemin çözümü ile koordinasyon zaman aralığı (coordination time interval, CTI) kısıtında ve röle ayar limitleriyle ilişkili kısıtlarda ihlale yol açmadan röle işlem sürelerinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır.

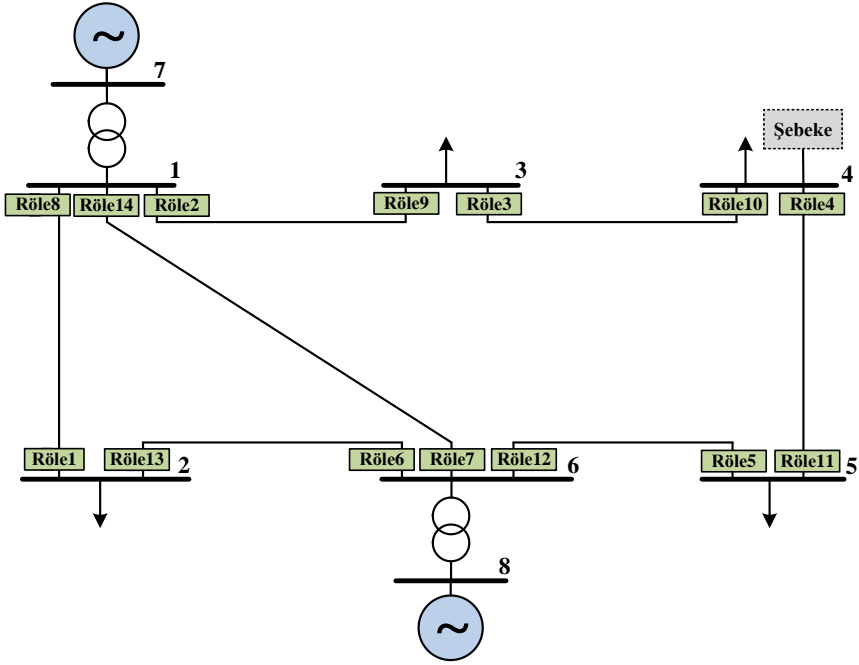
Literatürde, bu problemin çözümüne yönelik son 10 yılda çok sayıda çalışma olduğu ve bu çalışmaların da çoğunda yönlü aşırı akım koruma rölesi akım-zaman karakteristiği olarak IEC standartlarında belirtilen normal ters zamanlı (normal inverse, NI) karakteristik tipi dikkate alınmaktadır (Korashy & ark, 2019). Bu yaklaşım, günümüz güç sistemlerinin yapısında yaygın olan elektromekanik röle teknolojisi ile ilgilidir. Bu teknolojiye sahip röleler, genel olarak tek bir röle akım-zaman karakteristiğine özel olarak üretilmektedir. Bu sebeple literatürdeki çalışmalarda da

genellikle bu yaygın kullanım dikkate alınmaktadır. Fakat, son yıllarda mikroişlemci bazlı dijital rölelere dayalı literatür çalışmalarının ağırlıkta olduğu görülmektedir (Sampaio & ark, 2022). Şüphesiz ki bu yönelim, yeni mikroişlemci bazlı dijital rölelerin sahip olduğu fonksiyonellik ile güç sistemlerinin korunmasında karşılaşılan zorlukların üstesinden gelinebilmesinden kaynaklanmaktadır. Bunlardan en önemlilerinden biri olarak dijital rölelere güç sisteminde oluşan farklı koşullara uygun olarak farklı akım-zaman karakteristikleri atanabilmektedir. Bu noktada IEC standartlarına uygun karakteristikler atanabileceği gibi, standart olmayan karakteristiklerin de atanması mümkündür. Dijital rölelerin bu esneklik sağlayan özelliği sayesinde CTI kısıtını ihlal etmeden elektromekanik rölelere kıyasla daha düşük röle işlem süreleri elde edilebilmektedir. Bu esnekliğe ek olarak, dijital röleler, programlanabilir ve fonksiyonel olmaları dolayısıyla elektromekanik rölelere kıyasla birçok avantaj sunmaktadırlar. Bu kapsamda bu çalışma ile dijital rölelerin röle akım-zaman karakteristiği üzerinde sağladığı esneklik ve bunun güç sistemlerinin korunmasında sağladığı avantajlara odaklanılmıştır.

## **Materyal ve Yöntem**

### **2.1. Güç sistemi modeli**

Bu çalışma kapsamında dijital rölelerin sağladığı avantajların gösterimi için Şekil 1’de tek hat şeması verilen IEEE 8-bara test sistemi modeli kullanılmıştır. Bu sistem, güç sistemlerinin korunması ve röle koordinasyonu alanlarında sıklıkla kullanılan ve en çok bilinen sistem modellerinden biridir. Sistem Şekil 1’de görüldüğü gibi 2 generatör ve 2 transformatör içermekte ve bunlara ek olarak toplam 14 yönlü aşırı akım koruma rölesi iletim hatlarının başında ve sonunda olmak üzere sistemde bulunmaktadır. Akım transformatörü dönüştürme oranları ise Röle3, Röle7, Röle9 ve Röle14 röleleri için 800/5, geriye kalan diğer röleler için ise 1200/5’tir. Bu güç sistemi ile ilgili arıza akımları da dahil olmak üzere detaylı bilgi Amraee tarafından gerçekleştirilen çalışmadan edinilebilir (Amraee, 2012).



Şekil 1: IEEE 8-bara test sistemi tek hat şeması

## 2.2. Optimizasyon problemi tasarımı

Bu bölümde YAAKR'ların optimal koordinasyonu problemi iki farklı şekilde modellenmektedir. Bunlardan biri elektromekanik rölelerin güç sisteminde kullanıldığı duruma özgü olarak normal ters zamanlı röle karakteristiğinin tüm röleler için sabit röle karakteristiği olarak dikkate alındığı problem modeline denk gelmektedir. Diğer tasarımda ise dijital rölelerin güç sisteminde kullanıldığı ve röle karakteristiğinin röleler için değişken olduğu problem modeline denk gelmektedir.

### 2.2.1. Geleneksel problem tasarımı

YAAKR'ların optimal koordinasyon probleminin amacını toplam röle işlem süresinin minimize edilmesi oluşturmakta ve amaç



fonksiyonu aşağıdaki gibi formüle edilebilmektedir (Akdag & Yeroglu, 2021):

$$AF = \sum_{h=1}^{NR} T_{i,br,h} + T_{j,ik,h} \quad (i, j) \in \Omega_{RP} \quad (1)$$

Burada;  $T_{i,br,h}$  ve  $T_{j,ik,h}$   $i$ 'nci birincil rölenin işlem süresini ve  $j$ 'nci ikincil rölenin işlem süresini göstermektedir.  $NR$  toplam röle çifti sayısını ve  $\Omega_{RP}$  röle çifti kümesini göstermektedir. Röle işlem süresi IEC standartlarına göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$T_i = \frac{TMS_i \times \alpha}{\left(\frac{I_{f,i}}{PS_i}\right)^\beta - 1} \quad (2)$$

Burada;  $TMS_i$   $i$ 'nci rölenin zaman kadran ayarını (time multiplier setting, TMS),  $PS_i$   $i$ 'nci rölenin başlatma akımı ayarını, ve  $I_{f,i}$   $i$ 'nci röle üzerinden geçen arıza akımını göstermektedir.  $\alpha$  ve  $\beta$  ise röle karakteristiğini belirleyen katsayıları ifade etmektedir.

Diğer yandan problemin kısıtlarını ise koordinasyon kısıtları ile birlikte röle ayar kısıtları oluşturmaktadır. Koordinasyon kısıtı Denklem (3) ile, diğer röle ayar kısıtları ise Denklem (4)-(6) ile verilmiştir.

$$CTI_{\min} \geq T_{i,ik} - T_{i,br} \quad (3)$$

$$TMS^{\min} \leq TMS \leq TMS^{\max} \quad (4)$$

$$PS^{\min} \leq PS \leq PS^{\max} \quad (5)$$

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad (6)$$

Burada;  $CTI_{\min}$  koordinasyon zaman aralığının minimum değerini ifade etmektedir.

Bu noktada Denklem (1)-(6) ile ifade edilen problem, bu

çalışma kapsamında elektromekanik rölelerin kullanım durumu için çözülmüş olacak ve Denklem (2)'deki  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları sırasıyla IEC standartlarına göre NI röle karakteristiğine denk gelen 0.14 ve 0.02 değerleridir. Diğer yandan elektromekanik röle kullanımı durumunda  $CTI_{min}$  kısıtı 0.2-0.5 saniye arasında alınabilmektedir (Choudhary & Das, 2022). Dolayısıyla, bu çalışmada elektromekanik röle kullanımı durumu için 0.2 saniye olarak dikkate alınmıştır.

### 2.2.2. Dijital röle bazlı problem tasarımı

Dijital rölelerin kullanımı durumunda röle akım-zaman karakteristiğinde esnekliğin sağlanması ile rölelere standartlara bağlı veya bağlı olmaksızın farklı karakteristik tipleri atanabilmektedir. Bu noktada dijital rölelerin kullanımı, standartlara bağlı kalınıp kalınmama durumuna göre iki farklı senaryo altında incelenebilir.

*Senaryo 1:* Bu senaryo dijital rölelere ait karakteristikler belirlenirken standartlara bağlı kalındığı durum olarak dikkate alınmıştır. Bu senaryoya göre sistemdeki her YAAKR IEC standartlarında ifade edilen röle karakteristiklerinden birini almaktadır. Burada IEC standartlarına göre röle karakteristikleri ve ilgili  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları Tablo 1'de verilmiştir (Korashy & ark, 2021). Diğer yandan dijital rölelerin kullanımı ile  $CTI_{min}$  kısıtı da değişebilmektedir. Örneğin Korashy ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada 0.1-0.2 saniye arasında alınabileceği ifade edilmiştir (Korashy & ark, 2019). Dolayısıyla, bu çalışmada dijital röle kullanımı durumu için 0.1 saniye olarak dikkate alınmıştır. Problem tasarımına özgü diğer kısımlar Bölüm 2.2.1'de verildiği gibidir.

*Tablo 1: IEC standartlarına göre röle karakteristikleri*

Röle karakteristik tipi	$\alpha$	$\beta$
Normal ters (normal inverse, NI)	0.14	0.02
Çok ters (very inverse, VI)	13.5	1
Aşırı ters (extremely inverse, EI)	80	2

*Kaynak: Korashy & ark, 2021*

*Senaryo 2:* Bu senaryo dijital rölelere ait karakteristikler belirlenirken standartlara bağlı kalınmadığı durum olarak dikkate alınmıştır. Bu senaryoya göre sistemdeki her YAAKR için  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları optimizasyon probleminde belirli kısıtlar arasında sürekli bir değişken olarak dikkate alınmaktadır. Bu durumda Denklem (3)-(6) ile verilen kısıtlara bu senaryo kapsamında aşağıdaki kısıtlar da dahil edilecektir.

$$\alpha^{\min} \leq \alpha \leq \alpha^{\max} \quad (7)$$

$$\beta^{\min} \leq \beta \leq \beta^{\max} \quad (8)$$

Burada;  $\alpha^{\min}$  ve  $\alpha^{\max}$  sırasıyla 0.14 ve 80,  $\beta^{\min}$  ve  $\beta^{\max}$  ise sırasıyla 0.02 ve 2 olarak dikkate alınmıştır. Diğer yandan Senaryo 1’de olduğu gibi  $CTI_{\min}$  kısıtı 0.1 saniye olarak alınmıştır.

## **Bulgular**

Bu bölümde her bir röle teknolojisine uygun olarak Bölüm 2’de tasarlanan problemlerin çözümüne ait sonuçlar verilmiştir. Burada tüm problem çözümleri için  $TMS^{\min}$  ve  $TMS^{\max}$  sırasıyla 0.05 ve 1.1,  $PS^{\min}$  ve  $PS^{\max}$  sırasıyla 0.5 ve 5, ve  $T_i^{\min}$  ve  $T_i^{\max}$  ise 0.05 ve 2 saniye olarak dikkate alınmıştır. Diğer problem parametre değerleri Bölüm 2’de verilmiştir. Problem çözümleri, GAMS/KNITRO çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de geleneksel olarak elektromekanik rölelerle kurulu koruma sistemlerine özgü gerçekleştirilen çözüm sonucu elde edilen optimal röle ayarları görülmektedir.

*Tablo 2: Geleneksel problem çözümü optimal röle ayarları*

Röle	TMS	PS
Röle1	0.050	2.223
Röle2	0.083	5.000
Röle3	0.071	5.000
Röle4	0.050	4.509
Röle5	0.050	2.316
Röle6	0.056	5.000
Röle7	0.069	5.000

Röle8	0.052	5.000
Röle9	0.050	3.340
Röle10	0.050	4.567
Röle11	0.050	4.687
Röle12	0.080	5.000
Röle13	0.050	2.174
Röle14	0.067	5.000
AF (saniye)	15.154	

Tablo 2'deki sonuçlara göre amaç fonksiyonu yani toplam röle işlem süresinin 15.154 saniye olarak elde edildiği görülmektedir. Diğer yandan Tablo 3'te, Tablo 2'de verilen optimal röle ayarları için elde edilen birincil ve ikincil röle işlem süreleri ile röle çiftleri arasındaki koordinasyon zaman aralığı değerleri görülmektedir. Sonuçlara göre koordinasyon zaman aralığı açısından herhangi bir ihlalin olmadığı görülmektedir. Röle2 rölesinin 0.357 saniye ile en yüksek birincil röle işlem süresine sahip olduğu, buna bağlı Röle2 ile röle çifti oluşturmaları dolayısıyla en yüksek ikincil röle işlem sürelerine de 0.557 saniye ile Röle1 ve Röle7 rölelerinin sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 3: Geleneksel problem çözümü röle işlem süreleri

Birincil röle	İkincil röle	$T_{i,br}$	$T_{i,ik}$	CTI
Röle1	Röle6	0.191	0.391	0.200
Röle2	Röle1	0.357	0.557	0.200
Röle2	Röle7	0.357	0.557	0.200
Röle3	Röle2	0.328	0.528	0.200
Röle4	Röle3	0.276	0.476	0.200
Röle5	Röle4	0.236	0.436	0.200
Röle6	Röle5	0.236	0.453	0.217
Röle6	Röle14	0.236	0.545	0.309
Röle7	Röle5	0.253	0.453	0.200
Röle7	Röle13	0.253	0.545	0.292
Röle8	Röle7	0.222	0.557	0.335
Röle8	Röle9	0.222	0.446	0.224
Röle9	Röle10	0.224	0.424	0.200
Röle10	Röle11	0.273	0.473	0.200
Röle11	Röle12	0.290	0.490	0.200
Röle12	Röle13	0.345	0.545	0.200
Röle12	Röle14	0.345	0.545	0.200
Röle13	Röle8	0.197	0.397	0.200
Röle14	Röle1	0.246	0.557	0.311
Röle14	Röle9	0.246	0.446	0.200

Dijital röle kullanımı durumu Senaryo 1 kapsamında gerçekleştirilen problem çözümü sonucu optimal röle ayarları Tablo 4'teki gibi verilmiştir. Elde edilen sonuca göre toplam röle işlem süresi (AF) 4.492 saniye olarak elde edilmiştir. Bu sonuca göre dijital röle kullanımı ile toplam röle işlem süre elektromekanik röle kullanımına göre yaklaşık olarak %70 azalmaktadır. Röle karakteristiği seçimindeki esneklik ile önemli bir avantaj sağlanmaktadır. Optimal röle ayarlarına bakıldığında aşırı ters röle karakteristiğinin (EI) baskın olduğu görülmektedir. Diğer yandan Tablo 5'te, Tablo 4'teki optimal röle ayarları için elde edilen birincil ve ikincil röle işlem süreleri ile koordinasyon zaman aralığı değerleri görülmektedir. Burada yine koordinasyon zaman aralığında herhangi bir ihlalin olmadığı görülmektedir. En yüksek birincil röle

işlem süresine 0.065 saniye ile Röle10 rölesinin, en yüksek ikincil röle işlem süresine ise 0.208 saniye ile Röle8 rölesinin sahip olduğu görülmektedir.

*Tablo 4: Senaryo 1 problem çözümü optimal röle ayarları*

Röle	TMS	PS	Karakteristik
Röle1	0.096	0.500	VI
Röle2	0.050	2.922	EI
Röle3	0.050	2.743	EI
Röle4	0.050	1.902	EI
Röle5	0.250	0.500	EI
Röle6	1.100	0.607	EI
Röle7	0.055	2.065	VI
Röle8	1.100	0.605	EI
Röle9	0.050	1.331	VI
Röle10	0.050	2.050	EI
Röle11	0.050	1.945	EI
Röle12	0.050	3.070	EI
Röle13	0.089	0.500	VI
Röle14	0.050	2.282	VI
AF (saniye)	4.492		

Dijital röle kullanımı durumu Senaryo 2 kapsamında gerçekleştirilen problem çözümü sonucu optimal röle ayarları Tablo 6'daki gibi verilmiştir. Elde edilen sonuca göre toplam röle işlem süresi (AF) 4.057 saniye olarak elde edilmiştir. Bu sonuca göre Senaryo 2 kapsamında dijital röle kullanımı için elde edilen toplam röle işlem süresi elektromekanik röle kullanımına göre yaklaşık olarak %73 azalmaktadır. Bu senaryo kapsamında optimizasyon sonucunda bulunan  $\alpha$  ve  $\beta$  değerlerin değişen değerler aldıkları görülmektedir.

Tablo 5: Senaryo 1 problem çözümü röle işlem süreleri

Birincil röle	İkincil röle	$T_{i,br}$	$T_{i,ik}$	CTI
Röle1	Röle6	0.050	0.179	0.129
Röle2	Röle1	0.057	0.178	0.121
Röle2	Röle7	0.057	0.157	0.100
Röle3	Röle2	0.062	0.162	0.100
Röle4	Röle3	0.059	0.159	0.100
Röle5	Röle4	0.050	0.150	0.100
Röle6	Röle5	0.050	0.203	0.153
Röle6	Röle14	0.050	0.163	0.113
Röle7	Röle5	0.050	0.203	0.153
Röle7	Röle13	0.050	0.166	0.116
Röle8	Röle7	0.050	0.157	0.107
Röle8	Röle9	0.050	0.151	0.101
Röle9	Röle10	0.063	0.163	0.100
Röle10	Röle11	0.065	0.165	0.100
Röle11	Röle12	0.064	0.164	0.100
Röle12	Röle13	0.063	0.166	0.102
Röle12	Röle14	0.063	0.163	0.100
Röle13	Röle8	0.050	0.208	0.158
Röle14	Röle1	0.051	0.178	0.127
Röle14	Röle9	0.051	0.151	0.100

Tablo 7’de, Tablo 6’daki optimal röle ayarları için elde edilen birincil ve ikincil röle işlem süreleri ile koordinasyon zaman aralığı değerleri görülmektedir. Koordinasyon zaman aralığında herhangi bir ihlalin olmadığı görülmektedir. En yüksek birincil röle işlem süresine 0.055 saniye ile Röle3 ve R12 rölelerinin, en yüksek ikincil röle işlem süresine ise 0.155 saniye ile Röle2, Röle13 ve Röle14 rölelerinin sahip olduğu görülmektedir. Senaryo 1 ile karşılaştırıldığında Senaryo 2’de  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayılarındaki esneklik ile röle işlem sürelerinin neredeyse alt limitlerine geldikleri görülmektedir. Senaryo 2 kapsamında çoğu birincil röle işlem süresinin alt sınır olan 0.05 saniye olduğu görülmektedir.

Tablo 6: Senaryo 2 problem çözümü optimal röle ayarları

Röle	TMS	PS	$\alpha$	$\beta$
Röle1	0.050	0.500	0.840	14.908
Röle2	0.050	5.000	2.000	24.125
Röle3	0.050	5.000	2.000	20.657
Röle4	0.050	5.000	2.000	9.010
Röle5	0.054	0.833	1.513	38.950
Röle6	0.828	0.610	1.720	36.986
Röle7	0.056	0.903	1.046	37.251
Röle8	0.074	1.700	1.496	38.039
Röle9	0.053	1.053	1.390	38.683
Röle10	0.050	5.000	2.000	9.855
Röle11	0.050	5.000	2.000	8.546
Röle12	0.050	5.000	2.000	25.640
Röle13	0.050	0.500	0.932	19.048
Röle14	0.057	0.946	1.064	36.803
AF (saniye)	4.057			

## Sonuç

Bu çalışmada mikroişlemci bazlı dijital rölelerin güç sistemlerinde yönlü aşırı akım koruma rölesi olarak kullanılması ve bu kullanımın sağladığı avantajlar ele alınmıştır. Özellikle bu çalışma dijital rölelerin röle karakteristiği üzerinde sağladığı esnekliğe odaklanılmıştır. Bu kapsamda hem elektromekanik rölelerin hem de dijital rölelerin kullanıldığı durumlar için çeşitli problem modelleri oluşturulmuştur. Problemlerin çözümü gerçekleştirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre dijital röle kullanımı ile elektromekanik röle kullanımına göre %73'e kadar toplam röle işlem süresinde azalma sağlanmış olmaktadır. Özellikle dijital röle kullanımı ile birlikte röle karakteristiğinde standartların dışında kalınması durumunda birincil röle işlem sürelerinin minimum seviyelere geldiği görülmektedir. Bununla beraber birincil ve ikincil koruma röle çiftleri arasındaki koordinasyon zaman aralıklarının da çoğu röle çifti için alt sınır olan 0.1 saniye olduğu görülmektedir. Güç sistemlerinde halihazırda elektromekanik rölelerin yaygın



olması ve dijital rölelerin elektromekanik rölelere göre maliyetli olması, dijital rölelerin güç sistemlerine entegrasyonu karşısındaki zorluklar olsa da bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, dijital rölelerin güç sistemlerinin korunmasında sağladığı avantajın tüm bu olumsuzlukları kapatabilecek seviyede olduğunu göstermektedir.

*Tablo 7: Senaryo 2 problem çözümü röle işlem süreleri*

Birincil röle	İkincil röle	$T_{i,br}$	$T_{i,ik}$	CTI
Röle1	Röle6	0.050	0.150	0.100
Röle2	Röle1	0.052	0.152	0.100
Röle2	Röle7	0.052	0.152	0.100
Röle3	Röle2	0.055	0.155	0.100
Röle4	Röle3	0.050	0.150	0.100
Röle5	Röle4	0.050	0.150	0.100
Röle6	Röle5	0.050	0.150	0.100
Röle6	Röle14	0.050	0.155	0.105
Röle7	Röle5	0.050	0.150	0.100
Röle7	Röle13	0.050	0.155	0.105
Röle8	Röle7	0.050	0.152	0.102
Röle8	Röle9	0.050	0.150	0.100
Röle9	Röle10	0.050	0.150	0.100
Röle10	Röle11	0.052	0.152	0.100
Röle11	Röle12	0.050	0.150	0.100
Röle12	Röle13	0.055	0.155	0.100
Röle12	Röle14	0.055	0.155	0.100
Röle13	Röle8	0.050	0.150	0.100
Röle14	Röle1	0.050	0.152	0.102
Röle14	Röle9	0.050	0.150	0.100

## Kaynaklar

Acharya, D., & Das, D. K. (2022). An efficient optimizer for optimal overcurrent relay coordination in power distribution system. *Expert Systems with Applications*, 199, 116858.

Akdag, O., & Yeroglu, C. (2021). Optimal directional overcurrent relay coordination using MRFO algorithm: A case study of adaptive protection of the distribution network of the Hatay province of Turkey. *Electric Power Systems Research*, 192, 106998.

Amraee, T. (2012). Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(3), 1415-1422.

Ataee-Kachoe, A., Hashemi-Dezaki, H., & Ketabi, A. (2023). Optimized adaptive protection coordination of microgrids by dual-setting directional overcurrent relays considering different topologies based on limited independent relays' setting groups. *Electric Power Systems Research*, 214, 108879.

Ayvaz, A. (2024). A new and effective directional overcurrent relay coordination approach for IIDG-based distribution networks using different setting groups for peak and off-peak demand periods. *Electric Power Systems Research*, 237, 111017.

Beder, H., Mohandes, B., El Moursi, M. S., Badran, E. A., & El Saadawi, M. M. (2020). A new communication-free dual setting protection coordination of microgrid. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(4), 2446-2458.

Choudhary, P. K., & Das, D. K. (2022). Optimal coordination of over-current relay in a power distribution network using aggrandized class topper optimization (a-cto) algorithm. *The Journal of Supercomputing*, 78(17), 19296-19321.

Choudhary, P. K., & Das, D. K. (2023). An effective optimization method for solving the relay coordination problem of the microgrids. *Knowledge-Based Systems*, 264, 110337.

Fayoud, A. B., Sharaf, H. M., & Ibrahim, D. K. (2022). Optimal coordination of DOCRs in interconnected networks using shifted user-defined two-level characteristics. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 142, 108298.

Hatata, A. Y., Ebeid, A. S., & El-Saadawi, M. M. (2022). Optimal restoration of directional overcurrent protection coordination for meshed distribution system integrated with DGs based on FCLs and adaptive relays. *Electric Power Systems Research*, 205, 107738.

Korashy, A., Kamel, S., Jurado, F., & Youssef, A. R. (2019). Hybrid whale optimization algorithm and grey wolf optimizer algorithm for optimal coordination of direction overcurrent relays. *Electric Power Components and Systems*, 47(6-7), 644-658.

