



ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GELİŞMELER

EDİTÖR

PROF. SELMİN ENER RÜŞEN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Alanında Gelişmeler

Editörler

Prof. Dr. Selmin Ener Rüşen

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editörler
Prof. Dr. Selmin Ener Rüßen

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Aralık, 2024

Yayımcı Sertifika No
45813

Matbaa Sertifika No
47381

ISBN
978-625-6618-59-9

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan
hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres:Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157 / B, 06480,
Mamak, Ankara, Türkiye.
Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuskitap.com
e-mail: platanuskitap@gmail.com



PLATANUS PUBLISHING®

İçindekiler

BÖLÜM 1	5
Güneşten Elektrik Enerjisine: Hangi Santral?	
Yasin İçel	
BÖLÜM 2	21
Nesnelerin İnterneti: Kavramlar, Teknolojiler ve Uygulama Alanları	
SümeYYe Çarkıt	
BÖLÜM 3	31
Analysis of Transient Behaviors of Faults in Power Transmission Lines Using ATP	
Feyyaz Alpsalaz	
BÖLÜM 4	51
Comparison of Design and Simulation Results of Distribution Transformer in Ansys Maxwell	
Feyyaz Alpsalaz	
BÖLÜM 5	65
Depremlerde İHA Kullanımı	
Mehmet Dursun & Taner Dindar	
BÖLÜM 6	77
Gömülü Sistemlerde Yapay Zekâ Kullanımı: Uç Yapay Zekâ	
Mustafa Engin	
BÖLÜM 7	93
Akselerometre İle Tremor Ve Parkinson Hastalığının Tespiti	
Mesut Melek & Negin Melek	



BÖLÜM 1

Güneşten Elektrik Enerjisine: Hangi Santral?

Yasin İçel¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Adıyaman Üniversitesi TBMYO Elektrik ve Enerji Bölümü, ORCID: 0000-0001-9529-4811

Giriş

Günümüzde elektrik enerjisinin hesapsız tüketimi oldukça artmış ve toplumlar için ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Dünyamız insan popülasyonundaki hızlı artış, teknolojik gelişmeler, insan yaşam standardındaki yükseliş ve sanayileşme enerji açığını tetiklemiştir. Bunun sonucunda enerji tüketimi ve üretimi arasındaki makas da günden güne açılmaktadır. Gelişmiş ülkeler hatta gelişmekte olan tüm ülkelerde bu makası daraltmak için enerji tüketimlerini dengeleyecek enerji üretim miktarını artmak için çalışmalar yapmaktadırlar.

Günümüzde halen ülkeler enerji ihtiyaçlarını daha çok fosil (konvansiyonel) kaynaklar olarak bilinen doğal gaz, kömür, petrol gibi kaynaklardan sağlanmaktadır. Ancak, fosil yakıt kullanılması ciddi küresel ısınma ve çevre kirliliğine neden olup insan sağlığına ciddi zararlar vermektedir. Bunun olumsuzlukların nedeni fosil kaynaklı yakıtların bileşiminde yer alan hidrojen, sülfür, karbon ve diğer elementlerdir. Yakıtların bileşiminde yer alan bu zararlı elementler yanma sonucunda tepkimelere girerek doğaya çeşitli zararlı emisyonlar oluşturmaktadırlar (karbon monoksit, karbondioksit, kükürt dioksit vb). Ayrıca küresel ısınma sonucunda iklim değişikliği meydana gelmektedir. İklim değişikliği sonucunda ise dünyamızdaki su kaynaklarını tüketmekte, kuraklığa ve orman yangınlarına neden olmakta ve insan sağlığını ciddi etkileyen bulaşıcı hastalıklar artmaktadır. Her geçen gün ormanlarımızın azalmasıyla bu olumsuz süreç daha da hızlanmaktadır (İçel, 2012).

Fosil kaynakların yarattığı olumsuzlukları en aza indirmek için insanlığın yönelmesi gereken yenilenebilir enerji kaynakları, dünyamız var olduğu sürece, döndükçe ve canlılar yaşamını sürdürmeye devam ettiği sürece var olan hiç bitmeyecek olarak ön görülen enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- Güneş enerjisi
- Rüzgâr enerjisi
- Jeotermal enerji
- Hidrolik enerjisi
- Biyoenerji
- Hidrojen enerjisi
- Okyanus enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları, teorik olarak dünyamız tüm enerji ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede olduğu öngörülmektedir (Koyun, 2006).