Korashy, A., Kamel, S., Houssein, E. H., Jurado, F., & Hashim, F. A. (2021). Development and application of evaporation rate water cycle algorithm for optimal coordination of directional overcurrent relays. *Expert Systems with Applications*, 185, 115538.

Plongkrathok, C., Kaiyawong, K., & Chayakulkheeree, K. (2024). Adaptive Directional Overcurrent Relay Coordination in Microgrid Considering Optimal Full Setting Parameters. *Electric Power Components and Systems*, 52(7), 985-1000.

Sampaio, F. C., Tofoli, F. L., Melo, L. S., Barroso, G. C., Sampaio, R. F., & Leão, R. P. S. (2022). Adaptive fuzzy directional bat algorithm for the optimal coordination of protection systems based on directional overcurrent relays. *Electric Power Systems Research*, 211, 108619.

Srinivas, S. T. P. (2019). Application of improved invasive weed optimization technique for optimally setting directional overcurrent relays in power systems. *Applied Soft Computing*, 79, 1-13.

# BÖLÜM III

## 3d Yazıcı Tasarımı

**Ayşe ÇİÇEK<sup>1</sup>**  
**Muhsin Uğur DOĞAN<sup>2</sup>**  
**Uğur ÖZERCİN<sup>3</sup>**

### Giriş

Günümüzde 3D Yazıcı olarak bilinen 3-boyutlu yazıcı, en temel haliyle dijital ortamda hazırlanmış 3-boyutlu bir görselin veya tasarımın 3-boyutlu bir nesne olarak katı formda basılmasını sağlayan araç olarak tanımlanabilir.

3-boyutlu yazıcı, dijital ortamda hazırlanmış tasarımların seri üretiminden önce prototiplerinin elde edilmesini sağlayarak üretim başarısını önceden test etme imkanı ve dolayısıyla ürün geliştirme imkanı sunmaktadır. Bu sayede, geleneksel yöntemlere kıyasla 3- boyutlu yazıcı ile hem prototip üretimi hem de seri üretim

---

<sup>1</sup> Dr., Öğr. Üyesi Ayşe ÇİÇEK Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu Teknik Bilimler MYOİ, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, BOLU, Orcid: 0000-0002-9470-5196, cicekayse@ibu.edu.tr

<sup>2</sup> Dr., Öğr. Üyesi Muhsin Uğur DOĞAN Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu Teknik Bilimler MYOİ, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, BOLU, Orcid: 0000-0001-7341-1714, muhsinugurdogan@ibu.edu.tr

<sup>3</sup> Öğr. Gör Uğur ÖZERCİN Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu Teknik Bilimler MYOİ, Elektrik ve Enerji Bölümü, BOLU, Orcid: 0009-0003-3201-0254, ozercin\_u@ibu.edu.tr

süreci; zaman, maliyet ve iş gücü bakımından avantaj sağlamaktadır. Bu durum, girişimci firmaların 3-boyutlu yazıcı teknolojisine yatırım yapmaları sonucunu ortaya koymuştur. Ardından akademik çevrelerin ilgi göstermesi, birçok alanda sağladığı kolaylıklar ve medyada da daha fazla yer almaya başlaması ile 3-boyutlu yazıcı teknolojisi hızla gelişim göstermiştir. Ortaya çıkışı 1980’li yıllara dayansa da belirtilen sebeplerle 2010 yılından sonra adı daha fazla duyulmaya başlanmış ve günümüzde çok daha yaygın bir şekilde kullanılabilir hale gelmiştir.

Basım için kullanılan hammaddeler arasında plastik toz, reçine, oyun hamuru, seramik, yiyecek malzemeler, biyomateryal malzemeler, çimento, cam, çeşitli metaller, metal alaşımları ve bileşik malzemeler sayılabilir. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanı plastiktir. Farklı türlerde ve tekniklerde baskı yapabilen 3-boyutlu yazıcılar vardır. En yaygın kullanıma sahip olan 3-boyutlu yazıcıların çalışma prensibi, dijital ortamda hazırlanmış herhangi bir 3-boyutlu tasarımın sanal olarak katmanlara bölünmesine ve her bir katmanının eritilen hammadde dökülerek üst üste gelecek şekilde basılmasına dayanır.

Günümüzde evlerimizde dahi kullanılabilen 3-boyutlu yazıcılar eğitim, havacılık ve uzay, sağlık, gıda, tekstil, inşaat, savunma sanayi, kuyumculuk ve otomotiv gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir (Akbaba ve Akbulut, 2021).

### **3D Yazıcı**

3-boyutlu yazıcılar, bilgisayar ortamında çizilmiş olan 3-boyutlu modellerin fiziksel nesnelere dönüştürülmesini sağlayan araçlardır. Bu araçlar, geleneksel yöntemlerle üretimi zor ya da imkansız olan karmaşık geometriye sahip parçaların üretimini de mümkün kılmaktadır.

3-boyutlu yazdırma işlemi şu şekilde gerçekleşir: Öncelikle basımı yapılacak parçanın bilgisayar ortamında CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) programı ile model çizimi gerçekleştirilir. Parçanın modeli STL formatında kaydedilir ve 3-boyutlu yazıcı

kontrol programına aktarılır. Burada parçanın modeli dilimlenerek katmanlara ayrılır ve G kodu dosyası oluşturulur. G kodu dosyası yazıcıya gönderilerek baskı işlemi gerçekleştirilir. 3-boyutlu yazdırma işleminde ilk katman oluştuktan sonra diğer katmanlar aynı şekilde üst üste basılarak parça tamamlanana dek baskı işlemi devam eder (Barnatt, 2016).

Sonrasında, parçada meydana gelebilecek hataların kontrol edilmesi, onarılması, parçanın yazıcı tablasında doğru şekilde yerleştirilmesi ve üretim yönünün belirlenmesi gibi bir dizi ön ve gerekirse destek yapılarını oluşturma işlemleri Ultimaker Cura gibi yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilir.

3D baskı üretim süreci, herhangi bir düzen, hat kurulumu veya kalıp gereksinimi gibi ek maliyet ve iş yükü oluşturabilecek sistemler kurulmasına gerek olmaksızın, doğrudan ürün tasarımından üretime geçiše olanak tanır.

Baskı işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılan hammadde çeşitliliği ve teknik detaylardaki farklılıklar 3D yazıcı teknolojilerinde de farklılıkların ortaya çıkışına sebep olmuştur. Şimdi bu teknolojilerden bahsedelim.

## **Endüstriyel Tasarımda Kullanılan 3D Yazıcı Teknolojileri**

3D yazıcı teknolojilerinin çalışma prensibi katmanlı imalat (additive manufacturing) tekniğine dayanır. Katmanlaştırma işleminde farklı tekniklerin kullanılması 3D yazıcıların da farklılaşmasına sebep olur. 3D yazıcıların farklılaşmasına sebep olan bazı teknolojileri inceleyelim (<https://www.boyutkat.com>):

### **1. Malzeme Ekstrüzyonu ile 3D Baskı**

Malzeme ekstrüzyonu, katı termoplastik hammaddenin (filament) eritilmesiyle yapılan bir 3D baskı işlemidir.

## *Eriyik Yığıma Modellemesi (FDM) Teknolojisi*

En yaygın kullanılan ve en ekonomik 3D baskı teknolojisidir. 3D yazıcının nozülü yeterli sıcaklığa ulaşıncaya dek ısıtılır. Ardından filament bir motor vasıtasıyla ısıtılmış nozülden itilir ve filament erimeye başlar. Eriyen filament, ekstruderin belirtilen koordinatlarda hareket etmesiyle soğuması ve katılaşması için baskı tablasına dökülür.

Bir katman tamamlandığında, diğer katmanlar da benzer şekilde üst üste basılarak istenilen model katı formda elde edilir.

## **2. Polimerizasyon ile 3D Baskı**

Bir ışık kaynağının fotopolimer hammaddeyi (reçine) sertleştirilmesiyle gerçekleşen bir 3D baskı işlemidir.

### *Stereolithography (SLA) Teknolojisi*

Bilinen en eski 3D yazıcı teknolojisi olsa da günümüzde hala kullanılmakta olan bir tekniktir. SLA teknolojisine sahip 3D yazıcılarda biri  $x$ -ekseni diğeri  $y$ -eksenin de konumlandırılmış galvanometre veya galvo olarak bilinen aynalar kullanılır. Bu aynalar, bir lazer ışınını hedefleyerek reçineyi sertleştirip katmanların oluşumunu sağlar.

### *Dijital Işık İşleme (DLP) Teknolojisi*

DLP tekniği ile SLA tekniği neredeyse aynıdır. Her iki teknikte de baskı için reçine kullanılır ve baskı yapılırken ışıktan faydalanılır. SLA da ışık kaynağı lazer iken DLP de bir dijital ışık projektörüdür.

### *Maskeli Stereolithography (MSLA) 3D Baskı Teknolojisi*

Işık kaynağı olarak bir led dizisi kullanılır. Yani DLP'den farklı olarak ikinci bir lazer diyot veya DLP ampül gibi tek noktalı ışık kaynağı yerine çoklu ışık kaynağı kullanılır.

MSLA ve DLP da baskı süreleri SLA'ya göre daha kısa olabilir. MSLA, LCD birimlerinin maliyetinin daha düşük olması sebebiyle, masaüstü reçine 3D yazıcı kategorisinde tercih edilen bir

teknolojidir.

### **3. Toz Yatak Füzyonu (Polimerler) ile 3D Baskı**

Toz yatak füzyonu, bir termal enerji kaynağının katı bir nesne oluşturmak için bir yapı alanındaki toz parçaları arasında seçici olarak füzyonu tetikleyen bir 3D baskı işlemidir.

#### *Seçici Lazer Sinterleme(SLS) Teknolojisi*

SLS tekniğinde de SLA da olduğu gibi baskı işlemi için lazer kullanılır. Fakat SLS tekniğinde hammadde olarak reçine yerine toz malzeme kullanır.

### **4. Malzeme Püskürtme (Polyjet) ile 3D Baskı**

Fotopolimer veya balmumu tanelerinin seçici olarak biriktirildiği ve bir baskı tablasında sertleştirildiği bir 3D baskı işlemidir. Bu işlemde aynı nesne farklı hammaddeler kullanılarak basılabilir. Bundaki amaç, basılan nesneye destek yapıları sağlamaktır.

#### *Malzeme Jeti (MJ) 3D Baskı Teknolojisi*

Çalışma prensibi alışıktığımız mürekkep püskürtmeli yazıcı ile aynıdır. Ekstruder yüzlerce fotopolimer tanesini püskürtür ve bir ultraviyole ışını aracılığıyla bu taneler sertleştirilir.

#### *Drop on Demand (DOD) 3D Baskı Teknolojisi*

Çift ekstruder kullanılan bir teknolojidir. Ekstruderlerden biri mum benzeri malzemeyi biriktirirken diğeri çözünebilir destek yapısı için kullanılır.

#### *Bağlayıcı Püskürtme ile 3D Baskı Teknolojisi*

Sıvı bir bağlama maddesinin bir toz yatağının bölgelerini seçici olarak bağladığı bir teknolojidir.

#### *Kum Bağlayıcı Püskürtme ile 3D Baskı Teknolojisi*

Kumdan parçalarak üretmek için kullanılan ekonomik bir teknolojidir. Karmaşık geometrilere sahip nesnelerin üretim



sürecinin maliyetini düşüren bir yöntemdir.

### *Metal Bağlayıcı Püskürtme ile 3D Baskı Teknolojisi*

Nesnelerin oluşumunda iki aşamanın kullanıldığı bir teknolojidir. İlk aşamada, metal toz parçacıkları polimer bir madde ile bağlanır. Parçacıklar tamamen sertleştikten sonra gevşek tozdan çıkarılır ve bağlayıcının ısıtıldığı bir fırına yerleştirilir. Bu nesnede boşluklar oluşmasını sağlar. İkinci aşamada, boşlukların dolması için bronz kullanılır. Bu sayede nesnenin dayanıklılığı artırılmış olur. Bu yöntemle elde edilen metallerin mekanik özellikleri toz yatak füzyonu ile yapılan metallere göre daha düşüktür.

### **5. Doğrudan Enerji Biriktirme (DED) ile 3D Baskı**

Eritilen metal tozlarının veya telin biriktirilmesi ile nesne oluşumunu sağlayan bir 3D baskı işlemidir.

### *Lazerle Tasarlanmış Net Şekil (LENS) 3D Baskı Teknolojisi*

Toz dağıtma nozüllü, nozülde çıkan tozu eritmeye yarayan bir lazer kafa ve gaz borusundan oluşan bir biriktirme başlığı kullanılır.

### *Elektron Işını Katkı Üretimi (EBAM) 3D Baskı Teknolojisi*

Metal tozlarının veya telin eritilmesinde ısı kaynağı olarak bir elektron ışını kullanılır.

### **6. Toz Yatak Füzyonu(Metaller) ile 3D Baskı**

Metal toz yatak füzyonu, bir termal enerji kaynağının metal toz parçacıkları arasında tek seferde tek katman füzyonu sağlayarak katı nesnelere oluşturan bir 3D baskı işlemidir.

### *Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) 3D Baskı veya Seçici Lazer Eritme (SLM) ile 3D Baskı Teknolojisi*

SLS'ye benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Fakat bu teknik metal parçaların üretimi için kullanılır.

## *Elektron Işını Erime (EBM) ile 3D Baskı Teknolojisi*

Metal toz parçacıkları arasında füzyonu sağlamak için yüksek enerjili bir ışın veya elektron kullanılır. Odaklanmış bir elektron ışını, ince bir toz tabakasını tarayarak belirli bir enine kesit alanı üzerinde bölgesel erimeye ve katılaşıma sebep olur.

EBM, DMLS ve SLM'ye göre enerji yoğunluğunun daha yüksek olması sebebiyle üretim hızı daha yüksektir.

## *Multi Jet Fusion (MJF) 3D Baskı Teknolojisi*

SLS ve MJ teknolojilerinin bir birleşimidir. Mürekkep püskürtmeli püskürtme uçlarına sahip yazıcı, basım bölgesinin üzerinden geçerek ince bir plastik toz tabakası üzerine kaynaştırıcı madde bırakır.

## **FDM Teknolojisine Sahip 3D Yazıcı Tasarımı**

Bu kısımda, FDM teknolojisine sahip 3D yazıcıların temel parçalarından ve 3D yazıcılar ile yapılan üretim aşamalarından bahsedilmiştir. Ardından, 3D baskı ile örnek bir uygulama verilmiş ve bir 3D yazıcı tasarımı yapılmıştır.

### **1. 3D Yazıcının Temel Parçaları**

3D yazıcı, karmaşık mekanik bir sistem olup çok sayıda bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenler, yazıcının verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için birlikte uyum içinde çalışırlar. Her bir bileşen, yazıcının genel performansını doğrudan etkileyen kritik bir rol oynar. Dolayısıyla, bu sistemlerin her birinin fonksiyonu yazıcı tasarımı ve üretim süreçleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bölümde, 3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan temel parçaları neler olduğunu inceleyeceğiz (<https://www.boyutkat.com>).

### **Ekstruder (Extruder)**

Ekstruder, 3D yazıcının en kritik parçalarından biri olarak kabul edilir. Bu parça, filamentin eriyip akışkan hale gelmesini sağlayarak baskı sırasında katman katman modele yerleştirilmesini

sağlar. Ekstruderin temel işlevi, malzemeyi (genellikle plastik filament) uygun bir şekilde beslemek, ısıtmak ve yazıcı kafasından uygun hızda çıkışını sağlamaktır. Filamentin nozüle iletiildiği ve eritildiği bölümdür (Şekil 1).



*Şekil 1*

Ekstruder, genellikle iki ana parçadan oluşur: Besleme mekanizması ve ısıtıcı nozül. Besleme mekanizması, filamentin doğru hızda ve torkta yazıcının beslenmesini sağlar. Isıtıcı nozül ise filamentin sıcaklık kontrolünü yaparak erimiş malzemenin doğru şekilde uygulanmasını sağlar.

#### *Besleme Mekanizması*

Besleme mekanizması motor ve dişli sisteminden meydana gelir. Motor, filamentin ekstruderin içine doğru itilmesini sağlar. Dişli sistem, bu filamentin doğru şekilde beslenmesine yardımcı olur.

## *Nozül (Hotend)*

Ekstruderin bir parçası olan nozül, filamentin ısıtıldığı ve sıvı hale geldiği bölümdür (Şekil 2). Filamentin sıcaklık sensörü aracılığıyla belirli bir sıcaklıkta tutulmasını ve ardından yazıcı kafasından nozüle doğru itilerek katmanların oluşturulmasını sağlar. Sıcak filamentin baskı için çıktığı kafa noktasıdır. Ekstruderin son kısmında bulunan bu parça, eritilen filamentin modelin yüzeyine doğru yerleştirilmesini sağlar. Genellikle metalden üretilen nozül, çok küçük bir açıklığa (örneğin 0.4 mm) sahiptir. Bu dar açıklık yazıcının yüksek hassasiyetle baskı yapabilmesini mümkün kılar. Farklı nozül çapları, farklı baskı hızları ve ayrıntı düzeylerine göre tercih edilir.



*Şekil 2*

## **Yatak (Print Bed)**

3D yazıcılarda baskı yapılan yüzeydir ve oluşturulan modelin temeli olarak görev yapar (Şekil 3). Yatak, yazıcının en önemli bileşenlerinden biridir. Çünkü üzerinde baskı yapılan nesne doğrudan yerleştirilir. Yatakların çoğu ısıtılabilir (heated bed) olup bu özellik baskı işlemi sırasında malzemenin düzgün bir şekilde yapışmasını ve soğurken şeklinin bozulmamasını sağlar. Isıtılmalı yataklar, özellikle PLA gibi filamentler için baskı sırasında başarılı sonuçlar elde edilmesine yardımcı olurken, ABS gibi daha hassas malzemelerde de baskının deformasyona uğramasını engeller.

Isıtma, malzemenin ilk katmanlarının yüzeye yapışmasını güçlendirir ve baskının sonunda modelin düzgün bir şekilde soğumasını sağlar.



Şekil 3

### **Motorlar (Step Motor)**

3D yazıcılarda hareketi sağlayan motorlar, genellikle adım motorları (step motorlar) olarak kullanılır (Şekil 4). Bu motorlar, yazıcının hareketli parçalarını (ekstruder, yatak, eksenler) hassas bir şekilde kontrol eder. Adım motorları, belirli bir açı ile hareket eder ve bu sayede yazıcı çok ince adımlarla hareket eder, böylece yüksek hassasiyet elde edilir.



*Şekil 4*

### **X, Y ve Z Eksen Motorları**

Yazıcıda hareketi sağlamak için üç ana eksen motorları bulunur:

*X Eksen:* Yazıcının yatay hareketini sağlar.

*Y Eksen:* Yazıcının derinlik hareketini sağlar.

*Z Eksen:* Yazıcının dikey (yükseklik) hareketini sağlar.

### **Yazıcı Çerçevesi (Frame)**

Yazıcının çerçevesi, tüm parçaların sağlam bir şekilde montelenmesini sağlayan yapıdır. Çerçeve, 3D yazıcının stabilitesini sağlar ve baskı işlemi sırasında vibrasyonları minimize eder. Genellikle alüminyum veya çelik gibi dayanıklı malzemelerden yapılır. Çerçeve, tüm bileşenleri yerinde tutarak yazıcının doğruluğunu ve kalitesini etkileyen kritik bir role sahiptir.



*Şekil 5*

### **Yol Tabanı ve Lineer Raylar (Linear Rails and Guides)**

Bu parçalar, 3D yazıcının hareketli kısımlarının düzgün ve hassas bir şekilde hareket etmesini sağlar. Yol tabanı, ekstruderin ve baskı yatağının belirli bir eksende hareket etmesini sağlayan bir tür ray sistemidir. Bu raylar genellikle metalden yapılır ve doğruluğu yüksek olmalıdır. Lineer raylar, yazıcının doğruluğunu ve uzun ömürlülüğünü artıran kritik parçalardır.

### **Termistör Algılayıcılar**

3D yazıcılarda sıcaklık yönetimi çok önemlidir. Çünkü filamentin doğru sıcaklıkta eritilmesi gerekmektedir. Termistörler, sıcaklıkları ölçen algılayıcılardır ve hem nozül hem de ısıtılmalı yatak üzerinde bulunabilirler. Bu sensörler, yazıcının sıcaklık düzenlemesi yapmasına yardımcı olur ve aşırı ısınma veya soğuma gibi sorunları engeller.

### **Seramik Isıtıcı**

Sıcak ucun ısınmasını sağlayan, 12V ile çalışan 40W'lık bir seramik ısıtıcıdır (Şekil 6). Silindirik bir şekli vardır ve sıcak ucun hemen üzerindeki metal bölmeye girer. Termistör ise hemen bunun yanında yer alır ve sıcak ucun kaç dereceye ısındığını ölçer. Bu iki

parça, filamentinizi eritecek uygun sıcaklığın belirlenmesi için çok önemlidir.



Şekil 6

### Güç Kaynağı (Power Supply)

Güç kaynağı, yazıcıya elektrik sağlayan bileşendir. Hem ekstruderin hem de ısıtmalı yatakların düzgün çalışabilmesi için yeterli güç sağlamak zorundadır (Şekil 7). Genellikle AC (alternatif akım) güç kaynağı kullanılır. Ancak bazı modellerde DC (doğru akım) kaynakları da olabilir. Güç kaynağının kalitesi, yazıcının güvenli çalışmasını ve stabil baskı almayı sağlamak için kritiktir öneme sahiptir.



Şekil 7



## LCD Ekran ve Kontrol Paneli (LCD Screen and Control Panel)

Çoğu 3D yazıcı, kullanıcıların yazıcıyı kontrol etmesini sağlayan bir LCD ekranla donatılmıştır (Şekil 8). Bu ekran, yazıcının durumu hakkında bilgi verir ve işlem sırasını gösterir. Bazı yazıcılarda dokunmatik ekranlar bulunurken, diğerlerinde fiziksel düğmeler yer alır. Ayrıca, yazıcıya bağlanabilen harici kontrol panelleri ve Wi-Fi özellikleri de mevcuttur.



Şekil 8

## Filament

Filament, termoplastik polimerlerin 3D yazıcılar için belirli bir biçimde işlenerek şekillendirilen formudur. (Şekil 9) Temelde, granül formdaki malzeme çeşitli işleme aşamalarından geçirilerek plastik bir tel şeklinde biçimlendirilir. Elde edilen filament, özel tekniklerle bir makaraya sarılır, tıpkı bir bobin gibi düzenlenir. İlk bakışta basit bir işlem gibi görünse de, granülden filament üretimi ve filamentin sarılmasına kadar olan tüm süreçler, dikkat ve özen gerektiren aşamalardır. 3D yazıcıda filamentin düzenli akış ve kullanımı, üretim sürecinin kalitesini doğrudan etkileyen kritik

faktörlerden biridir. Filamentler, genellikle 1.75 mm veya 3.00 mm çaplarında olmak üzere çeşitli boyutlarda ve çok sayıda farklı renkte temin edilebilir. Ayrıca, karanlıkta parlayan veya ışık altında parıltı veren özelliklere sahip filamentler, içerdikleri küçük metal pul parçacıkları sayesinde bu etkiyi oluşturabilir. Filament seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli faktörlerden biri, kullanılacak filament çapının, 3D yazıcının ekstrüderinin boyutuna uygunluğudur.

*PLA (Polylactic Acid)*, filament türleri arasında en yaygın olarak tercih edilen seçenektir. Diğer filamentlere kıyasla, çevresel açıdan en sürdürülebilir özelliklere sahip olan PLA, biyolojik olarak doğada çözünür ve baskı süreci sırasında zararlı kokular yaymaz.

*ABS (Akrilonitril Butadien Stiren)*, PLA'dan sonra en yaygın kullanılan filament türüdür. Mekanik özellikleri bakımından ABS, PLA'ya göre 3D yazıcılarda kullanımı daha zor bir malzeme olsa da, teknik özellikler açısından PLA'dan üstün özellikler sunmaktadır. Günlük yaşamda PLA'ya kıyasla daha geniş bir kullanım alanına sahip olan ABS, yüksek sıcaklık dayanımı ve dayanıklılığı ile dikkat çeker. Bununla birlikte, düşük esneklik özellikleri vardır ve hammadde yapısı nedeniyle yiyecek ve içeceklerle teması önerilmez.

*PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)*, termoplastik bir polimer olup, özellikle 3D yazıcılar için yaygın olarak kullanılan filament türlerinden biridir. PETG, polietilen tereftalat (PET) polimerinin glikol ile modifikasyonu yoluyla elde edilir ve bu modifikasyon, malzemeye yüksek şeffaflık, artırılmış dayanıklılık ve esneklik gibi üstün özellikler kazandırır. Diğer filament türlerine kıyasla daha yüksek kimyasal direnç gösteren PETG, düşük ısı genleşme oranı sayesinde baskı sırasında şekil bozulmalarını ve deformasyon riskini minimize eder. Bu özellikler, PETG'yi dayanıklı, esnek ve şeffaf parçaların üretimi için ideal bir seçenek haline getirir. Ayrıca, baskı sürecinde düşük koku yayma eğilimi gösterdiği için çevre dostu ve kullanıcı dostu bir malzeme olarak öne çıkar. PETG, mekanik özelliklerinin yanı sıra iyi yüzey yapışması

sağlama ve yüksek yüzey kalitesi elde etme kapasitesine de sahiptir, bu nedenle genellikle dayanıklı ve şeffaf prototiplerin üretiminde tercih edilmektedir.

Bunun yanı sıra, mühendislik uygulamalarında kullanılabilen diğer filament türleri arasında PoliPropilen (PP), PoliAmid (PA), TPU, TPE, ASA gibi malzemeler yer alırken, karbon-elyaf katkılı PoliAmid, PET, cam-elyaf katkılı PoliPropilen ve 316L çelik filamentleri de son kullanım ürünlerinin üretimi için uygun seçenekler sunmaktadır.



Şekil 9

### **Ekstra Bileşenler ve Yükseltmeler**

*Filament Sensörleri:* Bazı gelişmiş 3D yazıcılarda, filamentin bitip bitmediğini tespit eden sensörler bulunur. Bu sensörler, filamentin tıkanması veya bitmesi durumunda baskıyı durdurur.

*Otomatik Yatak Düzleştirme (Auto Bed Leveling):* Yatak düzleştirme, baskı kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Bu işlev, yazıcının yatak yüzeyinin yüksekliğini otomatik olarak ölçer ve yazıcıyı her baskıda doğru hizalama için ayarlar.

*Soğutma Fanları (Cooling Fans):* Soğutma fanları, yazdırma sırasında filamentin hızlı bir şekilde soğumasını sağlar. Bu, özellikle

hassas detaylar ve ince katmanlar için gereklidir. Ekstruderde ve baskı yatağının yakınında fanlar bulunabilir.

## **2. 3D Yazıcılarla Yapılan Üretim Aşamaları**

### **a. 3D Baskı İçin Model Tasarımı**

3D baskı ile üretimi planlanan bir ürünün, öncelikle bir CAD modeli (bilgisayar ortamında tasarlanmış dijital model) ile oluşturulması gerekmektedir. Günümüzde, CAD modeli oluşturma imkânı sağlayan birçok yazılım mevcuttur ve bu yazılımlar, kullanım kolaylıkları ile karmaşıklık düzeylerine göre farklılık göstermektedir. Endüstriyel tasarımlar için sıklıkla tercih edilen ve ileri düzey özelliklere sahip yazılımlar arasında SolidWorks, AutoCAD ve Fusion 360 gibi programlar yer almaktadır. Bunun yanı sıra, basit parçaların tasarımı için kullanılabilir ve ücretsiz olarak sunulan web tabanlı yazılımlar arasında Tinkercad gibi seçenekler de bulunmaktadır (<https://www.makinaegitimi.com>) .

CAD modelinin oluşturulmasının ardından, dosyanın 3D baskıya uygun bir formata dönüştürülmesi gerekmektedir. Birçok dosya formatı mevcut olmakla birlikte, 3D yazıcılarda en yaygın olarak kullanılan format STL formatıdır. STL formatına dönüştürme işlemi, günümüzde birçok modern CAD yazılımı tarafından kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. STL dosyaları, ASCII (insan tarafından okunabilen metin biçimi) veya ikili (makine tarafından okunabilen) biçim olmak üzere iki farklı biçimde kaydedilebilir. İkili biçim genellikle daha küçük dosya boyutlarına sahip olup, işlenmesi açısından daha hızlıdır. Bununla birlikte, STL dosyaları renk veya doku bilgisi içermez; bu özellik, STL formatını özellikle 3D baskı için uygun kılmaktadır. Ayrıca, STL dosyalarında diğer dosya formatlarında bulunan nesne düzenleme ve değişim için gerekli olan katmanlar veya gruplar hakkında herhangi bir bilgi bulunmamaktadır.

### **b. Dilimleme Yazılımı**

3D baskı genellikle, bir 3D modeli alıp yazıcının son 3D nesneyi oluşturmak için bir dizi 2D katmana dönüştüren dilimleme

işlemi kullanır. Bu işlem sırasında, yazıcının hareketlerini, baskı sıcaklığını, hareket hızını ve diğer baskı parametrelerini belirleyen G kodları üretilir. Çoğu dilimleme yazılımı, kullanıcının yazdırılacak 3D modeli seçmesine, dolgu yoğunluğu, katman yüksekliği gibi yazdırma ayarlarını belirlemesine ve ardından G kodunu oluşturmasına olanak tanır. G kodu daha sonra yazıcıya yüklenir ve baskı süreci başlar. 3D baskı için yaygın olarak kullanılan dilimleme yazılımlarına Ultimaker Cura, PrusaSlicer, MatterControl, Simplify3D, KISSlicer, Slic3r, IdeaMaker ve Ultimaker Essentials örnek verilebilir. Bu yazılımlar, baskı sürecini özelleştirmek için destek yapıları, dolgu desenleri ve baskı hızı gibi çeşitli seçenekler sunmaktadır. G kodu oluşturulmasıyla dijital dosya ile ilgili işlemler tamamlanmış olur. Bu aşamanın ardından, 3D yazıcının baskıya hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Malzeme yerleştirilmesi ve baskı teknolojisine özgü ön işlemler gerçekleştirilir.

Doğru dilimleme ayarları, başarılı ve başarısız bir baskı arasındaki farkı belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, dilimleme yazılımlarının çalışma prensiplerini ve her bir ayarın baskı sonuçları üzerindeki etkilerini anlamak son derece önemlidir. Sorunun bir kısmı, optimum dilimleme yazılımı ayarlarının yazdırılacak tasarıma ve kullanılan filamenteye bağlı olmasıdır. Bu nedenle, herkese uygun tek bir ayar veya mükemmel bir ayar bulunmamaktadır.

Dilimleme yazılımının temel özelliklerinden bazıları incelendiğinde, şu noktalar öne çıkmaktadır:

*Katman Yüksekliği:* Katman yüksekliği ayarı, modelin çözünürlüğü olarak değerlendirilebilir. Bu ayar, baskı sırasında her filament katmanının yüksekliğini belirler. İnce katmanlarla yapılan baskılar, her bir katmanın daha zor fark edileceği pürüzsüz bir yüzey oluşturur. Daha ince katmanlarla baskı yapmak, modelin yazdırılma süresini uzatırken, aynı zamanda modelin oluşturan katman sayısını da artırır. Eğer modelin ayrıntılarına önem verilmeyen bir yazdırma yapılacaksa, daha kalın bir katman yüksekliği ile baskılar daha hızlı

bir şekilde tamamlanabilir. Ancak, bu durumda yüzey daha pürüzlü olacak ve katmanlar daha belirgin hale gelecektir. Düşük çözünürlüklü baskılar, detayların önemli olmadığı prototipleme işlemleri için hızlı bir çözüm sunar. Karmaşık detaylara sahip bir modelin yazdırılması isteniyorsa, daha ince bir katman yüksekliği seçilerek, en yüksek baskı kalitesine ulaşılabilir. Orta çözünürlüklü tasarımlar için genellikle 0.1 mm katman kalınlığı olmalıdır. Eğer basılacak model fazla ayrıntı içermiyorsa, orta seviye ayarlar, örneğin spiral satranç seti gibi belirli detay seviyelerine sahip birçok tasarım için oldukça uygun bir seçenek olacaktır. Daha büyük katmanlar, ayrıntı içermeyen baskılar için en iyi sonuçları sağlar. Genellikle, düşük çözünürlüklü baskılar için 0.2 mm katman kalınlığı önerilmektedir.

*Kabuk Kalınlığı:* Tasarımın içi boş bölümleri belirlenmeden önce, tasarımın dış duvarlarının 3D yazıcı tarafından kaç katmandan oluşacağı belirtilmelidir. Bu, yan duvarların kalınlığını tanımlar ve baskının dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu katman sayısının artırılması, duvarları kalınlaştırarak baskının mukavemetini artıracaktır. Dilimleme yazılımlarında, bu değer genellikle otomatik olarak 0,8 mm olarak ayarlanır. Bu nedenle, dekoratif baskılar için bu ayarın değiştirilmesine gerek yoktur. Ancak, daha fazla dayanıklılık gerektiren bir model basılacaksa ya da su geçirmez bir nesne üretilmek isteniyorsa, kabuk kalınlığının artırılması önerilir.

*İç Dolgu Oranı:* Bir modelin dış kabuğundaki boşluğun yoğunluğunu belirleyen iç dolgu oranı, genellikle katman yüksekliği gibi milimetre yerine yüzde (%) cinsinden ayarlanır. Eğer bir model %100 iç dolgu oranıyla yazdırılıyorsa, modelin iç kısmı tamamen katı olacaktır. Dolgu oranı ne kadar yüksekse, nesne o kadar sağlam ve ağır olur, ancak bu durum daha fazla yazdırma süresi ve filament tüketimi gerektirir. Her yazdırmada %100 dolgu oranı kullanmak, maliyetli ve zaman alıcı olabilir. Bu nedenle, modelin kullanım amacına göre uygun iç dolgu oranı seçilmelidir. Görsel amaçlı bir model üretilecekse, %10-20 arası iç dolgu oranı önerilmektedir.

Daha işlevsel ve dayanıklı bir parça isteniyorsa, %75-100 arasında bir iç dolgu oranı tercih edilmelidir.

*Baskı Hızı:* Baskı hızı, ekstruderin filamentini itererek hareket ettiği hızı ifade eder. En uygun baskı hızı, yazdırılan modelin türüne, kullanılan filament tipine, 3D yazıcının özelliklerine ve katman yüksekliğine bağlı olarak değişir. Aşırı hızlı baskılar, karmaşık hatalara ve bozuk görünüme neden olabilir. Karmaşık detaylara sahip modellerde daha düşük bir hız, daha kaliteli bir baskı elde edilmesini sağlar. Genellikle, 50 mm/s hızında bir baskı hızı, iyi bir başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir.

*Destek Yapıları:* Destek yapıları, yazdırılan modellerin, 3D yazıcının yatağında sabit kalabilmesi için yeterli temel malzemeye sahip olmayan kısımlarını destekleyen yapılar olarak tanımlanabilir. Modeller katmanlar halinde yazdırıldığından, 45 derece veya daha düşük açılara sahip bölgeler, ilk katmanla bağlantısı olmayan çıkıntılar oluşturur. Bu çıkıntılar, desteksiz olarak yazdırıldığında sarkık bir görünüm ortaya çıkarabilir. Destek yapıları, bu tür bölgelerin düzgün bir şekilde yazdırılmasını sağlamak için kullanılır.

FDM teknolojisinde, filamentin yerleştirilmesi, baskı tablasının ısıtılması ve gerektiğinde yapıştırıcı kullanımı gibi işlemler yapılırken; SLS (Selective Laser Sintering) teknolojisinde toz malzemenin yerleştirilmesi, önceki baskıdan kalan tozun temizlenmesi ve baskı hücresinin ısıtılması gibi işlemler uygulanır. Bu hazırlıkların tamamlanmasının ardından baskı işlemi başlatılır.

Gerekli ekipmanların ve yazıcının hazırlanmasının ardından, 3D baskı işlemine geçilir. Katmanlı imalat olarak da bilinen 3D baskı, malzemenin katman katman eklenerek 3D nesnelere oluşturulması işlemidir. Yazıcı, erimiş plastiği veya diğer malzemeleri küçük bir nozul aracılığıyla dışarı çıkarır ve nesnenin tamamlanana kadar art arda katmanlar ekler. Nihai sonuç, dijital modelle büyük ölçüde örtüşen bir fiziksel nesne olarak elde edilir.

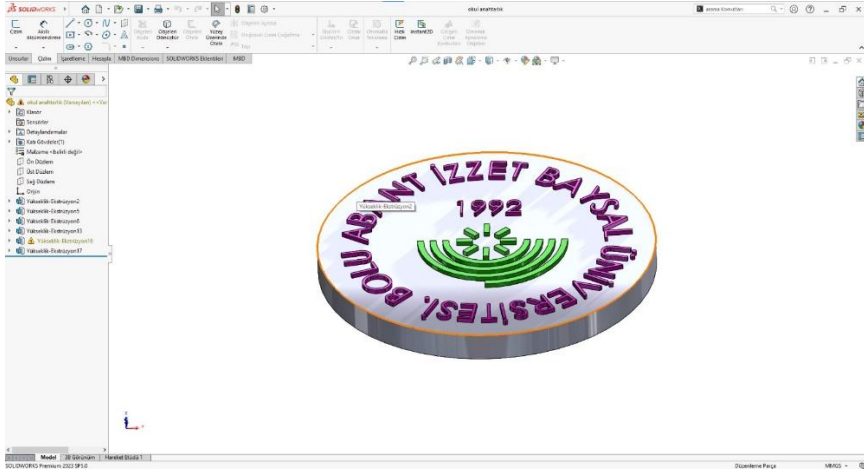
*Ardıl İşlemler:* 3D baskı işlemi tamamlandıktan sonra, üretilen parçanın bazı ek işlemlerden geçmesi gerekebilir. Bu

işlemler, kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişiklik gösterir ve destek malzemelerinin temizlenmesi, yüzey pürüzlerinin giderilmesi, kumlama, zımparalama, boyama ve parlatma gibi işlemleri içerebilir. Bu aşamalar, parçanın nihai kullanım amacına ve estetik gereksinimlere uygun hale getirilmesini sağlar.

#### d. 3D Baskı Örnek Uygulama

Şimdi a ve b bölümlerinde anlattığımız aşamaları örnek bir uygulamada adım adım inceleyelim:

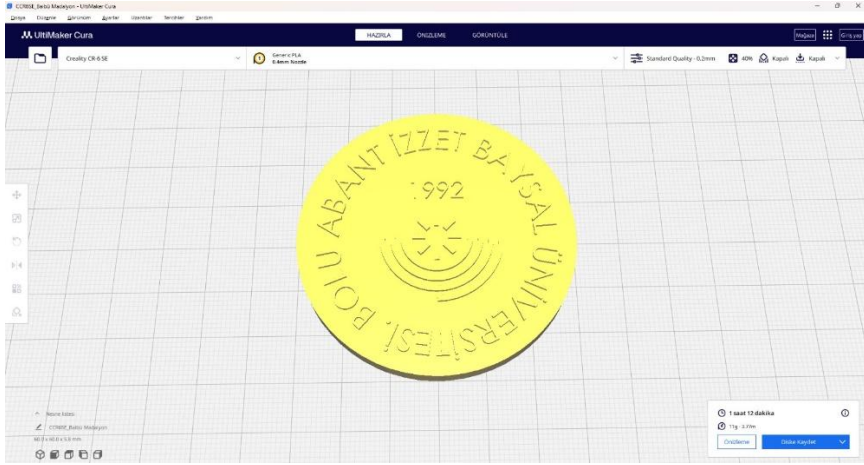
Şekil 10’ da basımı yapılacak ürünün SolidWorks programında tasarlanmış görüntüsü verilmiştir.



Şekil 10

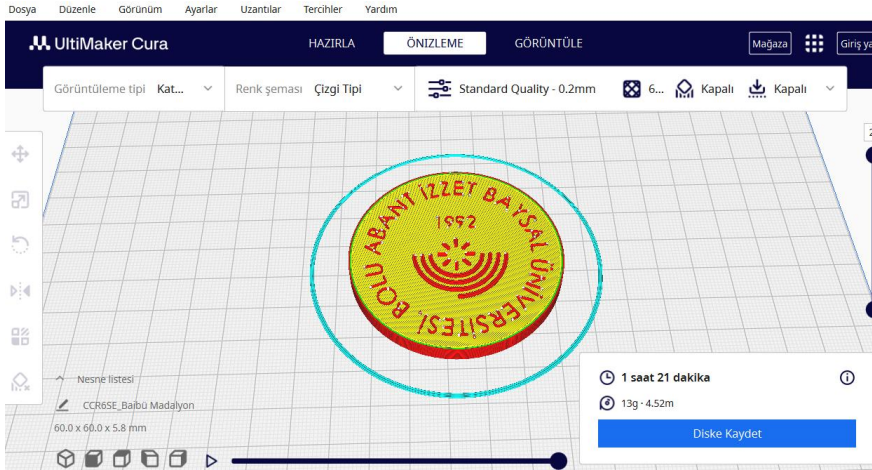
Şekil 11’da basımı tasarlanan ürünün Ultimaker Cura programına aktarılmış görüntüsü verilmiştir.



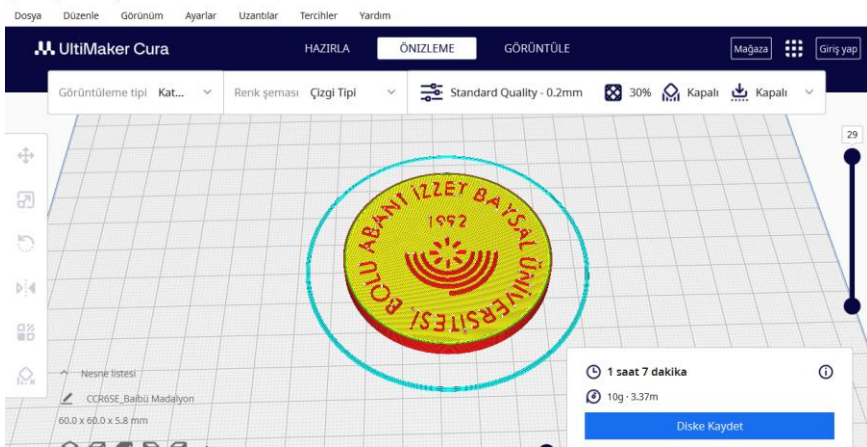


Şekil 11

Ultimaker Cura programı ile basımı tasarlanan ürünün ızgara dolgu oranı %60 ve %30 oluşturulmuş görüntüleri Şekil 12'de ve Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 12: Izgara Dolgu Oranı %60 Olan Ürün



*Şekil 13: Izgara Dolgu Oranı %30 Olan Ürün*

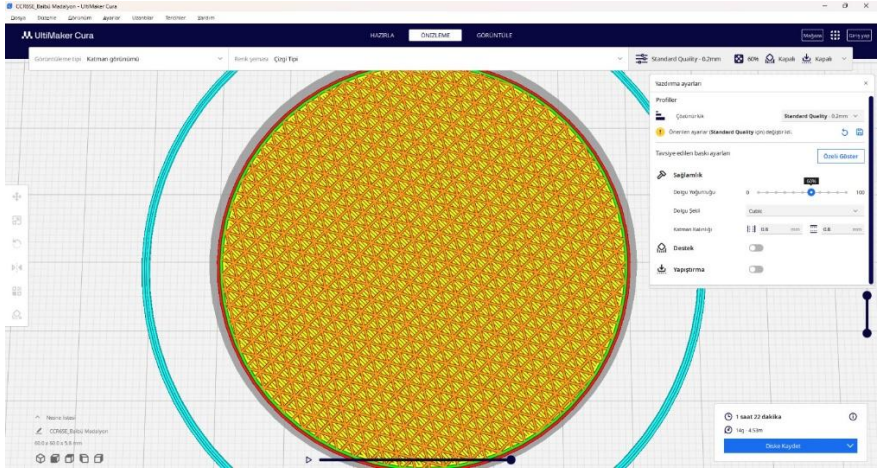
Izgara dolgu oranı %60 olan ürün 1 saat 21 dakikada, 13g ve 4.52 m uzunluğunda filament kullanılarak yapılacaktır. Izgara dolgu oranı %30 olan ürün 1 saat 7 dakikada, 10g ve 3.37m uzunluğunda filament kullanılarak yapılacaktır.

Dilimleme yazılımında ızgara; kübik, sekizli, eş merkezli, zig zag, cross, grid, gyroid ve yıldırım gibi çeşitli dolgu desenleri ile oluşturulmaktadır. Ultimaker Cura programı ile ızgara dolgu şekli kübik desende ve cross desende oluşturulmuş ürün görüntüsü Şekil 13'te ve Şekil 14'te verilmiştir.

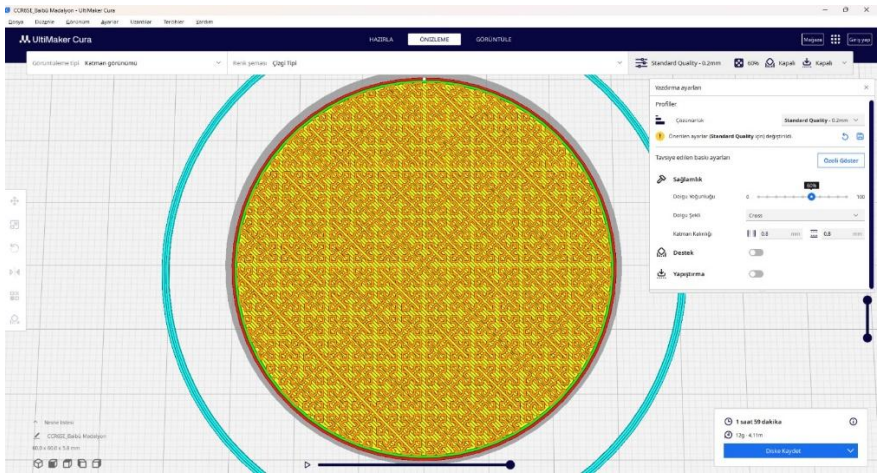
Şekil 14'te iç dolgu oranı %60 olan ızgara dolgu şekli kübik desende ürün 1 saat 22 dakikada basılacak, 14 g ve 4,53 m filament kullanılacaktır.

Şekil 15'te iç dolgu oranı %60 olan ızgara dolgu şekli cross desende ürün 1 saat 59 dakikada basılacak, 12 g ve 4,11 m filament kullanılacaktır.

Dikkat edilirse, bir ürünün ızgara dolgu şekli de basım süresini ve kullanılacak filament miktarını değiştirmektedir.

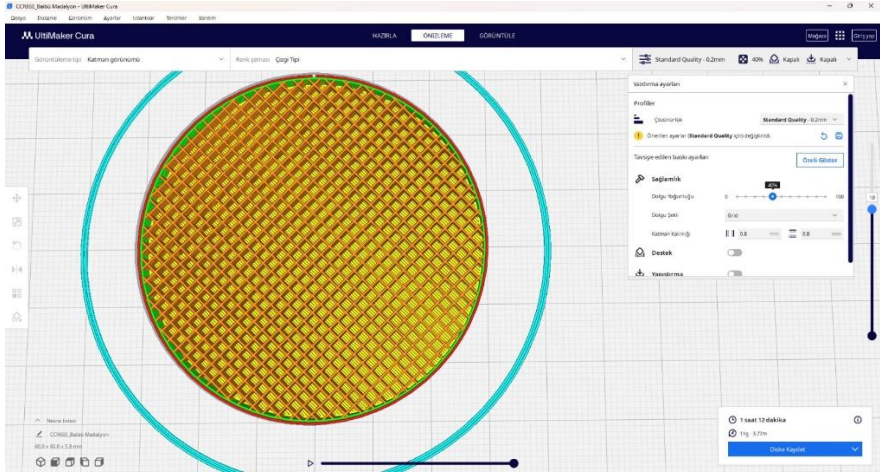


Şekil 14: Dolgu Şekli Kübik Desen



Şekil 15: Dolgu Şekli Cross Desen

Basımı tasarlanan ürün, Şekil 16’te iç dolgu oranı %40 ve ızgara dolgu şekli grid desende olup 1 saat 12 dakikada basılmıştır, 11 g ve 3,77 m filament kullanılmıştır.



Şekil 16

Şekil 17’de basımı tasarlanan ürünün basım işlemi bittikten sonraki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 17

#### d. 3D Yazıcı Tasarımı

Tasarım ve prototip üretimi yapılan üç boyutlu yazıcının mekanik montaj yapısı, genel hatlarıyla şu şekilde açıklanabilir: Yazıcı gövdesi, motorlar, miller, vidalar, rulmanlar, bağlantı elemanları ve diğer bileşenlerin taşıyacağı yükü destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada tasarlanan yazıcı, montaj kolaylığı ve eklenti yapılabilirlik açısından sigma profillerden oluşan bir gövde yapısıyla tasarlanmıştır. Yazıcı gövdesinde 4 adet 20x20x390 mm boyutlarında sigma profiller kullanılmıştır. Sigma profiller ve bağlantı sacları kullanılarak oluşturulan bu yapı üzerine eksenler monte edilmiştir. X ekseninde, eriyik serme kafasının taşıma işlevi yerine getirilmektedir. Bu eksen, Y eksenine üzerine montelenmiş olup, her iki eksen arasında senkronize bir hareket sağlanmıştır. X ekseninde, motor ve motor miline bağlanan kasnak aracılığıyla hareket sağlanmakta, kasnak ve kayış sistemiyle eriyik serme kafasının X ekseninde hareketi gerçekleştirilmiştir. Eriyik serme kafası, 2 adet indüksiyonlu mil üzerinde lineer rulmanlar ile hareket etmektedir. Y eksenindeki hareket, motordan kayış ve kasnak sistemi aracılığıyla aktarılmaktadır. Y eksenindeki miller, sabit yataklar ile sisteme entegre edilmiştir. Modelin oluşturulması için kullanılan tabla, Z ekseninde hareket etmektedir. Z eksenine hareketi, vidalı milin kaplin ile motora bağlanarak sağlanmaktadır. Vidalı mil ile entegre çalışan somun, tabla taşıyıcı plakaya montelenmiştir. Sistemdeki vidalı milin yanı sıra, 2 adet indüksiyonlu mil kullanılarak hareketin rijitliği artırılmıştır. Bu miller, tabla taşıyıcı plakaya lineer rulmanlar ile yataklanmıştır. Eriyik serme kafasının ana işlevi, erimiş plastik malzemenin nozul ucundan düzgün bir şekilde akışını sağlamaktır. Malzeme beslemesi, bir adet step motor ile gerçekleştirilmiştir. Eriyik serme kafasının gövdesine montelenen makara ve motor ucundaki dişli kasnak aracılığıyla, 1.75 mm çapında plastik telin nozul ucuna iletimi sağlanmaktadır. Yazıcıda, kontrol kartı, adım motorları, adım motoru sürücü devreleri, ısıtıcı uç ve ısıtıcı tabla gibi çeşitli elektronik bileşenler kullanılmıştır. Z ekseninin oluşturulması için, baskı işlemi sırasında kullanılan polimer malzeme ile step motorların yazıcının sağ ve sol kısımlarına montajı yapılır.