Yenilenebilir enerji kaynakları denince ilk akla gelen enerji kaynakların başında güneş enerjisi, hidrolik enerji ve rüzgâr enerjisi gelmektedir. Güneş dünyamızın en büyük enerji kaynağıdır. Güneşten dünyamız yüzeyine yıllık 3.9×10^{24} J = 1.08×10^{18} kWh enerji gelmektedir. Bu oran dünyamızın toplam enerji ihtiyacının ve ayrıca kullanılabilir enerji kaynaklarının da yaklaşık 10.000 katıdır. Bu durumu başka şekilde açıklamak istersek dünya yüzeyine gelen güneş ışınlam miktarının sadece 1/10000'nini kullanabilirsek tüm insanlığın enerji ihtiyacı karşılanabilecektir (Quaschnig, 2016).

Güneş kaynaklı ışınlam enerjisi, yer yüzü ve atmosfer sistemimizdeki tüm fiziksel oluşumları etkileyen başlıca enerji kaynağımızdır. Dünyamızdaki madde ile enerji değişimleri ve akışları güneş enerjisi sayesinde mümkündür. Rüzgâr, deniz dalgaları, okyanuslardaki sıcaklık farklılığı ve biyokütle enerjisi de güneş enerjisinin değişime uğramış biçimleridir. Güneş enerjisi, doğamızdaki su dönüşüm döngüsünün de gerçekleşmesinde ciddi rol oynayarak, akarsu ve ırmak gücünü yaratmaktadır. Hatta, fosil kökenli yakıtların da biyokütle formundaki materyallerin içerisinde birikmiş güneş enerjisi olduğu bilinmektedir (İçel, 2012).

Geçmişte de günümüzde de, güneş enerjisi ev ve iş yerlerinde ısıtma-soğutma, yemek pişirimi, sıcak su temininde ve açık yüzme havuzu ısıtmasında, tarım teknolojilerinde sera ısıtmasında ve tarımsal ürünleri kurutmada, sanayide, güneş ocaklarında, deniz suyundan tuz ve tatlı su üretiminde, güneş pompalarında, güneş pilleri, güneş havuzları, ulaşım-iletişim gereçlerinde, sinyalizasyon ve otomasyonda, elektrik üretiminde vb çok geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretmek fikri özellikle 80'lerde başlayarak birçok yöntem geliştirilmiştir. Özellikle de güneş enerjisinden faydalanma konusunda çok ciddi ve ileri adımlar atılmış ancak henüz istenilen seviyeye ulaşamamış ve araştırmalar tüm hızıyla devam etmektedir.

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi direkt ve indirekt yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Direkt elektrik enerjisi üretim yöntemi kapsamında fotovolttaik, termoiyonik ve termoelektrik çeviriciler kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden indirekt biçimde elektrik enerjisi üretmek ise, güneşten enerjisinden yararlanılarak üretilen buhar ve bu buharı değerlendiren bir güç çevrimi veya güneş enerjisi kullanılarak elde edilen hidrojen ile hidrojenin kullandığı termik elektrik üreticileri ve yakıt pilleri ile olmaktadır.

Güneş elektrik santralleri termik elektrik ve PV (fotovoltaik) tipi olarak ikiye ayrılmaktadır.

1. Güneş Termik Enerji Santralleri

1.1. Parabolik Oluk Elektrik Santralleri

Parabolik oluk güneş yoğunlaştırıcıları, yoğunlaştırıcı enerji sistemlerin en çok kullanılanıdır. Bu sistemler parabol şeklinde bir yansıtıcı parlak yüzey, toplama kısmında yer alan emici boru ve emici boruyu çevreleyen cam dış koruma, izleme mekanizması, ısı transfer akışkan madde ve sistemi taşıyan ana karkas gövdeden oluşmaktadır.