Ardından, Z eksenini vidalı milinin montajı için gerekli kaplinler yerleştirilir. Step motordaki dairesel hareketin kayışa iletilmesi amacıyla motora bir dişli kasnak takılmıştır. Bu kasnak, 20 diş ve 5 mm iç çapına sahip olup, kayış aracılığıyla hareket aktarımı sağlanır. Kayış, krom millere monte edilen rulmanlar yardımıyla, tablanın Y eksenini üzerindeki hareket kabiliyetini mümkün kılar. Z eksenini üzerine motor, miller ve tabla montelenmiştir. Z eksenindeki kayışın diğer ucuna rulman yerleştirilmiş olup, millere lineer rulmanlar takılmıştır.

Son zamanlarda üç boyutlu yazıcıların kontrolü için denetleyici kartlar kullanılmaktadır. Bu kartların temel işlevi, step motorları, ısıtıcı nozulu ve ısıtıcı tablasını kontrol etmektir. Tasarlanan yazıcıda, 1 adet Arduino Mega 2560 ve RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) elektronik kontrol kartı kullanılmıştır. Bu kart, üç boyutlu yazıcıda ihtiyaç duyulan tüm elektronik kontrol işlevlerini yerine getirmek için tasarlanmıştır. Üç eksenin hareketi için birer adet ve filament besleme kısmı için bir adet olmak üzere toplamda dört adet adım motoru kullanılmıştır. Adım motor sürücüsü, üç boyutlu yazıcıda kullanılan motorların hareketini sağlamak için kullanılır. Isıtıcı tabla, baskı sırasında malzemenin yüzeye yapışmasını ve çarpılmasını engellemek amacıyla kullanılır. PLA malzemesi için ısıtıcı tabla genellikle gerekli olmasa da, ABS ve kompozit malzemelerin baskısında mutlaka kullanılmalıdır. Nozül kısmına end stoplar monte edilmiştir. Ekstruder ile nozül arasında filament aktarımını sağlamak amacıyla bir boru yerleştirilmiştir. Sıcak tabla takılmış ve kalibrasyonu yapılmıştır. Arduino kartında 54 adet G/Ç pini bulunmaktadır; bu kart 5V çalışma gerilimine ve her biri 40 mA giriş ya da çıkış kapasitesine sahiptir. Bu pinler, RAMPS'ın alt kısmındaki uygun pinlere bağlanarak veri akışı sağlanır. RAMPS, Arduino kartına yerleştirildikten sonra motor sürücüleri RAMPS üzerine montelenir ve üzerine soğutucular takılır. Son olarak, sıcak tabla, motorlar, ekstruder ve güç kaynağı, Arduino Mega 2560 ve RAMPS kitine bağlantı yapılır. Şekil 18' de çalışmada üretilen prototip 3D yazıcı görülmektedir.



## **Sonuç**

Çalışma sonucunda, 350x500x495 mm boyutlarında bir 3D yazıcı prototipi üretilmiştir. Yazıcının baskı boyutları 214x214x270 mm olup çift yazdırma ucu ve kartezyen eksen yapısına sahip bir tasarımla geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular, endüstriyel 3D yazıcıların makul maliyetlerle üretilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, gelecekte yapılacak benzer araştırmalar için örnek teşkil edebilecek ve daha da geliştirilebilecek bir temel oluşturmuştur.



## Kaynaklar

Sönmez, S., Kesen, U. ve Dalkılıç, C. (2018). 3 Boyutlu Yazıcılar, *6th International Printing Technologies Symposium*, 01-03 Kasım 2018, İstanbul üniversitesi-Cerrahpaşa (471-481).

Akbaba, A. ve Akbulut, E. (2021). 3 Boyutlu Yazıcılar ve Kullanım Alanları. *ETÜ Sentez İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 3, 19-46.

Boyut Kat (2021). *3D Yazıcı Teknolojileri Nelerdir?* (15/12/2024 tarihinde <https://www.boyutkat.com/3d-yazici/3d-yazici-teknolojileri-nelerdir/> adresinden ulaşılmıştır).

MakinaEğitimi (2023). *3D Yazıcılarla Yapılan Üretimin Aşamaları* (15/12/2024 tarihinde <https://www.makinaegitimi.com/3-boyutlu-yazicilarla-yapilan-uretimin-asamalari/> adresinden ulaşılmıştır).

Gebhardt, A. ve Fateri, M. (2013, January). 3D printing and its applications. In *RTEjournal-Forum für Rapid Technologie* 2013(1), 1-11.

Lipson, H. and Kurman, M. (2013) *Fabricated: The New World of 3D Printing*. New York: Wiley.

Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 53-69.

Barnatt, C. (2016). *3D Printing*. (10/12/2024 tarihinde <https://www.explainingthefuture.com/3dprinting.html> adresinden ulaşılmıştır).

Şahin, K. ve Turan, O.-B. (2018). Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2(2), 97-116.

Kai, C. C., Jacob, G. G. K., and Mei, T., (1997). Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems Part 1: A Study of Existing Interfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13, 566-570.

Erener, Ş. ve Boz, S. (2021). Modern Üretim Tekniklerinde Eklemeli İmalat Sistemlerinin Yeri ve Kullanım Alanları. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(1), 47-56.

Shellabear, M., Lenz, J., and Junior, V. (2004). E-manufacturing with Laser Sintering—to Series Production and Beyond. *Proceedings of the Fourth Laser Assisted Net Shape Engineering*, 1, 435–444.

Zhang, L.-C., Han, M. and Huang, S.-H. (2003). CS File - An Improved Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 21,15–19.

Kökhan, S. ve Özcan, U. (2018). 3D Yazıcıların Eğitimde Kullanımı. *Bilim, Eğitim, Sanat ve Teknoloji Dergisi (BEST Dergi)*, 2(1), 81-85.

Kuzu Demir, E., Çaka, C., Tuğtekin, U., Demir, K., İslamoğlu, H. ve Kuzu, A. (2016). Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojilerinin Eğitim Alanında Kullanımı: Türkiye'deki Uygulamalar. *Ege Eğitim Dergisi*. 17. 481-503.

Özsoy, K. ve Duman, B. (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. *International*

*Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry, 1(1),  
36-48.*

## BÖLÜM IV

### Yapay Zeka ve Gerçek Zamanlı Görüntü İşleme ile Konteyner Tespitinin Yapılması

**Emir Enes TAŞ<sup>1</sup>**

#### **Giriş**

Derin öğrenme, insanın düşünce yapısını veri setlerindeki örüntüler aracılığıyla deneyimleyerek bilgisayara aktaran, makine öğrenimi konseptinin özel ve çok yönlü bir halidir. Bu teknik, çeşitli disiplinler arasında çalışılabilir ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır [6]. Son zamanlarda yapılan gelişmeler, derin öğrenme modellerinin yeteneklerini kullanarak görüntülerdeki anlamsal örüntüleri daha etkili bir şekilde tanımlama kapasitesini arttırmıştır.

Yapay zeka algoritmaları ve derin öğrenme yöntemleri gerçek zamanlı nesne tespitinde birçok avantaj sağlamaktadır [7]. Günümüzdeki sınıflandırma yöntemlerine ait algoritmalar, derin

---

<sup>1</sup> Emir Enes TAŞ Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., Mersin/Türkiye, Orcid: 0009-0006-4058-1323 (Orcid lütfen link değil 16 haneli rakamları yazınız.), emir.tas@koluman.com

öğrenme yöntemlerinin makine öğrenmesine göre daha yüksek performans ve doğruluk oranları sağlaması nedeniyle

alternatif olarak derin öğrenme algoritmaları tercih edilmektedir [8]. Son yıllarda çeşitli derin öğrenme yaklaşımları kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmiş ve tartışılmıştır [9]. Derin ağların bilgisayarlı görme görevlerinde başarılı olduğu gösterilmiştir çünkü ortaklaşa ayrımcılık gerçekleştirirken uygun özellikleri çıkarabilmektedirler [9]. Nesne tespiti, nesnenin ait olduğu sınıfın örneğini belirleme ve nesnenin etrafındaki sınırlayıcı kutunun çıktısını alarak nesnenin konumunu tahmin etme prosedürüdür. Görüntüden sınıfın tek bir örneğinin tespit edilmesine tek sınıflı nesne tespiti, görüntüde bulunan tüm nesnelerin sınıflarının tespit edilmesine ise çok sınıflı nesne tespiti denir [11]. Derin öğrenme ve nesne tespitinin beraber kombinasyonlanmasıyla özellikle görüntü işleme konusunda ilerlemeler kaydedilmiştir. Günümüzde endüstriyel süreçlerde derin öğrenme ve gerçek zamanlı görüntü işleme ile nesne tespiti ile ilgili tekniklerin kullanımı verimliliği arttırmak, operasyonel süreçleri optimize etmek , yapılan işlemleri kolaylaştırmak gibi süreçlerde büyük önem taşımaktadır. Bu teknolojiler özellikle karmaşık ve yüksek ölçekli işlemlerde hataları minimum düzeye indirerek doğruluk oranının artırılmasını sağlamakta ve zaman kullanımı konusunda tasarruf sağlamaktadır [2]. Bu teknolojilerin hızla gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla beraber endüstriyel sektörlerdeki kullanım alanları da genişlemiştir. Bununla ilgili çoğu çalışma park gezi arabası, süpürücü, iç mekan servis robotu ve madencilik alanı gibi olması ile birlikte özellikle taşımacılık da önemli bir yere sahip olan konteyner taşıyıcılarda da otonomlaşıma çalışmaları yürütülmektedir [3]. Konteyner tespiti , limanlar, depolar, lojistik merkezler gibi büyük endüstriyel alanlarda kritik ve zorlu bir süreçtir [4]. Genellikle manuel yöntemlerle yapılan bu işlem zaman alıcı ve hizalama konusunda hata oranı yüksek olabilmektedir [5]. Ancak teknolojinin gelişimiyle birlikte yapay zeka ve gerçek zamanlı

görüntü işleme teknikleri kullanılarak bu işlem çok daha kolay hale getirilebilmektedir. Bu makalede derin öğrenme ve gerçek zamanlı görüntü işleme kullanılarak konteyner tespitinin yapılması amaçlanmıştır.

## **YÖNTEM**

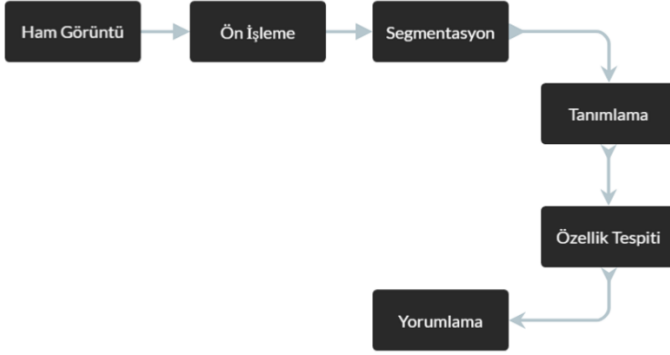
Konteynerlerin doğru ve hızlı bir şekilde tespitinin sağlanabilmesi için Python programlama dili ve OpenCV kütüphanesi kullanılmıştır. Özellikle nesne algılama alanında son derece başarılı sonuçlar veren YOLOv5 algoritması, konteynerlerin tespiti için tercih edilmiştir.

Kenar tespitlerinin doğru bir şekilde sağlanabilmesi için CANNY algoritması kullanılmıştır ve derin öğrenmede başarılı sonuçlar elde etmek için Tensorflow kütüphanesi kullanılarak derin öğrenme modeli eğitilmiştir.

Bu bölümde arka kamerasına erişildiğinde ve konteyner desteği özelliği aktif hale getirildiğinde taşınacak konteynerin dikdörtgen içine alınıp aracın bilgisayarının ekranına yansıtılması için nelerin yapılması gerektiğinden bahsedilmiştir.

## **Görüntü İşleme Adımları**

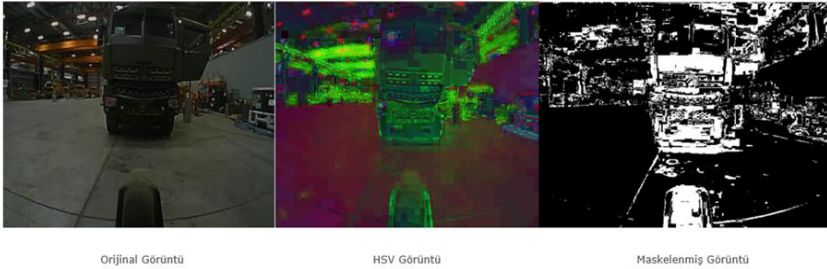
Görüntü işlemede temel olarak dört adım bulunmaktadır. İlk adım olarak gerekli araçlar ile görüntünün optik tarayıcı veya dijital fotoğraf ile elde edilmesi gelmektedir. Sonrasında elde edilen ham görüntünün renk dengeleme, blurlama ve maskeleme gibi ön işlemlerinden geçirilmektedir. Daha sonrasında ön işlemde geçen görüntüler sınıflandırılır. Son adım olarak analiz edilip işlenen veri raporu ve çıktısının sonucu alınmaktadır. Şekil 1’ de görüntü işleminin akış şeması verilmiştir.



Şekil 1

## Kenar Tespit Uygulamaları

Gerçek zamanlı kenar tespit uygulaması için ham görüntü üzerinde bir takım işlemler uygulanmaktadır. Öncelik olarak görüntü blurlama yapılır. Bunun amacı kenarları belirginleştirmektir. Daha sonrasında görüntü HSV renk formatına dönüştürülür. Bu sayede ışık şartlarına duyarlılık azaltılabilmektedir. Ardından görüntü Canny algoritması kullanılarak dönüştürülür. En son maskeleme işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlerin yapıldığı görüntü Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2

## Canny Kenar Belirleme Algoritması

Canny kenar belirleme algoritması, aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilir:

Görüntünün Gaussian filtresiyle bulanıklaştırılması: İlk adım, gürültüyü azaltmak için görüntünün bir Gaussian filtresiyle bulanıklaştırılmasıdır. Gaussian bulanıklaştırma, her bir pikseli çevresindeki piksellerle ortalayarak yapılır ve şu formülle gösterilir:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$$

Görüntüdeki gradyanların hesaplanması: Gradyanlar, kenarları belirlemek için görüntüdeki parlaklık değişimlerinin tespit edilmesini sağlar. Gradyan hesaplamak için Sobel operatörü kullanılır:

$$G_x = \frac{\partial I}{\partial x}, \quad G_y = \frac{\partial I}{\partial y}$$

Burada  $G_x$  ve  $G_y$ , sırasıyla yatay ve dikey gradyanları temsil eder. Gradyan büyüklüğü ise şu şekilde hesaplanır:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Non-maximum suppression (maksimum olmayanların bastırılması): Gradyan yönüne göre, kenar olmayan pikseller bastırılır. Bu işlem, sadece yerel maksimum olan gradyan büyüklüklerinin korunmasını sağlar.

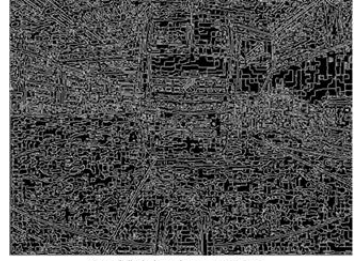


Çift eşikli kenar belirleme: **Çift eşikli kenar belirleme:** İki sınır değeri ( $T_{min}$  ve  $T_{max}$ ) kullanılarak, piksellerin kenar olup olmadığına karar verilir:

Gradyan büyüklüğü  $T_{max}$ 'den büyük olan pikseller doğrudan kenar olarak kabul edilir. Gradyan büyüklüğü  $T_{min}$ 'in altında olan pikseller kenar olarak kabul edilmez.  $T_{min}$  ile  $T_{max}$  arasında kalan pikseller, sadece birbirine bağlı olduklarında kenar olarak kabul edilir. Kenar izleme (Edge tracking): Kenarlar, tespit edilen piksellerin birbirine bağlantılı olup olmadığına göre izlenir ve sonuç olarak nihai kenar görüntüsü elde edilir.



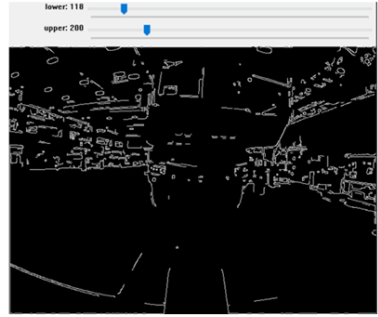
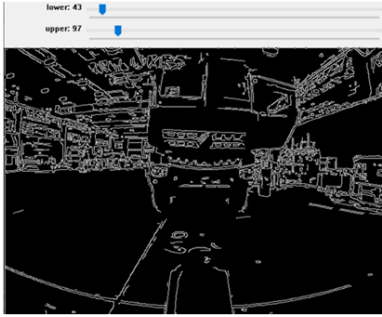
Orjinal Görüntü



Sınır değerleri ayarlanmamış görüntü

Şekil 3

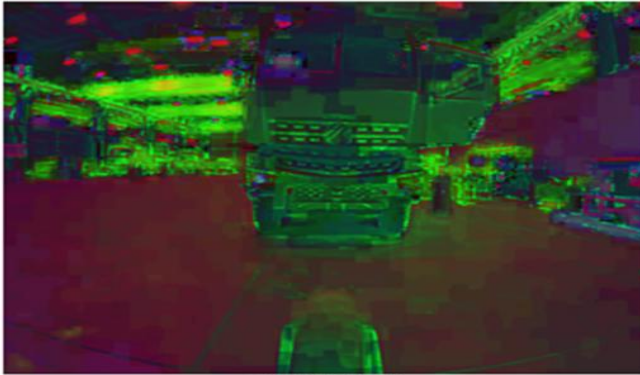
Kenar belirleme işlemi için alt ve üst değer ayarları yapıldıktan sonraki görüntü Şekil 4 de gösterilmiştir



Şekil 4

### HSV RENK UZAYI

HSV renk uzayında H değeri yani renk özü sabit olarak seçilmiştir. Diğer değerler yani renk doygunluğu ve parlak değerleri 0 ile 100 arasında değiştirilerek elde edilen görüntü Şekil 5 de gösterilmiştir.



HSV Görüntü

Şekil 5

## Maskeleme İşlemleri

Maskeleme işleminde doğru eşik değeri önemlidir. Bunun için `cv2.getTrackBarPos()` fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 6 da eşik değeri ayarlanmamış ve ayarlanmış görüntüler gösterilmiştir.



Eşik değerleri ayarlanmamış görüntü



Eşik değerleri ayarlanmış görüntü

*Şekil 6*

## YOLO

YOLO konvansiyonel sinir ağları kullanarak nesne tespiti yapan bir algoritmadır. Bu ismin sebebi ise algoritmanın nesne tespitini oldukça hızlı bir şekilde ve tek seferde yapabiliyor olmasıdır.

YOLO algoritmasının diğer algoritmalarından daha hızlı olmasının sebebi resmin tamamını tek seferde nöral bir ağdan geçiriyor olmasıdır. Bu çalışmada YOLOv5 versiyonu kullanılmıştır.

## Veri Seti

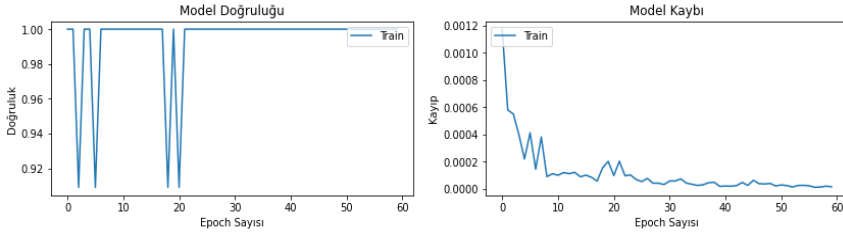
Yapılan çalışmada önceden eğitilmiş iki adet model kullanılmıştır. Buradaki veri setleri COCO( Common Objects in Context ) hazır olarak alınmıştır. Ancak buradaki veri setlerinde konteyner ile ilgili veri bulunmamaktadır. Bundan dolayı konteyner ile ilgili veri seti hazırlanmış ve eklenmiştir.

## Derin Öğrenme Modeli ve Eğitimi

Veri seti oluşturulduktan sonra buradaki veri seti çerçeveleme işleminden geçirilmiştir. Sonrasında derin öğrenme modeli Tensorflow kütüphanesi kullanılmıştır. Şekil 7 de model doğruluğu ve model kaybı gösterilmiştir.

Model Doğruluğu hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{\text{Doğru Pozitifler} + \text{Doğru Negatifler}}{\text{Toplam Örnek Sayısı}}$$



Şekil 7

## SONUÇ

Bu çalışma, YOLOv5 modeli, OpenCV kütüphanesi, TensorFlow ve Canny kenar algılama algoritmasını içermektedir. YOLOv5 modeli, nesne tespiti için kullanılırken, OpenCV kütüphanesi görüntü işleme ve manipülasyonu için kullanılmıştır. TensorFlow ise derin öğrenme modelini eğitmek ve sonuçları işlemek için

kullanılmıştır. Canny kenar algılama algoritması ise görüntülerdeki kenarları algılamak için kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonunda model %97 oranında doğruluk oranına sahiptir. Konteyner tespitinin görselleri Şekil 8 de gösterilmiştir.



Şekil 8

Gelecek çalışmalarda, bu bileşenlerin daha iyi entegrasyonu ve optimizasyonu ile birlikte nesne tespiti doğruluğunun ve işleme hızının artırılması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, YOLOv5 modelinin farklı versiyonları veya alternatif derin öğrenme modelleri ile de denemeler yapılabilir, Canny kenar algılama algoritmasının parametreleri iyileştirilebilir ve OpenCV ile TensorFlow arasındaki veri akışı daha etkin hale getirilebilir.

# BÖLÜM V

## Nato Aktarma Test Kiti

**Fırat Tokmak**

### 1. GİRİŞ

Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO), 1949 yılında 12 ülke tarafından imzalanan Kuzey Atlantik Antlaşması'na dayanarak kurulan uluslararası bir askeri ittifaktır. NATO, kuruluşu ile birlikte, üye ülkeler arasında askeri iş birliğini ve güvenliği sağlamak amacıyla önemli bir rol üstlenmiştir. Bugün toplamda 30 ülkenin üye olduğu bu ittifak, tarihi boyunca değişen jeopolitik dinamikler ve güvenlik tehditlerine yanıt verme yeteneği ile dikkat çekmektedir. NATO'nun merkezi Brüksel, Belçika'dadır ve burada yapılan toplantılar, stratejik kararların alınmasında önemli bir zemin oluşturur [1].

NATO, Soğuk Savaş döneminde komünizm tehdidine karşı bir savunma mekanizması olarak ortaya çıkmış ve zamanla terörizm, siber güvenlik tehditleri, iklim değişikliği gibi yeni güvenlik tehditleri ile başa çıkma yeteneğini geliştirmiştir. Bu bağlamda, üye ülkelerin askeri standartlarının ve iş birliğinin güçlendirilmesi,

NATO'nun etkinliğini artıran temel unsurlardan biri olmuştur. Özellikle çok uluslu askeri operasyonlarda, farklı ülkelerde üretilen ekipmanların uyumlu bir şekilde çalışabilmesi, kolektif savunma ilkesinin gerekliliklerinden biridir.

STANAG (Standardization Agreement), NATO üyesi ülkeler arasında standartların belirlenmesi ve uyumun sağlanması amacıyla oluşturulmuş yazılı anlaşmalardır [2]. Bu anlaşmalar, NATO'nun çeşitli alanlarda ortak standartlar geliştirmesine ve bu standartlara uygunluğun sağlanmasına yönelik bir çerçeve sunar [3]. STANAG'lar, askeri operasyonlarda kullanılan ekipman, sistem ve prosedürler gibi kritik konularda ortak bir anlayış ve uyum sağlamak için tasarlanmıştır. Her bir STANAG, belirli bir konu veya alanda belirlenen gereksinimleri ele alarak, üye ülkelerin bu standartlara uyumlu hareket etmesini temin eder [4].

STANAG standartları, askeri araçlar, askeri iletişim cihazları, askeri giysi ve ekipmanlar gibi birçok ürünün tasarımında ve üretiminde geçerlidir [5]. Bu standartlar, farklı ülkelerde üretilen ekipmanların, operasyonel birliğin sağlanabilmesi için uyumlu bir şekilde çalışmasını garantiler. Özellikle askeri araçlarda, NATO Askeri Standartları (STANAG), üretilen ve kullanılan araçların uyumluluğunu sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Örneğin, STANAG 4569, zırhlı araçların balistik koruma seviyeleri ile bu araçların karşılayabileceği mermi türleri ve patlayıcıların etkisine karşı dayanıklılığını belirleyen önemli bir standarttır. Bu standart, araçların zırh kalınlıkları, yapısal özellikleri ve koruma seviyelerini detaylı bir şekilde analiz ederek, askeri operasyonların güvenliğini artırmayı amaçlar [6][7][8].

Askeri araçların aydınlatma grupları, askeri operasyonların etkinliği için kritik bir öneme sahiptir. Zorlu ve değişken koşullarda görev yapan bu araçlar, doğru ve güvenilir aydınlatma sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Bu bağlamda, STANAG 4381 standardı, taktik kara araçları üzerinde acil aydınlatma sistemlerinin tasarımına ve uygulanmasına yardımcı olmayı hedefler [9][10]. Askeri avantajın sağlanabilmesi için, askeri konvoyların karanlık ortamlarda hareket etmesi gerekmektedir. Normal farlar ve arka lambalar yeterli aydınlatmayı sağlarken, düşman tarafından kolayca fark edilmemelerine olanak tanımak adına, aydınlatma sistemlerinin tasarımı büyük önem taşır. Bu nedenle, karartma lambalarının kullanılması, askeri araçların gizlilik ve güvenlik gereksinimlerini karşılama da kritik bir rol oynar. Düşman tarafından fark edilmemek için yatay ve dikey parlamayı azaltmak da oldukça önemlidir. Askeri araçlarda genellikle iki tür karartma lambası kullanılmaktadır: işaret lambaları ve sürüş lambaları. Koyu ışıklar, aracın konumunu diğer sürücülere göstermekle birlikte, yol aydınlatma işlevi görmez ve normal koşullarda dönüş sinyali görevini de üstlenir [9].

Konvoy takibi, askeri operasyonların en kritik unsurlarından birini oluşturur. Bu sistem, bir lider araç ve onu takip eden araçlar şeklinde organize edilmiştir. Bu araçlar arasında etkili iletişim ve koordinasyon sağlanması, operasyonel başarının anahtarıdır. Bu amaçla, NATO Konnektörü adı verilen 12 pinli bir konnektör kullanılmaktadır. Bu konnektörün pin sıralaması, STANAG 4007'ye göre belirlenmiştir. Konnektörle birlikte kullanılan spiral kablo, araçların birbirine bağlanmasını ve bağlı araçların tek bir araç gibi görünmesini sağlar. Ancak, bu sistemin her bir araç için doğru çalıştığını kontrol etmek amacıyla başka bir askeri araca ihtiyaç



duyulması, her zaman mümkün olmayabilir. Bu durum, sahadaki operasyonel etkinliği tehlikeye atabilir ve zaman kaybına yol açabilir.

Bu sorunu çözmek amacıyla, test kitinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu test kiti, başka bir araca ihtiyaç duymadan konvoy takibi sistemi için gerekli kontrollerin kolaylıkla yapılabilmesini sağlar. Geliştirilen bu yenilikçi çözüm, askeri personelin sahada daha hızlı, etkili ve güvenli bir şekilde test gerçekleştirmesine olanak tanır. Ayrıca, bu test kiti bakım ve onarım süreçlerini de hızlandırarak, askeri araçların sürekli operasyonel hazır olmasını temin eder. Sonuç olarak, NATO standartlarına uygunluk sağlanarak, uluslararası iş birliği ve güvenlik hedeflerine katkıda bulunulmuş olur.

Bu bağlamda, çalışmanın amacı, tasarlanan portatif test kitinin özelliklerini, işleyişini ve avantajlarını derinlemesine inceleyerek, askeri operasyonlarda sağladığı katkıları daha iyi anlamak olacaktır.

## **2. YÖNTEM**

### **Röle nedir?**

Röle, elektriksel bir sinyali kullanarak daha büyük bir akımın açılıp kapanmasını sağlayan elektromekanik bir anahtardır. Genellikle bir bobin, bir hareketli kontak ve bir sabit kontak içerir. Bobine uygulanan elektrik akımı, elektromanyetik bir alan oluşturarak hareketli kontağın sabit kontakla temasa geçmesine neden olur. Bu sayede, küçük bir kontrol sinyali ile daha büyük bir yükün kontrolü sağlanır.

### **Röleli Bir Sistem Kurgusu**

Röleli sistemler, düşük güçlü bir sinyal ile daha yüksek güçlü bir devreyi kontrol etmek için yaygın olarak kullanılır. İşte adım adım bir röleli sistemin nasıl kurgulanacağına dair detaylı bir açıklama:

## **1. Gerekli malzemeler**

**Röle:** Seçilecek röle, kontrol edilecek yükün akım ve voltaj değerlerine uygun olmalıdır.

**Kontrol Cihazı:** Buton, anahtar veya sensör.

**Yük:** Kontrol edilecek cihaz (örneğin, lamba, motor).

**Güç Kaynağı:** Yük için uygun voltajda bir güç kaynağı.

**Bağlantı Kabloları:** Uygun kalınlıkta ve uzunlukta kablolar.

**Röleli Sistemde Devre Şemasının Hazırlanması**

Röleli bir sistemin devre şemasının hazırlanması, sistemin doğru çalışmasını sağlamak için önemli bir adımdır. İşte bu sürecin detaylı açıklaması:

## **1. Gerekli elemanların belirlenmesi**

Devre şemasını hazırlamadan önce, sistemde kullanılacak ana elemanları belirleyin:

**Röle:** Kontrol edilecek yükün voltaj ve akım değerlerine uygun bir röle seçin.

**Kontrol Anahtarı:** Röleyi tetiklemek için bir buton veya anahtar.

**Yük:** Kontrol edilen cihaz (örneğin lamba, motor).

Güç Kaynağı: Yük ve röle için gereken enerji kaynağı (genellikle DC veya AC voltaj).

## **2. Devre elemanlarının sembollerinin belirlenmesi**

Devre şemasında kullanılacak standart semboller:

Röle: □ (bobin) ve kontaklar (NO: Normally Open, NC: Normally Closed).

Buton: ◇ (anahtar).

Yük: Lamba veya motor sembolü.

Güç Kaynağı: (+) ve (-) sembolleri.

## **3. Devre şemasının tasarımı**

Devre şemasını çizerken aşağıdaki adımları takip edin:

Sembollerin Yerleştirilmesi: Seçtiğiniz sembolleri devre şemasında yerleştirin. Röle bobini ve kontakları arasında bir bağlantı oluşturun.

Bağlantı Hatları: Devre elemanları arasındaki bağlantıları düz çizgilerle çizin. Anahtar, röle bobini ve yük arasında bağlantılar oluşturun.

Güç Kaynağı Bağlantısı: Güç kaynağını ve yükü, röle kontaklarıyla bağlayarak yükün kontrolünü sağlayın.

Geliştirilen test kiti, içinde karartma sisteminin de dahil olduğu toplamda 9 adet röle içermektedir. Rölelerin seçimi, sistemin çekilen akım değerlerine dayanmaktadır ve bu, test kitinin işlevselliği açısından son derece önemlidir. Seçilen rölelerin gerekli bağlantıları tamamlandıktan sonra, sistemin doğruluğunu teyit etmek amacıyla

kısa devre testi uygulanmaktadır. Bu süreç, sistemin doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığını belirlemek için kritik bir adımdır. Röleler, araçta kullanılan ve NATO standartlarına uygun olarak tasarlanmış aydınlatma gruplarının kontrolünü sağlamakta, böylece sistemin entegrasyonunu ve işlevselliğini artırmaktadır. Bu rölelere ait görsel Şekil 1’de gösterilmiştir.

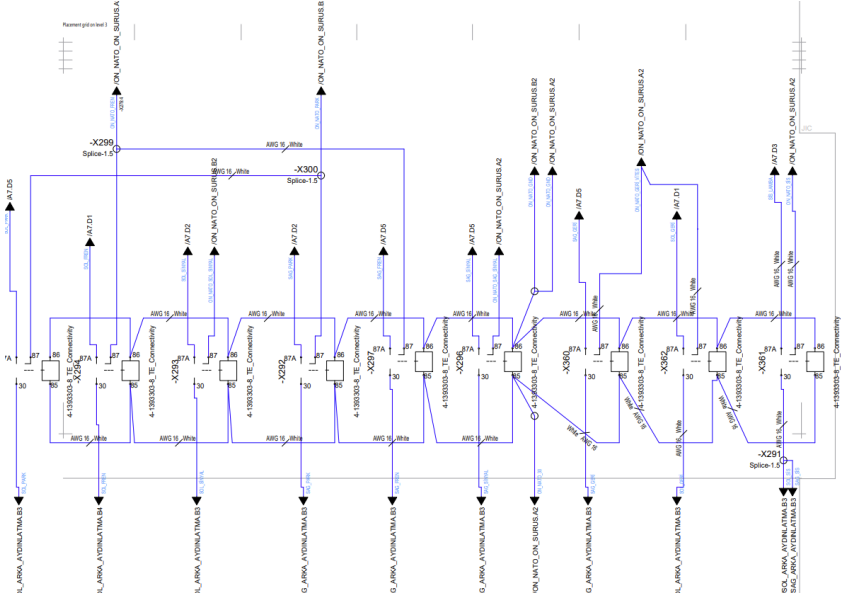
Test kitinin montajı tamamlandıktan sonra, aydınlatma grupları, butonlar ve rölelerin kontrolü için özel bir test kutusu tasarlanmıştır. Bu test kutusu, her bir bileşenin işlevselliğini ve uyumluluğunu kontrol etmeye yönelik bir arayüz sunmaktadır. Test kutusunun tasarımında, kullanıcı dostu bir arayüz oluşturulması amaçlanmıştır; bu sayede, operatörler test sürecini hızlı ve etkili bir şekilde yürütebilmektedir. Kullanıcı arayüzü, görsel geri bildirim ve hata tespit mekanizmaları ile desteklenmiş olup, operatörlerin süreç boyunca daha etkin bir deneyim yaşamalarını sağlar.

Test kitinin enerjilenmesi, araca bağlandığı yere göre değişiklik göstermektedir. Test edilecek aracın arka NATO soketi ile test kiti üzerindeki NATO soketinin bağlantısı sağlandığında, test kitinin enerjilenmesi aracın aküsü tarafından sağlanmaktadır. Bu durumda, gerekli bağlantılar tamamlandıktan sonra araç çalıştırılır ve aydınlatma grubu lambaları, hem sivil hem de askeri modlarda, tek tek yakılıp söndürülerek sistemin işlevselliği test edilir. Bu aşamada, operatörler, her bir lambanın doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığını izler ve gerektiğinde düzeltici adımlar atar. Aydınlatma sisteminin performansı, belirlenen standartlarla karşılaştırılarak değerlendirilir.

Diğer bir senaryoda, test kiti aracın ön NATO soketine bağlandığında, kitin enerjilenebilmesi için aracın aküsünden harici bir bağlantı yapılması gerekmektedir. Bu bağlantı sağlandığında, test kiti üzerinde bulunan kontrol butonları kullanılarak, aydınlatma gruplarının çalışma durumları incelenir ve gerekli kontroller gerçekleştirilir. Kontrol butonları aracılığıyla gerçekleştirilen bu testler, aydınlatma sisteminin tüm bileşenlerinin işlevselliğini kontrol etme fırsatı sunar. Operatör, sistemin her bir bileşeninin işlevselliğini izleyerek, potansiyel arızaları hızlı bir şekilde tespit edebilir.

Bu yöntem, askeri araçların konvoy takip sistemlerinin etkinliğini doğrulamak için hızlı ve pratik bir çözüm sunmaktadır. Böylece, potansiyel sorunlar zamanında tespit edilerek, araçların operasyonel durumu anlık olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, bu test kiti, askeri birliklerin sahada daha etkin ve güvenli bir şekilde görev yapmalarını desteklemekte ve operasyonel hazırlık seviyelerini artırmaktadır.

Sonuç olarak, bu test kitinin geliştirilmesi, askeri araçların sistemlerinin güvenilirliğini artırırken, NATO standartlarının uygulanabilirliğini de pekiştirmektedir. Bu, askeri personelin eğitime katkı sağlamakta ve NATO üyesi ülkeler arasındaki entegrasyonu desteklemektedir. Geliştirilen test kitinin sağladığı bu avantajlar, gelecekte daha geniş bir uygulama yelpazesi için temel oluşturarak, askeri teknolojinin evrimine katkıda bulunmakta ve modern savaş alanlarında daha yüksek verimlilik ve güvenlik sağlamayı hedeflemektedir.



Şekil 1

## SONUÇ

Geliştirilen portatif test kiti, askeri araçların NATO standartlarına uygun aydınlatma gruplarının ve diğer elektriksel donanımlarının uyumlu bir şekilde çalıştığına güvence altına alarak, sistemin doğruluğunu hızlı ve etkili bir biçimde kontrol etme imkanı sunmaktadır. Bu kitin en önemli avantajı, başka bir askeri araca ihtiyaç duymadan kullanılabilmesi olup, bu durum saha koşullarında önemli bir zaman tasarrufu sağlamaktadır.

Kullanıcılar, test kitinin pratik tasarımı sayesinde hızlı bir şekilde gerekli testleri gerçekleştirebilmektedir. Böylece, araçların operasyonel durumunu anlık olarak değerlendirmek mümkün hale gelmekte ve bu, askeri birliklerin genel operasyonel hazırlığını artırmaktadır. Özellikle zorlu saha koşullarında, donanımın

etkinliğini hemen kontrol edebilmek, potansiyel sorunları önceden tespit etme ve giderme fırsatı sunarak, görev güvenliğini ve etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Ayrıca, bu portatif test kitinin sahada hızlı ve etkili bir şekilde kullanılabilir olması, askeri personelin eğitime de katkı sağlamaktadır. Askeri personel, kitin kullanımı ile ilgili deneyim kazanarak, aydınlatma sistemlerinin çalışma prensiplerini ve NATO standartlarını daha iyi anlayabilir. Bu, hem bireysel becerilerin gelişmesine hem de takım içi koordinasyonun artırılmasına yardımcı olur.

Sonuç olarak, bu yenilikçi çözüm, askeri araçların işlevselliğini ve güvenilirliğini artırmanın yanı sıra, NATO'nun ortak güvenlik hedeflerine ulaşmasına katkıda bulunmaktadır. Test kitinin sağladığı avantajlar, uluslararası askeri iş birliğini güçlendirmekte ve NATO üyesi ülkeler arasındaki entegrasyonu desteklemektedir. Gelecekte, bu tür test kitlerinin sayısının artması, askeri operasyonlarda etkinliği daha da artıracak ve ulusal güvenliğe yönelik önemli bir araç haline gelecektir. Bu bağlamda, portatif test kitinin geliştirilmesi, askeri teknoloji ve standartların evrimine katkıda bulunarak, modern savaş alanlarında daha yüksek verimlilik ve güvenlik sağlamayı hedeflemektedir.

## REFERANSLAR

[1] *NATO* - *wikipedi*. (2004, November 14). <https://tr.wikipedia.org/wiki/NATO>

[2] NATO Glossary of Terms and Definitions AAP-06. Edition 2015. P. 2-I-8. <http://www.google.hu/> (12.03.2016)

[3] Nato. (n.d.). *Learn more*. NATO. <https://www.nato.int/cps/en/natohq/publications.htm#:~:text=A%20STANAG%20is%20a%20normative,part%2C%20with%20or%20without%20reservation>.

[4] Wikipedia contributors. (2024, February 28). *Standardization agreement*. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Standardization\\_agreement](https://en.wikipedia.org/wiki/Standardization_agreement)

[5] NATO Standardization Agreements: Their Role in Defining Interoperability", Michael J. Hull, Defense Acquisition Research Journal, Vol. 17 No. 3, 2010.

[6] Standardization in Military Vehicle Design: The Role of STANAGs", Jane's Defence Weekly, 2020.

[7] <https://nso.nato.int/nso/nsdd/main/list-promulg>. (n.d.-b). <https://nso.nato.int/nso/nsdd/main/list-promulg>

[8] Laboratuvar. (n.d.). *STANAG 4569 Zırhlı Araç balistik Koruma Seviyeleri testleri*. STANAG 4569 Zırhlı Araç Balistik Koruma Seviyeleri Testleri. <https://www.laboratuvar.com/sektorel/savunma/stanag-4569-zirhli-arac-balistik-koruma-seviyeleri-testleri/>



[9] Eurolab. (n.d.). *STANAG 4381 Taktik Kara Araçları için Karartma Aydınlatma Sistemleri*. STANAG 4381 Taktik Kara Araçları İçin Karartma Aydınlatma Sistemleri. <https://www.eurolab.net/sektorel/askeri-testler/stanag-4381-taktik-kara-araclari-icin-karartma-aydinlatma-sistemleri/>

[10] Implementing STANAGs in Military Communications Systems", *Military Technology Journal*, Vol. 45, 2018.

Fırat TOKMAK, Elektrik elektronik mühendisi, Koluman Otomotiv Endüstri,

## BÖLÜM VI

### Octave Ortamında Gürültülü Ses Sinyallerinin Filtrelenmesi ve Spektral Analizi

**Gizem FIRAT<sup>1</sup>**

#### **Giriş**

Günümüzün dijital dünyasında, ses sinyallerinin işlenmesi iletişim, medya, sağlık, eğitim ve savunma gibi birçok kritik alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Anaz, 2014). Özellikle ses tabanlı arayüzler, insan-makine etkileşiminin daha doğal ve sezgisel hale gelmesinde önemli rol oynar. Konuşma tanıma sistemleri, duyma cihazları, telekonferans uygulamaları ve multimedya içerik üretimi, gürültüsüz ve anlaşılır ses sinyallerine gereksinim duyan uygulamalara örnek olarak verilebilir (Bekir & Ulaş, 2003). Bununla birlikte, gerçek dünya koşullarında kaydedilen ses verileri genellikle arka plan gürültüsü, cızırtı, uğultu veya başka çevresel etmenlerle bozunuma uğrar. Bu tür istenmeyen bileşenler, sinyal içeriğini maskeleyerek hem insan kulağının algısını zorlaştırmakta hem de

---

<sup>1</sup> Uzman Sistem Mühendisi Gizem Fırat, Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., Askeri Projeler Müdürlüğü, Ankara/Türkiye, Orcid: 0000-0002-2279-5874, gizem.firat@koluman.com

otomatik analiz ve sınıflandırma süreçlerinin başarısını azaltmaktadır (Kul, Faruk & Deniz, 2016).

Gürültünün azaltılması veya giderilmesi, ses işleme alanında uzun süredir üzerinde durulan bir problemdir. Bu amaçla zaman, frekans veya zaman-frekans alanında geliştirilen çeşitli teknikler, farklı türde gürültüler ve uygulama senaryoları için önerilmektedir. Frekans uzayında gerçekleştirilen filtreleme yöntemleri, belirli bantlardaki istenmeyen bileşenlerin baskılanması prensibine dayanmaktadır (Flanagan, 1972; Rabiner & Schafer, 1978). Özellikle insan konuşmasının tipik frekans bandının 300 Hz - 3400 Hz arasında yoğunlaşması, bu bandın dışında yer alan gürültü bileşenlerinin filtrelenmesiyle önemli ölçüde iyileştirme sağlanabileceğine işaret etmektedir (Harris, 2020). Benzer şekilde müzik analizi, biyomedikal sinyal işleme (örneğin EEG veya EKG sinyallerinin arındırılması) ve güvenlik amaçlı dinleme sistemlerinde de uygun filtre yapıları kullanılarak işlenen sinyalin kalitesi artırılabilmektedir (Wang & Lee, 2019; Yılmaz, 2014a, 2014b).

Geleneksel filtreleme yöntemlerinin yanı sıra, günümüzde adaptif filtreler, yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar ve dalgacık (wavelet) dönüşümleri gibi daha ileri teknikler geliştirilmiştir (Gerekvar & ark., 2018). Ancak bu gelişmiş yöntemlerin uygulanabilmesi, öncelikle temel frekans alanı filtreleme tekniklerini anlayabilmeye, bu tekniklerle gürültünün temel özelliklerini keşfedebilmeye bağlıdır (Gültekin, Aksoy & Arslan, 2021). Dolayısıyla, temel lineer filtreleme ve spektral analiz yaklaşımlarının iyi kavranması, gürültü azaltma çözümlerini bir üst düzeye taşıyacak altyapıyı hazırlamaktadır (Yılmaz & ark., 2015).

Açık kaynaklı ve ücretsiz bir sayısal hesaplama ortamı olan Octave, MATLAB benzeri sözdizimi ve fonksiyonlarıyla gerek eğitimde gerekse araştırma projelerinde sıklıkla tercih edilir (Kul, Faruk & Deniz, 2016). Bu yazılım ortamı, Fourier dönüşümü (FFT),

FIR veya IIR filtre tasarımı, sinyal okuma-yazma fonksiyonları ve veri görselleştirme araçları gibi temel unsurları kolayca uygulamaya imkân tanımaktadır (Gerekvar & ark., 2018). Özellikle, kullanıcıların hızla prototipleme yapmasını ve farklı filtre yapılarını deneyerek elde ettikleri sonuçları hem sayısal metrikler (Sinyal-Gürültü Oranı, Ortalama Kare Hatası) hem de işitsel gözlem yoluyla değerlendirmesini mümkün kılar.

Bu çalışma, Octave ortamını kullanarak bir ses sinyaline yapay olarak eklenen Gauss gürültüsünün frekans alanında basit fakat etkili bir yaklaşım olan alçak geçiren FIR filtre yardımıyla temizlenmesini ve spektral analiz aracılığıyla sonuçların incelenmesini amaçlamaktadır. Bu sayede, temel filtreleme prensiplerini örnek bir uygulama üzerinden somutlaştırarak, daha ileri gürültü giderme yöntemlerine geçiş için bir temel oluşturulacaktır. Aynı zamanda, farklı gürültü düzeylerinde elde edilen performans sonuçları, hangi koşullarda basit lineer filtreleme stratejilerinin yararlı olabileceğine dair yol gösterici bilgiler sunacaktır.

## **Teorik Arka Plan**

Gürültünün ses sinyalleri üzerindeki etkisi, işaret işleme alanında önemli bir çalışma alanı olarak karşımıza çıkar. Özellikle ses sinyallerine eklenen yapay veya doğal gürültü, sinyalin içerdiği bilgiye erişimi zorlaştırmakta, bazen de istenen özelliklerin ortaya çıkarılmasını engellemektedir (Anaz, 2014).

Gürültü türleri farklı karakteristiklere sahip olabilir. Birçok sinyal işleme ve iletişim sisteminde, gerçekçi modeller oluşturmak amacıyla belirli türde gürültü süreçleri kullanılır. Bu kapsamda en yaygın kabul gören ve teorik altyapısı güçlü olan gürültü türlerinden biri Gauss gürültüsüdür (Flanagan, 1972). Gauss gürültüsü, olasılık dağılımı Gauss (normal) dağılımına uyan bir rastgele sürecin ürettiği bozucu bileşenleri ifade eder. Bu normal dağılım, istatistik ve olasılık kuramında merkezi bir yer tutar ve doğal sistemlerde

rastgele oluşan birçok olayın istatistiksel modeli olarak karşımıza çıkar (Yılmaz, 2014a; Yılmaz, 2014b).

Gauss gürültüsünü tanımlayan en önemli parametreler, ortalama (mean) ve varyanstır. Gürültünün ortalaması genellikle sıfır olarak alınır, çünkü sıfır ortalama, gürültü bileşenlerinin hem pozitif hem de negatif genlikli değerlere eşit olasılıkla sahip olduğunu gösterir (Wang & Lee, 2019). Bu durum, belirli bir yöne eğilimli olmayan, dengeli bir bozunumun sinyale eklendiğine işaret eder. Varyans ise gürültü genliklerinin ne ölçüde dağıldığını belirleyen kritik bir ölçüttür. Varyans yükseldikçe, gürültü genlikleri daha geniş bir aralıkta dağılır ve sinyali maskeleyerek, bilgi içeriğini bozma olasılığı artar (Harris, 2020).

Gauss gürültüsünün frekans alanındaki özellikleri de dikkat çekicidir. Bu tür gürültü, genellikle “beyaz” karakterde kabul edilir. Frekans spektrumunda belli bir banda yoğunlaşmak yerine tüm frekans eksenini boyunca yaklaşık sabit güç yoğunluğu gösterir (Rabiner & Schafer, 1978). Böylece Gauss gürültüsü, düşük frekanslardan yüksek frekanslara kadar geniş bir alanı etkisi altına alabilir. Bu durum, hem iletişim sinyallerinde hem de konuşma veya müzik kayıtlarında yararlı bilginin bulunduğu belirli frekans aralıklarını maskeleyerek işleme kalitesini düşürebilir (Kul, Faruk & Deniz, 2016).

Gauss gürültüsünün pratikte yaygın kullanılmasının sebeplerinden biri, teorik açıdan iyi anlaşılan, matematiksel olarak yönetilebilir bir model sunmasıdır (Gerekvar & ark., 2018). Örneğin, birçok iletişim kanalında lineer olmayan etkiler göz ardı edildiğinde, kanal gürültüsü Gauss gürültüsü olarak modellenebilir. Bu sayede kanal kodlaması, hata düzeltme algoritmaları veya filtre tasarımı gibi süreçler söz konusu gürültü modeline göre optimize edilebilir (Wang & Lee, 2019). Benzer şekilde, Gauss gürültüsü eklenmiş ses sinyallerinde, frekans alanı filtrelerinin etkinliğini test etmek ve çeşitli gürültü giderme yöntemlerini karşılaştırmak için Gauss

gürültüsü sıklıkla temel referans gürültü türü olarak tercih edilir (Yılmaz & ark., 2015).

Gauss gürültüsünün sıfır ortalamalı olması, filtreleme ve gürültü giderme işlemlerinde belirli avantajlar sağlar. Örneğin, alçak geçiren bir filtre uygulandığında, yüksek frekans bileşenleri baskılanırsa bu durum sadece istenmeyen sinyal kısımlarını değil, yüksek frekanslı gürültü bileşenlerini de azaltır (Harris, 2020). Aynı şekilde, bant geçiren veya bant engelleyen filtreler, Gauss gürültüsünün belirli bantlardaki etkisini daha net değerlendirmeye imkân tanır. Bu tutarlı ve öngörülebilir davranış, teori ile pratik arasındaki bağı güçlendirir.