Şekil 1. Parabolik oluk tipi güneş yoğunlaştırıcısı (Kearney, 2007)

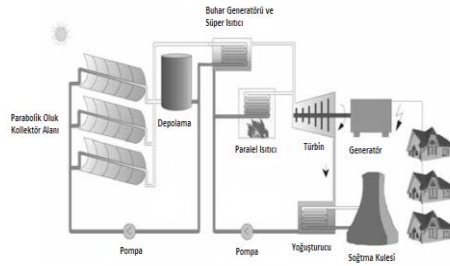


Şekil 2. Parabolik güneş santrallerinde yoğunlaştırıcı dizilişi (Kearney, 2007)

Güneş ışınimleri ilk önce sistemin ana gövdesini oluşturan yansıtıcı yüzeyine gelir. Parabol şeklindeki bu ana yüzey ışınları parabolik sistemin odak noktasında yerleştirilen ve parabolik eksen boyunca uzanan emici boruya yoğunlaştırılmaktadır. Bu işlem sonucunda sıcaklığı yükseltilem emici borudan, emici boru içersine geçen ısı transfer akışkana ısı transferi ile enerji aktarımı yapılarak boru içersindeki akışkan maddenin sıcaklığı yükseltilemektedir. Sıcaklığı belirli bir dereceye gelen akışkan madde ile indirekt ya da direkt buhar veya elektrik enerjisi

üretimi yapılabilir. Eğer emici boru içerisinde ısı transfer akışkanı olarak yağ kullanılmışsa indirekt buhar ya da elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilebilir.

Güneş ışınlarının odaklanması ile gerçekleşen yoğunlaştırma işlemi neticesinde sıcaklığı artan yağ ısı enerjisini, kendinden daha düşük sıcaklığa sahip suya ısı değiştiricileri aracılığıyla aktararak suyun buharlaşmasını sağlar. Buhar halindeki su buhar türbinine gönderilerek mekanik enerji elde edilir ve türbinlere bağlı jeneratörler aracılığı ile de mekanik enerjiden elektrik enerjisi üretimi sağlanır. Eğer ısı transfer akışkan madde olarak su kullanılmış ise ısı değiştiricileri olmadan yoğunlaştırma sonucunda su buhar haline geçer ve elektrik üretimi için buhar türbinine yönlendirilir (Şanlı, 2010). Parabolik oluk elektrik enerji santralleri ticari amaçla kurulan ilk enerji santralleridir. Bu elektrik santrallerin çalışma prensip şeması şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Parabolik oluk elektrik santrali prensip şeması (Quaschnig, 2016)

1.2. Güneş Termik Kule Elektrik Santralleri

Güneş termik kule elektrik enerji santralleri, merkezde yer alan bir kule ve yüzlerce hatta binlerce yönlendirilmiş aynadan meydana gelmektedir. Buradaki yönlendirilmiş ve hafif eğimli aynalara heliostatik adı verilmektedir. Kulenin en üst kısmına odaklanan heliostatik aynalar ile üst kısımdaki ısı 1000 °C ve üstüne maktadır. Kulenin üst kısmında erimiş tuz ya da sıcak havadan elde edilen buhar ile türbin ve jeneratör kullanılarak elektrik enerjisi ele edilmektedir. Bu enerji santrallerinin örnekleri ABD, İspanya ve İsrail’de bulunmaktadır (İçel, 2012).

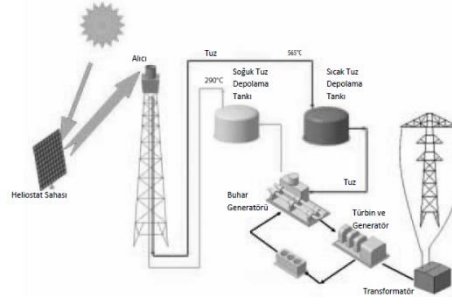


Şekil 4. Güneş termik kule elektrik santrali (İspanya) (Stoddard v.d., 2006)

Tablo 1. Dünyada kurulu bazı güneş termik kule elektrik santralleri (Güven vd., 2004; Groenendaal, 2002)