Ses sinyallerinin temel karakteristiklerini anlamak ve gürültünün etkisini analiz etmek için spektral analiz yaklaşımı kullanılır. Bu kapsamda Fourier dönüşümü, zaman alanında tanımlanmış bir sinyalin frekans alanında temsil edilmesine imkân tanır (Flanagan, 1972). Ancak, sayısal ortamda elde edilen veri genellikle sınırlı ve ayrık örneklerden oluştuğundan, pratikte kullanılan yöntem Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) olarak bilinen sayısal algoritmadır (Rabiner & Schafer, 1978). FFT, Fourier dönüşümünü verimli bir biçimde hesaplayarak sinyalin hangi frekansta ne kadar enerji içerdiğini belirler. Böylece, gürültü eklenmiş bir sinyalde hangi frekans bantlarında fazlalık oluştuğu, hangi bölgelerin temizlenmesi gerektiği daha kolay saptanır (Wang & Lee, 2019).

Gürültüyü engellemek veya azaltmak amacıyla başvuru en yaygın yöntemlerden biri, lineer zamanla değişmez filtrelerin tasarımıdır. Bu çalışma bağlamında dikkate alınan Filtre İmpuls Cevabı Sonlu olan (FIR) filtreler, çıkış sinyalinin yalnızca belirli sayıda geçmiş örneğine dayanan yapıları nedeniyle stabil ve kolayca kontrol edilebilen araçlardır (Gerekvar & ark., 2018). FIR filtre tasarımında belirlenen kesim frekansı, istenen bant sınırını tanımlar. Örneğin, alçak geçiren bir filtre, kesim frekansının altındaki frekans bileşenlerini büyük ölçüde korurken, bu değerin üzerindeki frekans bileşenlerini baskılar. Filtre mertebesi, filtre katsayılarının sayısını

belirler ve merteye arttıkça filtre geçiş b6lgesi daralır, istenen frekans bantlarının daha keskin tanımlanması sağlanır (Harris, 2020). Bu durum, gürültülü bir sinyalin sadece belli bantlardaki gürültüsünün temizlenmesi amacına hizmet eder. Ancak, mertebenin artması işlem maliyetini yükseltebilir, dolayısıyla uygulama gereksinimleri göz önünde bulundurularak bir denge kurulması gerekir (Yılmaz, 2014a, 2014b).

Uygulanan gürültü giderme yöntemlerinin başarısını nesnel olarak ortaya koyabilmek için performans ölçütleri kullanılır. Bu çalışmada değerlendirilecek ölçütlerden biri Sinyal-Gürültü Oranı'dır (SNR). SNR, temiz sinyal enerjisinin gürültü enerjisine oranının logaritmik bir ölçüsüdür ve dB cinsinden ifade edilir (Gültekin, Aksoy & Arslan, 2021). Yüksek bir SNR değeri, sinyalin gürültüye kıyasla daha baskın olduğunu, dolayısıyla filtrelemenin başarılı bir şekilde yapıldığını gösterir. Diğer bir performans ölçütü olan Ortalama Kare Hatası (MSE), filtrelenmiş sinyal ile orijinal temiz sinyal arasındaki hata enerjisinin bir ölçüsüdür. MSE değerinin küçük olması, filtreleme işleminin orijinal sinyale yakın bir çıktı sağladığını belirtir (Harris, 2020). Bu sayısal metrikler, hem farklı filtrelerin hem de farklı gürültü seviyelerinin değerlendirilmesi için elverişli karşılaştırma araçları sunar.

## **Veri Kaynağı**

Bu çalışmada girdi olarak kullanılan ses verisi, "clean\_speech.wav" olarak adlandırılan, tek kanallı (mono) bir WAV dosyasından elde edilmiştir. Bu dosya, sıkıştırılmamış bir ses formatı olan WAV yapısında olduğundan orijinal ses kalitesinin korunmasına imkân tanır. Bu tercih, dosyanın herhangi bir kod çözme ya da yeniden örnekleme işlemine gerek kalmadan doğrudan analiz edilmesine olanak sağlar.

Sinyalin örnekleme frekansı 16 kHz ( $f_s = 16000$  Hz) olarak belirlenmiştir. Bu değer, konuşma sinyallerinde sıklıkla kullanılan

bir örnekleme hızıdır ve özellikle insan konuşmasının önemli bilgi taşıyan frekans bileşenlerini yeterli çözünürlükle yakalayabilmek için uygun bir kompromis sunar. Tipik olarak, insan konuşmasının temel spektral içeriği 300 Hz ile 3400 Hz arasında yoğunlaşmakta olup 16 kHz örnekleme frekansı, bu bandı fazlasıyla kapsayacak bir örnekleme oranı sağlamaktadır. Böylece, üzerinde çalışılan ses verisinde ayrıntılı frekans bileşenleri analiz edilebilir, gürültü giderme gibi işlemlerin doğruluğu artırılabilir. Bunun yanı sıra, kullanılan ses dosyası yaklaşık 3 saniyelik bir kayıt içermektedir.

```
% Örnekleme frekansı
fs = 16000;      % 16 kHz, tipik konuşma işleme uygulamaları için
duration = 3.0; % 3 saniyelik sinyal

% Zaman vektörü
t = (0:1/fs:duration-1/fs)';

% Temiz sinyal (Örnek: 500 Hz ve 1000 Hz bileşenleri içeren sinüs)
f1 = 500;      % 500 Hz
f2 = 1000;    % 1000 Hz
clean_signal = sin(2*pi*f1*t) + 0.5*sin(2*pi*f2*t);
```

*Şekil 1: Veri Eklenmesi*

## **Gürültü Eklenmesi**

Bu çalışmada, temiz durumdaki konuşma sinyaline yapay olarak Gauss (normal) dağılım gösteren bir gürültü eklenerek deneysel bir senaryo oluşturulmaktadır. Gauss gürültüsü, birçok iletişim ve sinyal işleme uygulamasında temel bir model olarak kabul edilen, istatistiksel açıdan iyi anlaşılabilir bir bozucu etkidir. Bu gürültüyü sinyale eklemek, gerçek hayattaki kayıt koşullarına benzer bir ortam oluşturmayı ve geliştirilen gürültü azaltma tekniğinin performansını sınamayı amaçlar.

Gauss gürültüsü, istatistiksel olarak normal dağılıma uyan bir rassal süreç veya rassal değişkenler kümesi şeklinde ifade edilir. Bir işaret işleme veya iletişim problemi bağlamında göz önüne



alındığında, sürekli zamanlı bir sinyal  $x(t)$  üzerine eklenen Gauss gürültüsünü  $n(t)$  ile gösterebiliriz. Böylece gürültülü çıktı sinyali aşağıda belirtildiği gibi tanımlanır (Rabiner & Schafer, 1978; Harris, 2020).

$$y(t)=x(t)+n(t)$$

Gauss gürültüsü  $n(t)$ , her bir örnek anında normal dağılımlı bir rassal değişken  $N(\mu, \sigma^2)$  olarak modellenir. Burada  $\mu$  ortalama (mean) değeri  $\sigma^2$  ise varyanstır. Gürültünün sıfır ortalama varsayımı yaygın olup  $\mu=0$  kabul edilir.

$$n(t)\sim N(0, \sigma^2)$$

Bu ifade, gürültü örneklerinin beklenen değerinin 0 olduğu, pozitif ve negatif sapmaların eşit olasılıkla ortaya çıktığı anlamına gelir. Varyans  $\sigma^2$  ise gürültü genliklerinin ne kadar yayılım gösterdiğini belirleyerek gürültünün şiddetini kontrol eder (Flanagan, 1972). Gauss gürültüsünün önemli bir özelliği, “beyaz” karakterli kabul edilmesidir. Beyaz gürültüde, zaman ekseninde ardışık örnekler istatistiksel olarak birbirinden bağımsızdır ve frekans domeninde gürültünün güç spektral yoğunluğu tüm frekans bantlarına eşit şekilde dağılır (Wang & Lee, 2019).

Beyaz Gauss gürültüsü için güç spektral yoğunluğu  $S_n(f)$  sabit bir değerdir.

$$S_n(f) = N_0/2$$

Burada  $N_0$ , tek taraflı güç spektral yoğunluğunu temsil eder. Bu ifade, hiçbir frekans bileşenine ayrıcalık tanımayan, her frekansta aynı ortalama gücü bulduran bir gürültü ortamını anlatır. Pratikte, “gerçek” beyaz gürültü üretmek mümkün değildir, zira sonsuz bant genişliği gerektirir, ancak sınırlı bant genişlikleri içinde eşit dağılmış

yaklaşım, bir soyutlama olarak kabul edilir (Rabiner & Schafer, 1978).

Gauss gürültüsünün kovaryans fonksiyonu  $R_n(\tau)$  beyaz gürültü varsayımı altına alındığında delta fonksiyonu biçimini alır.

$$R_n(\tau) = E[n(t)n(t+\tau)] = \sigma^2 \delta(\tau)$$

Bu eşitlik,  $\tau=0$  anında kovaryansın  $\sigma^2$  olduğunu ve  $\tau \neq 0$  için kovaryansın sıfır olduğunu gösterir. Başka bir deyişle, zaman ekseninde farklı örnekler istatistiksel olarak bağımsızdır.

Gauss gürültüsünün matematiksel modelleri, mühendislik uygulamalarında çeşitli optimizasyon ve tahmin problemlerinde temel alınır. Örneğin, en küçük kareler (Least Squares) tahmini, Gauss gürültüsü varsayımı altında optimal tahmin problemini çözer. Gauss gürültü modeli, Wiener filtre tasarımı, Kalman filtreleri, maksimum olabilirlik (ML) ve maksimum apriori (MAP) tahminleri gibi pek çok istatistiksel yaklaşımın temelini oluşturur (Yılmaz, 2014a; Yılmaz, 2014b).

Dijital işleme aşamasında, sayısal sinyallere eklenen Gauss gürültüsü, genellikle normal dağılımlı rastgele sayılar üreten bir fonksiyon yardımıyla uygulanır. Bu çalışma kapsamında kullanılan Octave ortamında `randn()` fonksiyonu,  $N(0,1)$  dağılımlı sayılar üretir. Bu sayılar istenen varyans değeri elde etmek için  $\sigma$  çarpılarak ve ortalama  $\mu$  eklenerek genel biçimde aşağıda belirtilen şekilde oluşturulabilir (Gerekvar & ark., 2018).

$$n[i] = \mu + \sigma \cdot \text{randn}()$$

Gürültünün genlik ölçeğini belirleyen bir `noise_level` parametresinin kullanılması, pratikte  $\sigma$  değerini denetim altına almak için sıkça başvurulan bir yöntemdir. Örneğin, düşük `noise_level` değeri düşük varyanslı bir gürültüyü temsil ederken,

yüksek değerlerde varyans artacak, bu da sinyalin bozulma derecesini yükseltecektir. Koda Gauss gürültüsü oluşturmak için `randn()` fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon, sıfır ortalama ve birim varyansa sahip normal dağılım gösteren rastgele değerler üretir. Üretilen rastgele değerler, belirli bir ölçek faktörü ile çarpılarak sinyale eklenir. Bu ölçek faktörü kodda `noise_level` olarak adlandırılmış bir parametre ile denetlenir. `noise_level`, gürültünün genliğini belirleyerek sinyale eklenen Gauss gürültüsünün şiddetini kontrol eder. Örneğin, `noise_level` değeri 0.3 olarak belirlendiğinde, orijinal sinyale eklenen gürültünün genliği nispeten düşük tutulmuş olur. Bu durumda, sinyale eklenen bozulma hissedilir ancak sinyalin anlamlı bileşenleri tamamen gölgelemez. `noise_level` yükseldikçe, gürültünün sinyal üzerindeki etkisi artar; belirli bir eşiğin üzerindeki değerlerde konuşma veya müzik gibi anlam taşıyan içeriklerin anlaşılması daha da zorlaşır. Dolayısıyla `noise_level`, deneysel çalışmalarda gürültünün yoğunluğunu ayarlayarak farklı senaryoların test edilmesini sağlar. Daha düşük `noise_level` ile hafif bozulmuş bir ortam simüle edilirken, daha yüksek değerler tamamen gürültü baskın bir ortama yönelik filtrenin başarısını ölçmek için kullanılır.

Bu yaklaşım, sadece gürültü giderme algoritmasının değil, aynı zamanda seçilen filtre yapısı, kesim frekansı ve filtre mertebesi gibi diğer parametrelerin de performansını gözlemlemek açısından değerlidir. Gürültü ekleme aşaması, gerçekçi koşulların benzetimini sunarak, ele alınan yöntemin ne kadar etkili olduğunun ölçülmesine olanak tanır.

```
% Gauss gürültüsü eklenmesi
noise_level = 1; % Gürültü genlik faktörü (SNR değiştirilebilir)
noisy_signal = clean_signal + noise_level*randn(size(clean_signal));
```

*Şekil 2 Gürültü Eklenmesi*

## Filtre Tasarımı

Bu çalışmada, gürültülü sinyali temizlemek amacıyla FIR (Finite Impulse Response) yapısında bir alçak geçiren filtre tasarımı yapılmıştır. FIR filtreler, çıkış sinyalinin yalnızca sınırlı sayıda geçmiş örneğe bağlı olması ve genellikle kararlı yapılarıyla bilinir (Harris, 2020). Sayısal sinyal işleme alanında kullanılan temel filtre yaklaşımlarından biri, sonlu tepki süresine (impuls cevabına) sahip filtreler, kısa adıyla FIR filtrelerdir. “Finite Impulse Response” ifadesi, filtre girişine uygulanan birim darbe (delta) sinyalinin filtre çıkışında üreteceği tepkinin sonlu sayıda örnekten sonra sıfıra dönmesini ifade eder (Rabiner & Schafer, 1978; Harris, 2020). Bu özellik, FIR filtrelerin kararlılık açısından son derece elverişli yapılar ortaya koymasına imkân tanır. Bir FIR filtrenin çıkışı, giriş sinyalinin belirli sayıdaki geçmiş örneklerinin ağırlıklı bir toplamı olarak ifade edilir. Discrete-time (ayrık zamanlı) bir sinyal  $x[n]$  için FIR filtrenin çıkışı  $y[n]$  şu şekilde tanımlanabilir.

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} (b_k x[n - k])$$

Burada  $b_k$  katsayıları filtre katsayıları olarak bilinir ve filtrenin frekans cevabını belirler. MMM değeri, filtre mertebesi ya da derecesi olarak adlandırılır. Filtre mertebesi ne kadar yüksekse, filtre daha keskin geçiş özelliklerine sahip olabilir ancak daha fazla hesaplama gücü gerektirir (Gerekvar & ark., 2018).

FIR filtreler yalnızca sıfırlardan oluşan sistem fonksiyonlarına sahiptir ve kutup (pole) içermezler. Bu durum, herhangi bir FIR filtrenin, katsayıları uygun seçildiği sürece, mutlaka kararlı olacağı anlamına gelir. Birim darbe cevabının sonlu olması, zaman içinde filtre çıkışının kesinlikle sıfıra döneceğini garanti eder (Flanagan, 1972). Dolayısıyla FIR filtreler, stabilite endişesi olmadan tasarlanabilme avantajına sahiptir. Bu özellik, özellikle hassas uygulamalarda FIR filtreleri tercih edilebilir kılar. FIR filtreler, uygun katsayı seçimiyle lineer faz özelliği sağlayabilir. Lineer faz,

tüm frekans bileşenlerinin giriş sinyalini aynı gecikmeyle geçmesi anlamına gelir. Bu özellik, dalga şeklinin bozulmadan korunması gereken uygulamalarda (örneğin konuşma işleme, tıbbi sinyal analizi veya müzik sinyallerinin işlenmesi) son derece kıymetlidir (Wang & Lee, 2019). IIR filtreler (Infinite Impulse Response) ile kıyaslandığında lineer faz tasarımını elde etmek daha kolaydır ve FIR filtreler bu açıdan avantajlı konumdadır. FIR filtrelerin frekans cevabı, doğrudan katsayıların Fourier dönüşümü ile ilişkilidir. Bu nedenle FIR filtre tasarımında, istenen frekans bandının korunması veya baskılanması için uygun katsayı kümesinin bulunması gerekir. Bu amaçla pencereleme (windowing), Parks-McClellan (Remez) algoritması veya frekans alanında örnekleme gibi çok sayıda tasarım yöntemi kullanılmaktadır (Harris, 2020). Örneğin, basit bir alçak geçiren FIR filtre tasarımı, ideal bir sinc fonksiyonunun kesilerek pencere fonksiyonu ile ağırlıklandırılmasıyla elde edilebilir. Bu sayede keskin geçiş bölgeleri, stop-band sızıntıları ve geçiş bandı genişliği gibi parametreler kontrol edilebilir. FIR filtrelerin dezavantajlarından biri, keskin geçiş özelliklerine ulaşmak için genellikle yüksek mertebeli tasarımlara ihtiyaç duyulmasıdır. Mertebe arttıkça kullanılacak çarpım ve toplama sayısı artar, dolayısıyla gerçek zamanlı uygulamalarda işlem yükü fazlalaşabilir. Ancak modern dijital sinyal işleme donanımları ve hızlı işlemciler, bu dezavantajı önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, FFT tabanlı uygulamalarda FIR filtreler hızlı katlamalar (convolution) yoluyla etkin şekilde uygulanabilmektedir (Rabiner & Schafer, 1978). FIR filtrelerin kolay tasarımı, kararlılığı, lineer faz elde etme imkânı ve esnek yapıları, onları ses, konuşma, veri iletişimi, görüntü ve biyomedikal sinyal işleme gibi çok çeşitli alanlarda popüler kılmaktadır (Yılmaz, 2014a; Yılmaz, 2014b). Bu filtreler, basit alçak geçiren veya yüksek geçiren filtrelerden karmaşık eşitleme filtrelerine kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir. Özellikle, insan algısına dayalı uygulamalarda dalga formunun bozulmaması için lineer faz özelliği sıkça gereklidir, bu da FIR filtrelere kritik bir avantaj sunar.

Filtre tasarımı aşamasında Octave'ın yerleşik fonksiyonlarından biri olan `firl` kullanılmıştır. Bu fonksiyon, istenilen kesim frekansına göre FIR filtre katsayılarını otomatik olarak hesaplayarak süreçleri büyük ölçüde kolaylaştırır. Bu çalışmada seçilen kesim frekansı (Örneğin,  $f_c = 2000$  Hz), konuşma sinyallerinin içerdiği temel bilginin 300 Hz ile 3400 Hz aralığında yoğunlaştığı göz önüne alınarak belirlenmiştir (Flanagan, 1972; Rabiner & Schafer, 1978). 2000 Hz'lik bir kesim frekansı, hem gürültünün üst bantlarda dağılmış yüksek frekanslı bileşenlerini azaltmakta hem de sinyalin anlamlı bölümünü korumakta yeterli bir denge kurulmasına imkân tanımaktadır. Filtre mertebesi ise filtre geçiş bölgesi keskinliğini etkilediğinden deneysel olarak belirlenir. Daha yüksek mertebeler, daha keskin bir geçiş bölgesi sunar ancak işlem maliyetini artırır. Bu denge, çalışma amacına ve uygulama gereksinimlerine göre ayarlanabilir.

```
% -----  
% Filtre Tasarımı  
% -----  
% Alçak geçiren FIR filtre örneği (Kesim frekansı: 2000 Hz)  
fc = 2000; % kesim frekansı  
Wn = fc/(fs/2);  
order = 64;  
b = firl(order, Wn, 'low'); % Low-pass filtre  
  
filtered_signal = filter(b, 1, noisy_signal);  
  
% İsteğe bağlı: Yüksek geçiren filtre örneği  
% fc_high = 800; % yüksek geçiren kesim frekansı örneği  
% Wn_high = fc_high/(fs/2);  
% b_high = firl(order, Wn_high, 'high');  
% highpass_filtered = filter(b_high, 1, noisy_signal);
```

*Şekil 3 Filtre Tasarımı*

## Performans Ölçütleri

SNR, filtrenin gürültüyü ne ölçüde azaltabildiğini numerik olarak değerlendiren en yaygın ölçütlerden biridir (Harris, 2020). Matematiksel olarak, bir işaret  $x[n]$  olmak üzere, bu işaretin güç seviyesi  $P_X$  genellikle aşağıda belirtildiği şekilde tanımlanır.

$$P_X = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2$$

Burada  $N$ , işaretin toplam örnek sayısıdır ve  $P_X$ , sayısal bir sinyalin ortalama güç değerini temsil eder. Eğer ilgilendiğimiz işaret, zaman boyunca sabit istatistiklere sahip ise (yani kararlı bir süreçten elde edilmişse), ortalama güç değeri iyi tanımlanır. Benzer şekilde, işarete eklenmiş gürültü  $n[n]$  için ortalama gürültü gücü  $P_N$  hesaplanır.

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} n[n]^2$$

SNR, sinyal gücünün gürültü gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$SNR = \frac{P_x}{P_n}$$

Uygulamada, SNR değerleri genellikle logaritmik ölçekte, desibel (dB) cinsinden ifade edilir. Bu sayede çok geniş aralıklardaki oranları daha kolay karşılaştırmak mümkün olur.

$$SNR_{db} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_x}{P_n} \right)$$

SNR değeri yüksek olduğunda, sinyal gücü gürültü gücüne kıyasla daha baskındır. Bu durum, sinyalin daha kolay anlaşılacağı, algılanabileceği veya işlenebileceği anlamına gelir. Örneğin, 20 dB SNR değeri, sinyal gücünün gürültü gücüne göre 100 kat fazla olduğunu gösterir. Buna karşın, düşük SNR değerlerinde işarete eklenmiş gürültü, yararlı bilginin önüne geçerek iletişim hatlarında veri kayıplarına, konuşma tanıma sistemlerinde performans düşüşüne veya ölçüm sistemlerinde kararsız sonuçlara yol açar (Rabiner & Schafer, 1978). Ayrıca, SNR, belirli bir filtrenin veya gürültü giderme algoritmasının etkinliğini de ölçmekte kullanılır. Örneğin, gürültülü bir sinyal  $x[n]+n[n]$  filitrelenerek  $x'[n]$  elde edildiğinde, filtrenin başarısı filtrelenmiş sinyalin orijinal sinyale ne ölçüde yaklaştığıyla değerlendirilir.

$$SNR_{filtrelenmiş} = 10 \log_{10} \left( \frac{\frac{1}{N} \sum x[n]^2}{\frac{1}{N} \sum (x'[n] - x[n])^2} \right)$$

Elde edilen SNR artışı (improvement in SNR), filtrenin ya da gürültü azaltma yönteminin performansını doğrudan ortaya koyar. Böylece SNR, sadece mevcut durumun değil, uygulanan işlemlerin ne kadar iyileşme sağladığının da sayısal bir göstergesi haline gelir (Wang & Lee, 2019). Temel olarak sinyalin güç düzeyinin gürültü gücüne oranının logaritmik (dB) cinsinden ifadesi olan SNR, filtrenin başarısını dolaysız biçimde yansıtır. Yüksek SNR, sinyalin gürültüye kıyasla daha belirgin olduğunu ve böylece filtrelemenin amacına ulaştığını gösterir. Bu metrik, farklı filtreler veya farklı gürültü seviyeleri altındaki performans karşılaştırmalarında oldukça kullanışlıdır (Wang & Lee, 2019). MSE, filtrelenmiş sinyal ile orijinal (temiz) sinyal arasındaki farkın karelerinin ortalamasını olarak bir hata ölçüsü sunar. MSE'nin küçük olması, filtrenin çıkışının orijinale o denli yakın olduğunu, yani filtrelemenin amacına uygun gerçekleştiğini gösterir (Gerekvar & ark., 2018). Bu metrik, özellikle sayısal karşılaştırmalarda ve optimizasyon problemlerinde yararlıdır. Farklı filtre yapılarını veya parametre



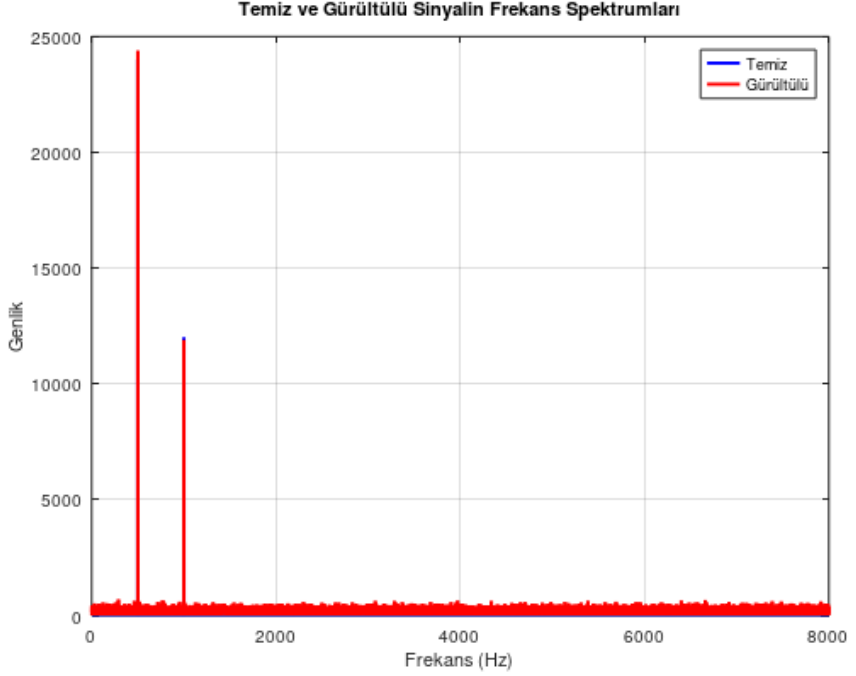
ayarlarını MSE açısından değerlendirmek, hangi tasarımın en iyi sonuçları verdiğini belirlemeye yardımcı olur. Nesnel metrikler (SNR, MSE) çoğu zaman kesin, matematiksel karşılaştırmalar sunarken, pratikte asıl önemli olan bazen insan kulağının algısıdır. Örneğin bir konuşma sinyalinin filtrelenmesi sonrası SNR değeri artabilir, MSE azalabilir ancak dinleyici bu iyileşmeyi çok belirgin hissetmeyebilir veya tam tersi durumlar ortaya çıkabilir (Rabiner & Schafer, 1978). Ancak bu çalışma kapsamında esas vurgu, nesnel ölçütlere yapılmaktadır. Yine de, filtrelenen sesin algısal kalitesi hakkında kısa bir değerlendirme yapmak, sonuçların pratik anlamını daha iyi kavramayı sağlar. Bu değerlendirme, örnek sinyallerin araştırmacı tarafından işitilmesi veya daha ileri çalışmalar için katılımcılara dinletilerek algısal kalite testleri yapılması biçiminde düşünülebilir.