Proje	Ülke	Güç (MW)	Isı Transfer Akışkanı	Depolama Ortamı	İşletme Tarihi
SSPS	İspanya	0,5	Sıvı Sodyum	Sodyum	1981
EURELİOS	İtalya	1	Buhar	Nitrat tuz/su	1981
SUNSHİNE	Japonya	1	Buhar	Nitrat tuz/su	1981
Solar One	Amerika	10	Buhar	Yağ/Kaya	1982
CESA-1	İspanya	1	Buhar	Nitrat tuz	1983
MSEE/CatB	Amerika	1	Nitrat eriyiği	Nitrat tuz	1984
THEMİS	Fransa	2,5	Hi-tec. tuz	Hi-tec. tuz	1984
SPP-5	Rusya	5	Buhar	Su/buhar	1986
TSA	İspanya	1	Hava	Seramik	1993
Solar Two	Amerika	10	Nitrat eriyikli tuz	Nitrat tuz	1996
Solar Spire	İsrail	0,25	Hava	--	2000

Güneş termik kule enerji santrallerinde kulenin tepesinde yer alan alıcıya dik açı ile güneş ışınlarını yansıtan heliostatik aynalar güneşi takip edecek şekilde de yerleştirilebilmektedir. Günümüzde termik kulelerinde üst kısmına yerleştirilen alıcıların içerisinde erimiş nitrat tuzu bulunmaktadır. Nitrat tuzu alıcı içerisindeki suyu alarak buhar üretmekte ve generatör türbinini döndürerek elektrik enerjisi üretimini sağlamaktadır. İlk kurulan sistemlerde su buharı direkt olarak alıcıda üretilmekteyken günümüz sistemlerinde yüksek ısı iletimi ve ısı depolama özellikleri dikkate alınarak erimiş nitrat tuzu kullanan enerji üretim sistemleri mevcuttur. 50 – 200 MW’lık enerji santralleri inşa edilmektedir (Stoddard v.d., 2006).



Şekil 5. Güç kulesi santralinin şematik diyagramı (European Com., 2007)

1.3. Parabolik Çanak/Motor Güneş Elektrik Santralleri

Parabolik Çanak Güneş Elektrik Santrallerinde kW (kilowatt) seviyelerinde elektrik enerjisi üretilmektedir. Stirling motorlar kullanılarak kontrol edilen ve iki eksenli hareket edebilen çukur aynalar ile güneş ışığı takip edilerek maksimum verim elde edilmektedir. Aynaların odaklaması sonucunda merkez odak noktasında 650 °C ısı elde edilmektedir (İçel, 2012).

Parabolik çanak enerji sistemleri güneş yoğunlaştırıcı (parabolik çanak) ile bir adet güç dönüştürücü ünite bulunmaktadır. Parabolik çanak ünitesinin dik açılı güneş ışınlarının odak noktasında bulunan güç dönüştürücü üniteye yansıtan ve parabolik çanak görünümünü alacak şekilde dizilmiş birçok yansıtıcı aynalardan oluşmaktadır. Enerji sistemi iki eksenli güneş takibi sayesinde güneşi sürekli izlemektedir. Güç dönüştürme ünitesinde termal alıcı ile jeneratör bulunmaktadır. Güneş alıcısı içerisinde, kapalı çevrim ile güneş-hidrojen çevrimi ile ısı enerjisine dönüştürülür. Isınan hidrojen jeneratör türbünlerinin dönmesini sağlamaktadır. Hava soğutma sistemli olduklarında dolayı parabolik oluk ve termik güç kulesi uygulamalarındaki gibi soğutma suyuna ihtiyaç duyulmamaktadır. Günümüzde bu sistemlerde ısı depolama ünitesi kullanılmamaktadır (Erdoğan vd., 2009; Stoddard vd., 2006). Bu enerji sistemleri, kurulum ve bakım/onarım işlerinin kolaylığı açısından düzgün zemin üzerine inşa edilmektedir. 10 MW ile 25 MW arasında değerlere sahip Parabolik çanak enerji sistemleri mevcuttur. Enerji şebekelerinden bağımsız çalışabilmeleri nedeni ile uzak saha uygulamalarında kullanılabilmektedirler. Yüksek verimlilik ve modüler yapı nedeniyle bu sistemlerin maliyetlerinde ciddi inişler beklenmektedir (Erdoğan vd., 2009; European Com., 2007).