## **Modelleme Çıktıları**

Modelleme çıktıları, temel olarak zaman ve frekans domeninde incelenen sinyallerin grafiksel gösterimleri, hesaplanan performans metrikleri (SNR, MSE) ve gerekli görülürse subjektif değerlendirmelerden oluşmaktadır. Zaman domeninde sunulan modelleme çıktıları, temiz, gürültülü ve filtrelenmiş sinyallerin dalga formlarını karşılaştırmayı mümkün kılar. Bu karşılaştırma, filtrenin orijinal sinyale ne ölçüde yaklaştığını, gürültünün belirgin şekilde azaltılıp azaltılmadığını ve sinyalin genel yapısının korunduğunu ilk bakışta anlamayı sağlar. Özellikle konuşma gibi karmaşık içeriğe sahip sinyallerde, filtre sonrasında dalga formunun anlamlı bileşenlerinin korunması, filtrenin başarılı bir performans sergilediğine işaret eder (Yılmaz, 2014a; Yılmaz, 2014b). Frekans domeninde incelenen modelleme çıktıları ise FFT uygulanarak elde edilen spektrum analizleri aracılığıyla değerlendirilir. Filtrelenmiş sinyalin spektrumu, yüksek frekans bileşenlerinin ne ölçüde baskılandığını, hangi bantlarda gürültünün yoğunlaştığını ve istenen bantların ne derece korunabildiğini ortaya koyar. İyi tasarlanmış bir alçak geçiren FIR filtrenin, hedef frekans bandı dışındaki gürültülü

bileşenleri büyük oranda azaltırken konuşma sinyalinin ana frekans içeriğini koruması beklenir (Harris, 2020).

Sayısal sonuçlar, modelleme çıktılarının nesnel ölçütlerle değerlendirilmesinde önemli rol oynar. Örneğin, elde edilen SNR değerlerinde gözlemlenen artış, filtrenin gürültü azaltma kapasitesini sayısal olarak ortaya koyar. Benzer şekilde, MSE değerinin düşmesi, filtrelenmiş sinyalin orijinale yakınsadığını ve elde edilen iyileştirmenin sadece rastlantısal olmadığını, matematiksel olarak doğrulandığını gösterir (Wang & Lee, 2019; Gerekvar & ark., 2018). Bu nesnel metrikler, farklı senaryolar arasında karşılaştırma yapma imkânı da sunar. Örneğin, `noise_level` parametresinin farklı değerleri altında filtrelerin performansı izlenebilir, kesim frekansının veya filtre mertebesinin değiştirilmesiyle elde edilen farklı sonuçlar karşılaştırılabilir. Böylece modelleme çıktıları, filtre tasarım stratejisinin veya daha gelişmiş algoritmalara yönelme gereksiniminin anlaşılmasına yardımcı olur (Rabiner & Schafer, 1978).



*Şekil 4 Temiz ve Gürültülü Sinyalin Frekans Spektrumları*

## Sonuç

Bu çalışma kapsamında, Octave ortamında yapay olarak eklenen Gauss gürültüsüne maruz bırakılmış bir ses sinyalinin basit bir alçak geçiren FIR filtre yardımıyla temizlenmesi ve elde edilen çıktıların zaman domenindeki karşılaştırması ele alınmıştır. Sunulan yaklaşım, hem teorik hem de uygulama düzeyinde temel filtreleme prensiplerinin anlaşılmasına yardımcı olmuştur.

Gürültü ekleme aşamasında, Gauss gürültüsünün sinyali nasıl bozduğu zaman domeni grafikleri üzerinde net bir biçimde görülmüştür. Ardından, tasarlanan FIR filtre ile gürültülü sinyale müdahale edilerek, özellikle yüksek frekanslarda yoğunlaşan gürültü bileşenlerinin baskılandığı gözlemlenmiştir. Zaman domenindeki

dalga formlarının incelenmesi, filtrenin temiz sinyale yakınsadığını, gürültüyü belirgin ölçüde azalttığını ve sinyalin anlamlı bileşenlerini büyük ölçüde koruduğunu göstermiştir.

Performans ölçütleri açısından bakıldığında, elde edilen SNR (Sinyal-Gürültü Oranı) ve MSE (Ortalama Kare Hatası) değerlerindeki iyileşme, filtrenin gürültü azaltma hedefine ulaştığını sayısal olarak doğrulamaktadır. Bu sayede, geliştirilen yaklaşımın yalnızca görsel değil, istatistiksel olarak da sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, temel filtreleme yöntemlerinin deneysel bir senaryoda uygulanmasını somutlaştırarak, ses sinyalinden gürültü giderme çalışması Octave ortamında gerçekleştirilmiştir. İleride, farklı filtre türleri, adaptif veya yapay zekâ tabanlı teknikler, değişik gürültü türleri ve gerçek kayıtlardan elde edilen karmaşık ses sinyalleri üzerinde benzer metodolojiler uygulanarak yöntemin geliştirilmesi ve genelleştirilmesi hedeflenebilir. Böylece, bu çalışma hem eğitim amaçlı bir rehber hem de daha ileri düzeyde çalışmalara ön hazırlık niteliği taşımaktadır.

## **Kaynakça**

Bekir, A., & Ulaş, O. (2003). Ses İletimi ve Gürültü Yönetimi Üzerine Çalışmalar. Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 5(2), 45-60.

Gerekvar, M., & ark. (2018). Gürültülü Ortamlarda Konuşma Analizi: Yeni Yaklaşımlar. Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 14(1), 12-27.

Wang, Y., & Lee, P. (2019). Noise Reduction Techniques in Multimedia Communication. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(4), 3023-3042.

Anaz, M. (2014). Ses İşleme Temelleri. Beta Yayınları.

Flanagan, J. L. (1972). Speech Analysis Synthesis and Perception. Springer.

Harris, J. (2020). Practical Approaches to Speech Enhancement. Cambridge University Press.

Rabiner, L. R., & Schafer, R. W. (1978). Digital Processing of Speech Signals. Prentice-Hall.

Yılmaz, A. (2014a). Temel Ses Analizi Teknikleri. Bilimsel Araştırma Enstitüsü Yayınları.

Yılmaz, A. (2014b). Gelişmiş Konuşma İşleme Yöntemleri. Bilimsel Araştırma Enstitüsü Yayınları.

Gültekin, H., Aksoy, F., & Arslan, K. (2021). Dalgalet Dönüşümleriyle Gürültü Giderimi. Ulusal Ses ve Titreşim Konferansı Bildirileri, s. 89-97.

Kul, F., Faruk, H., & Deniz, A. (2016). Konuşma Sinyallerinde Bant Sınırlı Filtreleme Uygulamaları. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Konferansı Bildirileri, s. 124-129.

Yılmaz, A., & ark. (2015). Çok Boyutlu Gürültü Azaltma Sistemleri Üzerine İncelemeler. Ses ve İşaret İşleme Semineri, s. 200-210.

## **BÖLÜM VII**

### **Fırçasız Doğru Akım Sürücülerindeki Komütasyon Akım Salınımının İyileştirilmesi**

**Mehmet KARAYEL**  
**Tevfik ATAMAN**

#### **Giriş**

FDAM'nın basit yapısı, yüksek başlangıç momenti, yüksek verimlilik, yüksek güç yoğunluğu ve geniş hız aralığında çalışma gibi avantajlara sahip olması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda, yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca FDAM'nın fırça ve kollektörsüz yapısı ile faz komütasyonunun elektronik olarak gerçekleştirildiği göz önüne alındığında, fırçalı doğru akım (DA) motor veya indüksiyon motorlarına göre daha küçük hacim, daha az akustik gürültü, daha uzun ömür, fırçasız yapısı sayesinde çalışma sırasında aşınma ve kıvılcım sorunları olmaması sebebiyle daha güvenilirdir. Ayrıca daha az bakım gereksinimi özellikleri ile otomotivde, sivil ve askeri havacılıkta, medikal uygulamalarda ve

elektrikli ev aletlerinde kullanımını her geçen gün daha da artmaktadır (Yao & ark., 2018).

FDAM'ların birçok özelliği olmasına rağmen çoğu uygulamada kullanımını kısıtlayan en büyük problem moment salınımlarıdır. Son zamanlarda, komütasyon moment salınımı azaltmaya yönelik çalışmalar ile ilgili çeşitli kontrol yöntemleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar temel olarak kontrol değişkenlerine göre üç çeşide ayrılabilir.

Birinci yöntem, DA bara akım kontrolüne dayanmaktadır. Song ve arkadaşları 2004'de, tek bir DA akım sensörü ile KMS azaltmak için bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, komütasyon anında devreye giren ile devreden çıkan faz akımlarının değişimleri darbe genişlik modülasyonu (DGM) tekniği ile eşitlenerek KMS azaltmıştır (Song & ark., 2004). Fang ve arkadaşları 2012'de, komütasyon moment salınımları azaltmak için DGM\_ON\_DGM ile birleştirilmiş akım kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde serbest geçiş diyotlarından akan devreden çıkan akımın moment üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır (Fang & ark., 2012). Shi ve arkadaşları 2013'de, moment salınımını azaltmak için üç segmentli modülasyon yöntemi önermektedir. Önerilen yöntemde, her bir PWM periyodu, komütasyon süresi boyunca üç ayrı kısma bölerek uygun DGM oranları seçilerek devreye giren faz akımı ile devreden çıkan faz akımı değişim oranları eşitlenerek moment salınımı azaltılmıştır (Shi & Li, 2013). Xia ve arkadaşları 2014'de, integral değişken yapı kontrolü kullanarak moment salınımını azaltmak için bir akım iyileştirme yöntemi önerilmiştir (Xia & ark., 2014). Kim ve arkadaşları 2006'da, DGM teması, komütasyon periyodu sırasında komütasyonsuz faza uygulanır ve komütasyondan önce ve sonra



komütasyonsuz fazın bozulmuş ortalama voltajı eşitlenerek moment salınımı azaltılmıştır (Kim & ark., 2006). Xia ve arkadaşları 2013'de, sonlu durum tahmine dayalı kontrol modeli moment salınımını azaltmak için önerilmiştir. Önerilen model ile komütasyon sırasında FDAM'un ayırık zamanlı komütasyonsuz faz akım tahmin modeli oluşturulmaktadır. Önceden tanımlanmış maliyet fonksiyonuna göre, en uygun anahtarlama durumu doğrudan seçilir ve bir sonraki örnekleme döngünün en uygun iletim durumu, dinamik yanıtı hızlandıran maliyet fonksiyonundan doğrudan elde edilmektedir (Xia & ark., 2013). Jiang ve arkadaşları 2012'de, KMS azaltmak için koordinat dönüşümü önerilmiştir (Jiang & ark., 2017).

İkinci yöntem, tork kontrolüne dayanmaktadır. Lu ve arkadaşları 2008'de, sınırlı DA bara geriliminin etkisi dikkate alınarak normal iletim ve komütasyon süresi boyunca ortalama torku sabit tutmak için gerçek zıt EMK'ya dayanan DGM stratejisi önerilmiştir (Lu & ark., 2008). Liu ve arkadaşları 2007'de, moment salınımını azaltmak için geliştirilmiş bir doğrudan tork kontrolörü (DTK) tasarlanmıştır. Tasarlanan DTK ile komütasyon anında çalışma modu uyarlamalı olarak torkun dinamik karakteristiğini geliştiren tork farkı tarafından belirlenir (Liu & ark., 2007). Zhou ve arkadaşları 2016'da, çıkıntılı kutuplu FDAM için sensörsüz bir doğrudan tork kontrolü (DTK) yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde, elektromanyetik torku tahmin etmek için stator akım tahmincisi ve faz kilitlemeli çevrim kullanılmaktadır. Çalışma performansı ve yük değişimlerindeki sağlamlığı iyileştirdi ve kararlı çalışma hızı 33 d/d'ya kadar düşük bir değere indirildi (Zhou & ark., 2016). Carey ve arkadaşları 2019'da, sensörsüz FDAM için bir hibrit kontrol şeması önerilmiştir. Önerilen yöntem, parametre belirsizliklerine

karşı güçlü bir dayanıklılığa sahiptir ve geniş bir hız aralığında uygulanabilmektedir (Carey & ark., 2019). Shi ve arkadaşları 2017'de, tork eğimine bağlı olarak ana vektör ve yardımcı vektörden oluşan iki anahtarlama tablosu oluşturdu ve hem ideal olmayan zıt EMK hem de komütasyon anında faz akımlarının değişiminin neden olduğu moment salınımı, iki tip vektörün kombinasyonu ile etkin bir şekilde azaltılmıştır (Shi & ark., 2017). Sheng ve arkadaşları 2015'de, motorun tork dalgalanmasını bastırmak için tek döngülü bir tork kontrol algoritması önerilmiştir. Bu çalışmada, birim çevrim gücü, ortalama torkun referans torku takip etmesini sağlamak için geri besleme torku olarak kullanılarak moment salınımı ve donanım karmaşıklığı azaltılmıştır. Yüksek hız aralığında komütasyon moment salınımı, yukarıdaki bastırma yöntemleriyle etkin bir şekilde azalmakta, ancak sabit dc-bara gerilimi nedeniyle komütasyon süresi uzamaktadır (Sheng & ark., 2015).

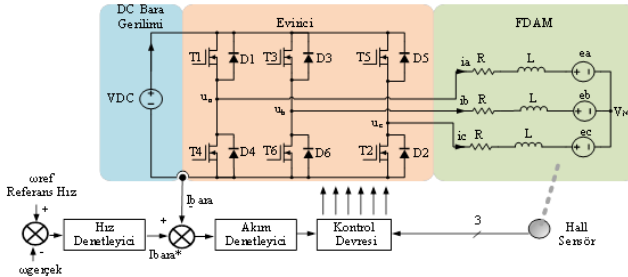
Üçüncü yöntem, DA bara gerilim kontrolüne dayanmaktadır. KMS azaltmak için, istenen DA bara gerilimini elde etmek amacıyla sürücü devresine çeşitli DA / DA dönüştürücüler eklenmiştir. Xiaofeng ve arkadaşı 2006'da, bir düşürücü (buck) dönüştürücü üç fazlı eviricinin önüne eklenmektedir. İstenilen DA bara gerilimi, dönüştürücünün görev döngüsü (Duty-cycle) kontrol ederek elde edilmektedir. Önerilen yöntem, düşük hız aralığında etkili olmaktadır (Xiaofeng & Zhengyu, 2006). Hu ve arkadaşları 2019'da, tek fazlı bir FDAM için H-köprüsünü ve LRC devresini birleştiren bir voltaj düzenleme devresi önermektedir. Sonuçlar, akustik gürültünün ve KMS açıkça azaltıldığını göstermektedir (Hu & ark., 2019). Shi ve arkadaşları 2010'da, DA bara gerilimini kontrol etmek için tek uçlu birincil indüktör dönüştürücü (SEPIC) modeli

önerilmiştir. Önerilen modelde, seçici anahtarlar ile komütasyon dışı (iletim) durumunda evirici güç kaynağı tarafından beslenmekte, komütasyon anında ise evirici SEPIC dönüştürücü tarafından beslenmektedir. Bu anahtarlama yöntemi ile, komütasyon anında gerekli olan DA bara gerilimi ( $V_{\text{bara}} = 4E_m$ ) SEPIC dönüştürücü tarafından sağlandığından moment salınımı etkin bir şekilde azaltılmaktadır (Shi & ark., 2010). Viswanathan ve arkadaşları 2018'de, iyileştirilmiş SEPIC dönüştürücü ve üç seviyeli bir nötr nokta kenetlemeli çevirici birleştirilerek DA bara gerilim kontrolü önerilmiştir. Önerilen çalışma, karışık yapıya sahip olması ile birlikte moment salınımı ve harmonik bileşenleri azaltmaktadır (Viswanathan & ark., 2018). Li ve arkadaşları 2016'da, KMS azaltmak için, Z-kaynaklı evirici ile ateşleme vektörü ve aktif vektör görev döngüleri düzenleyen bir stratejisi önerilmiştir. Önerilen stratejide sonuçların KMS yaklaşık %10 azaldığı gösterilmektedir (Li & ark., 2016). Xia ve arkadaşları 2016'da, yarı Z-kaynak ağına sahip kontrol stratejisi, ayarlanabilir komütasyon gerilimi elde etmek için tasarlanmıştır (Xia & ark., 2016). Jiang ve arkadaşları 2016'da DA bara gerilimini kontrol etmek için endüktif olmayan bir voltaj düzenleyici yapı sunulmuştur. Önerilen yapı, geniş hız aralığında KMS azaltmaktadır (Jiang & ark., 2016). Chen ve arkadaşları 2017'de CUK dönüştürücü yapısına dayanan yeni bir FDAM için KMS azaltma stratejisi önerilmiştir. Önerilen strateji ile Komütasyon anında ve normal iletim anında CUK dönüştürücünün çıkış modları sırasıyla düşürücü-yükseltici (buck-boost) ve yükseltici (boost) şeklinde uygulanarak, tüm hız aralığı boyunca komütasyon moment salınımı azaltılmıştır (Chen & ark., 2017).

Bu çalışmada, KMS için DA bara gerilim kontrolüne dayalı bir topoloji sunulmaktadır. Önerilen topolojinin diğer DA bara gerilim kontrolüne dayalı yöntemlerden özgünlüğü, önerilen yöntemde yüksek hızlarda komütasyon esnasında yükseltme devresinde bulunan kondansatör DA kaynağına seri bağlanarak evirici bara geriliminin genliğini yükseltmektedir. Diğer yöntemlerde komütasyon anında DA kaynak devre dışı bırakılarak motorun tüm yükü yükseltme devresine aktarılmaktadır. Bu durum tasarlanan yükseltme devresinin büyük değerli seçilmesini zorunlu hale getirmektedir.

## 2. Fırçasız DA Motor Çalışma Prensibi

FDAM sürücü sistemi DA gerilim kaynağı, 3-fazlı evirici devresi ve kontrol devresinden oluşmaktadır. FDAM'nın stator sargıları her faza ait yarım dalga H-köprü üzerinden beslenir. Sabit DA gerilim kaynağından beslenen eviricideki yarıiletken anahtarlama elemanları motorun rotor konumuna bağlı olarak anahtarlanır. Rotorun konum bilgisi konum algılayıcılardan alınır. Bir fırçasız doğru akım motor sürücü sisteminin klasik kontrol algoritması Şekil 1'de verilmektedir.

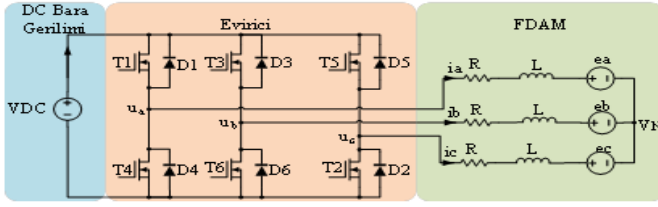


Şekil 1: FDAM sürücü sisteminin geleneksel kontrol modeli.

FDAM çalışma sırasında bir elektriksel periyotta  $60^\circ$ 'de bir 6 defa komütasyon meydana gelir ve her bir stator faz sargısı  $120^\circ$  boyunca iletimdedir. Üç fazlı bir FDAM rotorun konumunu algılamak için üç Hall sensörü gerektirir. Üç Hall sensörü ("a", "b" ve "c")  $60^\circ$  aralıklarla stator üzerine monte edilirken, hall sensörlerinden gelen konum bilgisine göre üç faz sargılarından sadece ikisi enerjilenir ve diğer sargı boшта bırakılır. Sargıların enerjilenmesi H köprü yapılı evirici devresinde bulunan yarı iletken anahtarların tetiklenmesi ile gerçekleştirilir (Xun & ark., 2018)

### **3. Komütasyon tork Dalgalanması ve Analizi**

Üç fazlı FDAM'lar, DA kaynağa bağlı H köprü yapılı yarı iletken anahtarlarının hall sensörlerinden gelen bilgiye göre tetiklenmesi ile kontrol edilir. Her bir elektriksel döngüde üç faz stator sargılarının ikisi enerjilendirilirken diğer faz sargısı boшта bırakılır. Bu işlem her bir elektriksel döngüde altı defa yarı iletken anahtarların ikisi iletime alınarak gerçekleşir. FDAM'lar, kare dalga stator akımları ile beslenir ve yamuk (trapezoidal) zıt EMK dalga biçimine sahiptir. Teorik olarak stator sargılarına her ne kadar kare dalga akım uygulansa da stator sargılarının endüktans özelliğinden ve stator yapısından dolayı kare dalga formu elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu durum, komütasyon anında devreye giren akım ile devreden çıkan akımın değişimlerinin farklı olduğu durumlarda moment salınımına sebep olmaktadır.



Şekil 2: Evirici Beslemeli FDAM eşdeğer devresi.

Şekil 2’deki devreye Kirchhoff’un gerilim kanunu uygulandığında;

$$u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a + V_N \quad (1)$$

$$u_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b + V_N \quad (2)$$

$$u_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c + V_N \quad (3)$$

Denklemleri elde edilir. Bu ifadeleri matris formda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ V_N \\ V_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

Burada  $V_{dc}$  evirici giriş gerilimi,  $V_N$  yıldız stator faz sargılarının nötr noktası gerilimi  $u_a, u_b, u_c$  terminal faz gerilimi,  $i_a, i_b, i_c$  faz sargı akımlarını,  $e_a, e_b, e_c$  zıt emk gerilimlerini,  $L = L_s - M$  her bir faz sargısı için toplam endüktansını,  $L_s$  ve  $M$  sırasıyla özendüktans ve karşılıklı endüktansı temsil etmektedir. Faz sargı dirençleri yaklaşık olarak birbirine eşittir. Bu nedenle  $R_a = R_b = R_c = R$  olarak kabul edilmektedir.

FDAM’un toplam güç ifadesi her bir sargıya uygulanan akım ile endüklenen zıt emk değerinin çarpımı ile elde edilmektedir. Güç denklemleri ifadesi;

$$P_a = e_a i_a \quad (5)$$

$$P_b = e_b i_b \quad (6)$$

$$P_c = e_c i_c \quad (7)$$

$$P_o = P_a + P_b + P_c \quad (8)$$

Fırçasız DC motorlarda moment, enerjilenen stator fazlarıyla rotor kutuplarının aynı hizaya gelme eğilimi ile üretilir. FDAM'lerde üretilen momentin genel ifadesi;

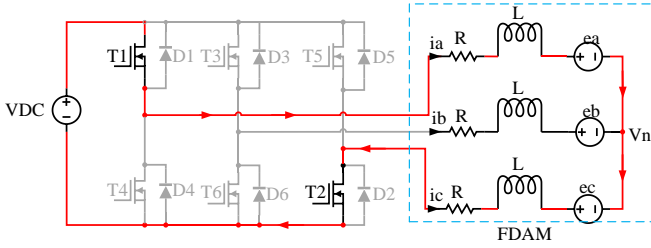
$$T_e = \frac{P_o}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (9)$$

Burada  $\omega_m$  rotorun mekanik hızıdır. Denklem (9)'e göre FDAM tarafından üretilen moment faz sargılarına uygulanan akım ile sargılarda indüklenen zıt emk'ya bağlı güçlerin toplamına ve rotorun mekanik hızının bağlıdır. Dolayısıyla, hız ve faz akımlarındaki değişim doğrudan torku etkilemektedir.

Üç fazlı FDAM'lar elektriksel döngüde teorik olarak, altı bölge komütasyon sırasında iki stator sargılarına kare dalga formu akım uygulanır ve endüklenen zıt emk yamuk (trapezoidal)'tur. Ancak pratikte stator sargılarının endüktans özelliği nedeniyle uygulanan akımın yükselme ve düşmeleri elektriksel zaman sabiti ( $t=L/R$ ) kadar sürede meydana gelir. Akımların değişim sürelerinin farklı olması tork salınımı oluşmasına neden olmaktadır.

Bu durumun analizi için süreci komütasyon öncesi (iletim) bölge ve komütasyon (akım değişim) bölgesi olarak iki ayrı bölgede incelenecektir. Analiz yapılırken referans olarak iletim bölgesinde

iken Şekil 3'deki gibi A ve C faz sargularından akım geçmektedir. Bu durumda eviricinin T1 ve T2 anahtarları iletimdedir.



Şekil 3: Komütasyon öncesi iletim bölgesinde faz akımları.

İletim bölgesinde, faz sargularının dengeli olduğu kabul edildiğinde faz sargularından aynı ama zıt yönlü akım akmakta ve diğer fazda akım akmamaktadır. Dolayısıyla, zıt emk endüklenmektedir. İletim durumundaki akım ve zıt emk denklemleri sırayla;

$$i_a = -i_c = i_m, \quad i_b = 0 \quad (10)$$

Ancak SMSM Şekil 4.4 b'deki gibi sürekli sinüsoidal zıt emk sahip olması nedeniyle  $\pi/6 \leq \omega_r \leq \pi/2$  aralığında 3 faz sargısında endüklenen zıt emk'ları aşağıdaki gibidir.

$$e_a i_a = e_a(\omega_r) I_m, \quad e_b i_b = -[e_a(\omega_r - 2\pi/3)] I_m, \quad e_c i_c = 0 \quad (11)$$

Burada, toplam elektriksel momentin anlık ifadesi zıt emk, faz akımları ve mekanik hıza ( $\omega_m$ ) bağlı denklem (12)'deki gibi yazılabilir.

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} = \frac{I_m}{\omega_m} [e_a(\omega_r) - e_a(\omega_r - 2\pi/3)] \quad (12)$$

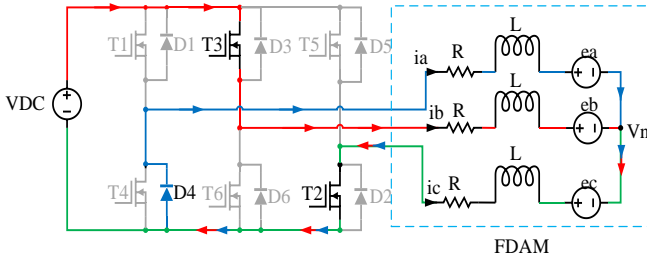
Denklem (12)'de stator sargularının ikisinden akım geçirildiğinde maksimum moment üretmektedir. Aynı zamanda stator sargı değerleri eşit olduğundan devreye giren akım ile devreden çıkan



akım aynı sürede değişmekte ve zıt emk değerleri eşit olduğundan sabit moment üretmektedir.

Komütasyon bölgesinde, Şekil 3.3'de gösterildiği gibi evirici T1 anahtarı devreden çıkarılmakta ve T3 ve T2 anahtarı iletime alınmaktadır. Dolayısıyla,  $i_a$  ve  $i_b$  komütasyona uğrayan faz akımları iken  $i_c$  akımı ise komütasyona uğramayan faz akımıdır.

Komütasyon başlangıcında akımların başlangıç değerleri  $i_a$  ve  $i_c$  değerleri genlik olarak eşit ve  $I_m$ ,  $i_b$  ise sıfırdır. Bu durumda komütasyon anında gerilim, akım ve zıt emk başlangıç değerleri aşağıdaki gibi olacaktır. Komütasyon anında devreden çıkan a fazının sargı endüklans özelliğinden dolayı belli bir akım depolar ve depolanan akım eviricinin a fazının serbest geçiş diyotu(D4) üzerinden devresini tamamlar.



Şekil 4: Komütasyon bölgesinde faz akımları.

Şekil 4'deki devreye kirchhoff'un gerilimler kanunu uygulandığında;

$$0 = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a + V_N \quad (13)$$

$$V_{DC} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b + V_N \quad (14)$$

$$0 = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c + V_N \quad (15)$$

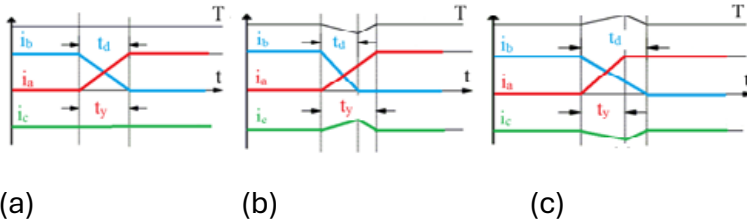
Komütasyon anında a fazında endüklenen akım serbest geçiş diyotu (D4) üzerinden kaynağın toprak ucuna akacaktır. Bu durumda hem a fazı hem de c fazı üzerlerine düşen gerilim sıfır ve kaynağa bağlı b fazı  $U_{DC}$  gerilimine eşit olacaktır. Denklem (13-15) düzenlendiğinde faz akımlarının zamandaki değişim denklemi;

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{(V_{DC} + 2E_m)}{3L} \quad (16)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{2V_{DC} - 2E_m}{3L} \quad (17)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{V_{DC} - 4E_m}{3L} \quad (18)$$

Denklem (18)'de komütasyon uygulanmayan  $i_c$  akımının zamandaki değişimi, komütasyona uygulanan akımların zamandaki değişimlerine bağlı olduğu ve ayrıca DA kaynak ile sargılarda endüklenen zıt emk değerine bağlı olduğu görülmektedir. Şekil 5'te akım değişimi ve tork durumu ile ilgili grafik gösterilmektedir.



Şekil 5: Komütasyon bölgesinde akım ve moment değişimi. (a)  $td = ty$ , (b)  $td < ty$ , (c)  $td > ty$

Denklem (16 ve 17)'den devreye giren ve devreden çıkan faz akımlarının zaman denklemi elde edilebilir.

$$t_d = \frac{3LI_m}{V_{DC} + 2E_m} \quad (19)$$

$$t_y = \frac{3LI_m}{2V_{DC} - 2E_m} \quad (20)$$

Burada devreden çıkan akım değeri maksimum akım değerinden sıfıra düştüğünden ve devreye giren faz akımı ise sıfırdan maksimuma çıktığından  $I_m$  olarak ifade edilmiştir. Komütasyon moment dalgalanmasının azaltılması için gerekli süre ( $t_{com}$ ), devreye giren akım süresi  $t_y$  ile devreden çıkan akım süresi  $t_d$  eşitlenerek elde edilir.

$$t_{com} = t_d = t_y \rightarrow \frac{3LI_m}{V_{DC} + 4E_m} = \frac{3LI_m}{2V_{DC} - 4E_m} \quad (21)$$

$$V_{DC} = 4E_m \quad (22)$$

Sonuç olarak üç fazlı FDAM komütasyon akım salınımını azaltmak için devreye giren akım ile devreden çıkan akım değişim sürelerinin eşitlenmesi veya DA kaynak geriliminin zıt emk geriliminin 4 katına eşit olması gerekir. Burada zıt emk denklemini yazarsak;

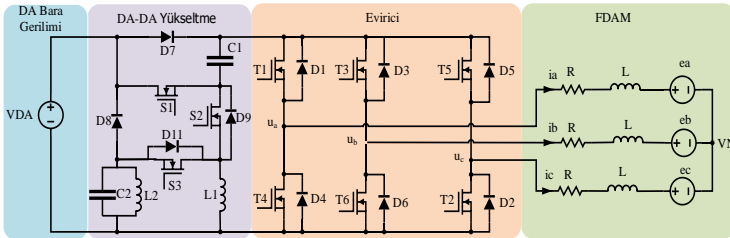
$$E_m = k_e \omega_m \quad (23)$$

Burada  $k_e$  endüklenen gerilim katsayısıdır. Zıt emk denklem (23)'de gösterildiği gibi endüklenen gerilim değeri rotor hızı ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla düşük hızlarda endüklenen zıt emk değerinin 6 katı, kaynak gerilimi değerinden daha küçük ( $V_{DC} > 4E_m$ ) olması, yüksek hızlarda ise endüklenen zıt emk değerinin 4 katı, kaynak gerilimi değerinden daha büyük ( $V_{DC} < 4E_m$ ) olması anlamına gelmektedir. Bu durum,  $V_{DC} < 4E_m$  eşitsizliğinde faz değişimleri Şekil 5(b)'deki gibi komütasyonsuz faz akımında ve motor çıkış

torkunda çökme (dip)'ye sebep olmakta,  $V_{DC} > 4E_m$  eşitsizliğinde faz değişimleri Şekil 5(c)'deki gibi komütasyonsuz faz akımında ve motor çıkış torkunda yükselme (spike)'ya sebep olmaktadır.

#### 4. Önerilen Sürücü Topolojisi

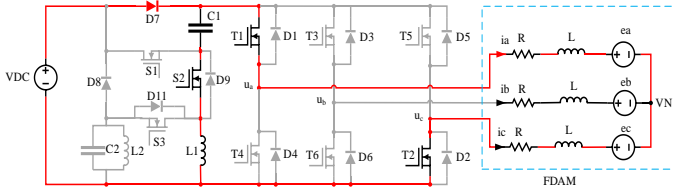
Tasarlanan FDAM sürücüsüne, Şekil 6'da gösterildiği gibi DA kaynak ile evirici devresi arasına Modifiyeli LLC rezonanslı DA-DA yükseltme devresi eklenmektedir. Yardımcı yükseltme devresi, kondansatör, bobin ve anahtar devresinden oluşmaktadır. Komütasyon moment salınımının etkili bir şekilde azaltılması için, iletim bölgesinde C1 kondansatörü şarj edilir. Komütasyon anında ise DA bara gerilimini yükseltmek için güç kaynağına S1 anahtarı üzerinden seri olarak bağlanır. Bu şekilde FDAM'un ihtiyaç duyduğu DA bara gerilimi elde edilmiş olur. Literatürdeki diğer DA-DA dönüştürücüye dayalı yöntemlerle kıyasla, komütasyon anında gerekli gücün tamamı yardımcı devreden karşılanmadığından yardımcı devrede kullanılan kondansatörün nominal kapasitesi daha düşüktür. Her anahtarlama döngüsünde L1 bobininde depolanan enerji S3 anahtarı üzerinden C2 ve L2 elemanlarından oluşan tank devresi ile yükseltilmektedir. Yükseltile enerji D8 serbest geçiş diyodu ile güç kaynağına geri aktarılmaktadır. Bu sayede, enerjini verimi artacaktır. Dahası, Yardımcı yükseltme devresi ile komütasyon süresi kısalmaktadır.



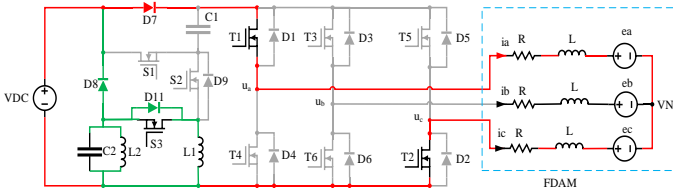
Şekil 6: FDAM sürücüsü için önerilen eşdeğer devre şeması.

#### 4.1. Tasarlanan Sürücü Yüksek Hız analizi

Analizi kolaylaştırmak için A-B fazlarının iletim periyodu dikkate alınacaktır. Komütasyon anında ise A fazı devreden çıkan faz, B fazı devreye alınan faz ve C fazı ise komütasyona uğramayan faz olarak dikkate alınacaktır. Denklem (36)'e belirtildiği gibi motor hızına bağlı olarak motor faz sargılarında endüklenen zıt emk değeri değişmekte ve bu nedenle, yüksek hızlarda zıt emk değeri kaynak gerilimi değerinden daha büyük ( $V_{DC} < 4E_m$ ) olmaktadır. Önerilen yardımcı yükseltme devresi çalışması, iletim bölgesinde (komütasyonsuz durumda) Şekil 7 (a)'daki gibi S1 anahtarı kapalı, S2 anahtarına darbe genişlik modülasyonu (DGM) uygulanarak görev döngüsü oranına bağlı L1 bobini üzerinden C1 kondansatörünü şarj edilmektedir. C1 kondansatörü şarj edilirken S2 ve S3 anahtarları eş zamanlı ama birbirinin tersi şeklinde çalışmaktadır. Yani, S2 anahtarı açık iken S3 anahtarı kapalı ve S2 anahtarı kapalı iken S3 anahtarı açık durumdadır. Bu sayede S2 anahtarı üzerinden C1 şarj edilirken, L1'de depolanan enerji Şekil 7 (b)'deki gibi S3 anahtarı ile L2 ve C2 elemanlarından oluşan devreye aktarılarak gerilim değeri yükseltilir. Yükseltileen gerilimi ise D8 serbest geçiş diyodu üzerinden güç kaynağına aktarılır



(a)



(b)

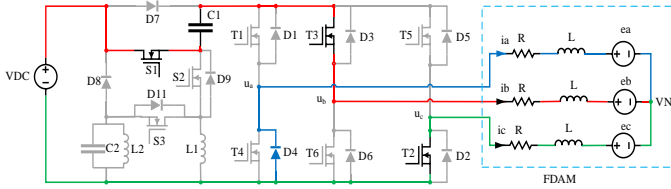
Şekil 7: İletim bölgesinde kondansatör şarj işlemi eş değer devresi.

(a) S2 anahtarı iletimde, (b) S2 anahtarı kesimde

Şarj edilen gerilim miktarı DGM görev döngü oranına bağlı olmaktadır. Denklem (27)'ye göre kondansatör şarj gerilimi ( $V_{cap*}$ ) hesaplanmaktadır. C1 kondansatör gerilimi ( $V_{cap}$ ) ile hesaplanan gerilimin ( $V_{cap*}$ ) farkı PI denetleyici ile darbe genişlik modülasyonu (DGM) görev oranı belirlenmektedir.

$$V_{cap*} = 4E_m - V_{DC} \quad (24)$$

Komütasyon bölgesinde, Şekil 8'deki gibi S1 anahtarı açık, S3 anahtarı kapalı, S2 anahtarı kapalıdır. Bu durumda, C1 kondansatörü  $V_{DC}$  kaynağı gerilimini artıracak şekilde seri bağlanarak evirici bara gerilimi üzerinden  $t_{com}$  süresi boyunca deşarj olmaktadır. Komütasyon moment salınımını azaltmak için gerekli olan  $V_{DC} = 4E$  eşitliği elde edilmektedir.



Şekil 8: Komütasyon bölgesinde kondansatörün deşarj olduğu eş değer devre.

## 4.2. Benzetim Sonuçları

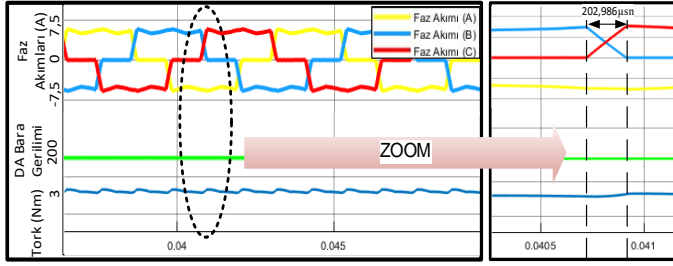
Tasarlanan sürücü modelinin bilgisayar ortamında benzetiminin yapılması MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetimde MATLAB modeli oluşturulurken kullanılan FDAM parametreleri Tablo 1'de verilmektedir.



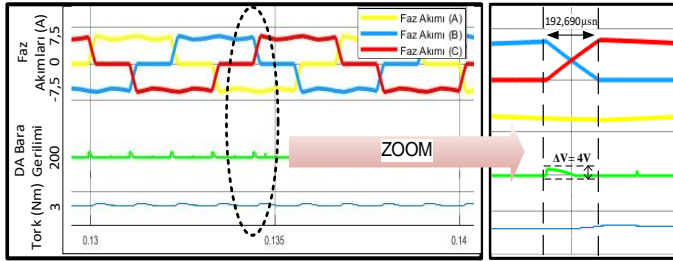
uygulamaktadır. Komütasyon anında, motor hız durumuna (Yüksek hız, düşük hız) göre yardımcı DC Dönüştürücü devresinde bulunan S1, S2 ve S3 güç anahtarlarını kontrol etmekte ve komütasyon anında ihtiyaç olan gerilim değeri C1 kondansatörü üzerinden elde edilmiş olur.

FDAM sürücü modeline yardımcı dönüştürücü devresini eklediğimizde elde edilen benzetim sonuçları aşağıda verilmektedir. Şekil 10'da 2250d/d hız ve 3 Nm yük değerlerinde geleneksel sürücü (a) ve önerilen sürücü (b) benzetim sonuçları görülmektedir. Sonuçlarda incelendiğinde bu hız değerinde geleneksel sürücü modeli ile önerilen sürücü modeli komütasyon anında, komütasyon moment salınımı yaklaşık olarak aynı oranda ve sıfıra yakın değerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, önerilen sürücü modelinde kullanılan DA bara gerilimi ile motorun ürettiği zıt EMK değerinin 6 katına ( $V_{DC} = 6E$ ) eşitleme yöntemine bağlıdır. FDAM, 2250 d/d hız değerinde ürettiği zıt EMK değerinin 4 katı yaklaşık olarak DA kaynağına eşittir. Buna rağmen, komütasyon süresi bakımından önerilen sürücü modeli geleneksel sürücü modeline göre %5 daha kısadır.





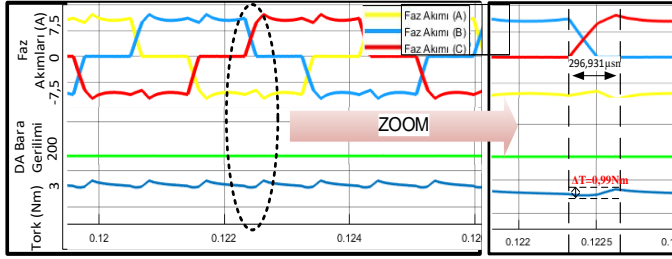
(a)



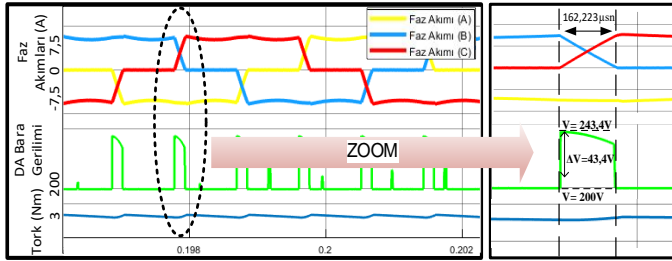
(b)

Şekil 10: 2250 d/d hız ve 3 Nm yük değerlerinde geleneksel sürücü (a) ve önerilen sürücü (b) benzetim sonuçları.

Şekil 11'de 2750 d/d hız ve 3 Nm yük değerlerinde geleneksel sürücü (a) ve önerilen sürücü (b) benzetim sonuçları görülmektedir. Sonuçlarda incelendiğinde geleneksel sürücü modelinde komütasyon anında, komütasyon uygulanmayan faz akımında ve çıkış torkunda yaklaşık %33 yükselme (spike) salınımı olduğu görülmektedir. Önerilen modelde ise komütasyon anında, komütasyon uygulanmayan faz akımında salınımın yaklaşık olarak sıfırdır. Ayrıca komütasyon süreleri önerilen sürücüde yaklaşık %45 daha kısa sürede tamamlanmaktadır.



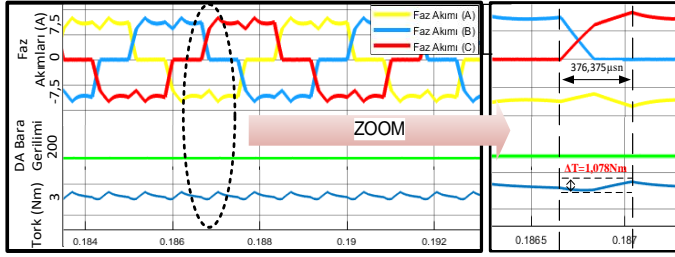
(a)



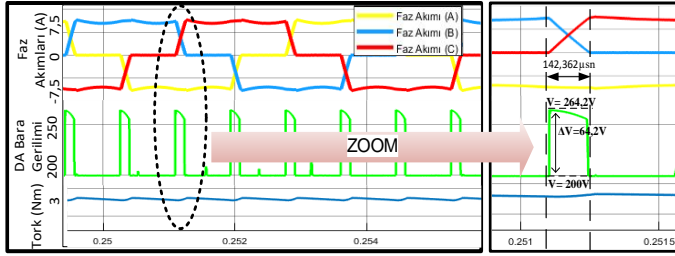
(b)

Şekil 11: 2750 d/d hız ve 3 Nm yük değerlerinde geleneksel sürücü (a) ve önerilen sürücü (b) benzetim sonuçları.

Şekil 12'de 3000 d/d hız ve 3 Nm yük değerlerinde geleneksel sürücü (a) ve önerilen sürücü (b) benzetim sonuçları görülmektedir. Sonuçlarda incelendiğinde geleneksel sürücü modelinde komütasyon anında, komütasyon uygulanmayan faz akımında ve çıkış torkunda yaklaşık %36 yükselme (spike) salınımı olduğu görülmektedir. Önerilen modelde ise komütasyon anında, komütasyon faz akımında salınımın yaklaşık olarak sıfırdır. Ayrıca komütasyon süreleri önerilen sürücüde yaklaşık %62 daha kısa sürede tamamlanmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 12: 3000 d/d hız ve 3 Nm yük değerlerinde geleneksel sürücü (a) ve önerilen sürücü (b) benzetim sonuçları.

## 5. KAYNAKÇA

Yao, X., Lu, G., Zhao, J., & Lin, H. (2018). Torque ripple minimization in brushless DC motor with optimal current vector control technique. *IEEE, In 2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 2524-2529.

Song, J. H., Choy, I., (2004). Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a single DC current sensor. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 2, pp. 312-319.

Fang, J., Li, H., Han, B., (2012). Torque ripple reduction in BLDC torque motor with non-ideal back EMF. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4630-4637.

Shi, J., Li, T., C., (2013). New method to eliminate commutation torque ripple of brushless DC motor with minimum commutation time. *IEEE, Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 6, pp. 2139-2146.

Xia, C., Xiao, Y., Chen, W., Shi, T., (2014). Torque ripple reduction in brushless DC drives based on reference current optimization using integral variable structure control. *IEEE, Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 2, pp. 738-752.

Kim, D., K., Lee, K., W., Kwon, B., I., (2006). Commutation torque ripple reduction in a position sensorless brushless DC motor drive. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 6, pp. 1762-1768.

Xia, C., Wang, Y., Shi, T., (2013). Implementation of finite-state model predictive control for commutation torque ripple minimization of permanent-magnet brushless DC motor. *IEEE, Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 896-905.

Jiang, W., Huang, H., Wang, J., Gao, Y., Wang, L., (2017). Commutation analysis of brushless DC motor and reducing commutation torque ripple in the two-phase stationary frame. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4675-4682.

Lu, H., Zhang, L., Qu, W., (2008). A new torque control method for torque ripple minimization of BLDC motors with unideal back EMF. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 2, pp. 950-958.

Liu, Y., Zhu, Z., Q., Howe, D., (2007). Commutation-torque-ripple minimization in direct-torque-controlled PM brushless DC drives. *IEEE, Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 4, pp. 1012-1021.

Zhou, Y., Zhang, D., Chen, X., Lin, Q., (2016). Sensorless direct torque control for saliency permanent magnet brushless DC motors. *IEEE, Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 2, pp. 446-454.

Carey, K., D., Zimmerman, N., Ababei, C., (2019). Hybrid field oriented and direct torque control for sensorless BLDC motors used in aerial drones. *IET Power Electron.*, vol. 12, no. 3, pp. 438-449.

Shi, T., Cao, Y., Jiang, G., Li, X., Xia, C., (2017). A torque control strategy for torque ripple reduction of brushless DC motor with nonideal back electromotive force. *IEEE, Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 6, pp. 4423-4433.

Sheng, T., Wang, X., Zhang, J., Deng, Z., (2015). Torque-ripple mitigation for brushless DC machine drive system using one-cycle average torque control. *IEEE, Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2114-2122.

Xiaofeng, Z., Zhengyu, L., (2006). A new BLDC motor drives method based on BUCK converter for torque ripple reduction. *Proc. IEEE, Power Electron. Motion Control Conf.*, pp. 1-4.

Hu, H., J., Cao, G., Z., Huang, S., D., Wu, C., Peng, Y., P., (2019). Drive circuit-based torque-ripple suppression method for single-phase BLDC fan motors to reduce acoustic noise. *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 7, pp. 881-888.

Shi, T., Guo, Y., Song, P., Xia, C., (2010). A new approach of minimizing commutation torque ripple for brushless DC motor based on DC–DC converter. *IEEE, Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3483-3490.

Viswanathan, V., Seenithangom, J., (2018). Commutation torque ripple reduction in the BLDC motor using modified SEPIC and three-level NPC inverter. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 1, pp. 535-546.

Li, X., Xia, C., Cao, Y., Chen, W. Shi, T., (2016). Commutation torque ripple reduction strategy of Z-source inverter fed brushless DC motor. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 11, pp. 7677-7690.

Xia, K., Lu, J., Bi, C., Tan, Y., Dong, B., (2016). Dynamic commutation torque-ripple reduction for brushless DC motor based on quasi-Z-source net. *IET Electr. Power Appl.*, vol. 10, pp. 819-826.

Jiang, G., Xia, C., Chen, W., Shi, T., Li, X., Cao, Y., (2018). Commutation torque ripple suppression strategy for brushless DC

motors with a novel noninductive boost front end. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 5, pp. 4274-4284.

Chen, W., Liu, Y., Li, X., Shi, T., Xia, C., (2017). A novel method of reducing commutation torque ripple for brushless DC motor based on Cuk converter. *IEEE, Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 27, pp. 5497-5508.

Xun, Q., Liu, Y., (2018). Commutation Torque-ripple Minimization for Brushless DC Motor Based on Quasi-Z-Source Inverter. *IEEE, In 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1439-1445.