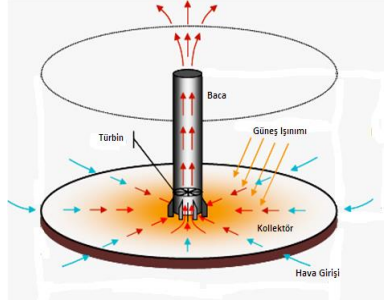


Şekil 6. Parabolik çanak sistemi (Stoddard v.d., 2006).

1.4. Güneş Bacası Elektrik Santralleri

Güneş bacası enerji sistemleri için yapılan ilk tanımlamalardan biri Alman yazar Hanns Gunther tarafından 1931 yılında yapılmıştır (Yabuz, 2009; Xinpıng vd., 2007; Schlaich vd., 2005). Güneş bacası elektrik sistemlerinde üç temel prensip bulunmaktadır. Bunlar; sera etkisi, yoğunluk ve sıcaklık farkıyla oluşan baca çekiş ve kinetik enerjidir. Genel olarak enerji sistemi dairesel veya dairesel kesite en yakın bir kesitte oluşturulmuş bir sera alanından ve bu sera alanının merkezine konumlandırılmış bacadan oluşmaktadır. Serayı oluşturan dairesel cam kolektör alanının altında bulunan hava, kolektör yüzeyine gelen güneş ışıınımları sayesinde ısınmaktadır. Isınan bu hava, dış ortamdaki kendinden daha soğuk hava ile arasında meydana gelen yoğunluk farkından ötürü cam kolektörün merkezine doğru hareket etmektedir. Kolektör merkezine yerleştirilen dikey baca yardımıyla havanın çekiş hızı artar ve ısınan hava üst ucu açık olan baca içerisinden dış ortama atılmaktadır. Hızı artarak kolektör merkezindeki bacaya yönelen ısınmış hava, bacanın giriş bölgesine yerleştirilen türbin ya da türbinleri döndürerek türbine bağlı olan generatör yardımıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu hava çevrimi güneş ışıınımları ne kadar büyük ise o kadar hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir.

Baca aynı zamanda kolektör altındaki havayı emdiği için, açık bulunan kolektörün yanlarından sisteme tekrar dışarıdan hava girmektedir. Bu sayede sürekli bir çalışma sağlanmış olmaktadır (Delikanlı ve Yabuz, 2011; Koyun, 2006).



Şekil 7. Güneş bacası sisteminin çalışma prensibi (Schlaich vd., 2007)

Güneş bacası enerji sisteminin çalışma şekli temelde bir rüzgâr türbini şekline benzese de rüzgâr türbinlerinde yaşanan rüzgâr yoksa elektrik enerjisi de yoktur problemi güneş bacası enerji sistemlerinde yaşanmamaktadır. Çünkü güneş olduğu zamanlarda cam sera (kolektör) içerisindeki hava ısınıp merkezdeki baca içerisinden harekete geçmektedir. Ayrıca bu sistemlerdeki hava akımı sürekli ve sabit olduğundan klasik rüzgâr türbinlerinde yer alan rüzgâr akımının yönünü belirlemek için kullanılan karmaşık ve pahalı sistemler gerekmemektedir. Sera alanı (kolektör) ve baca yüksekliği ile 150-200 MW güç üretilebilmektedir. Böylece çevreye zarar vermeden birkaç nükleer enerji santralin üreteceği enerji üretilebilir (İçel, 2012).

Tablo 2’de güneş termik enerji sistemlerinin karşılaştırması verilmiştir:

Tablo 2: Güneş termik enerji santrallerinin bazı parametreler açısından kıyaslanması (Güven vd., 2004)

	Parabolik Silindirik	Güç Kulesi	Çanak/Motor	Güneş Bacası
Güç Kaynağı	Merkezi	Merkezi	Lokal/Merkezi	Merkezi
Kapasite	30 – 100 MW	30 – 400 MW	10 kW – 50 MW	30 – 200 MW
Çalışma Modu	Şebeke bağlantılı	Şebeke bağlantılı	Şebeke bağlantılı / Şebekeden bağımsız	Şebeke bağlantılı
Alan Gereksinimi	18 m ² / kW	21 m ² / kW	20 m ² / kW	200 m ² / kW
Tipik verim (%)	13-15	13-15	15-17	0,7-1,1
İşletme Sıcaklığı (°C)	350	560	800	50

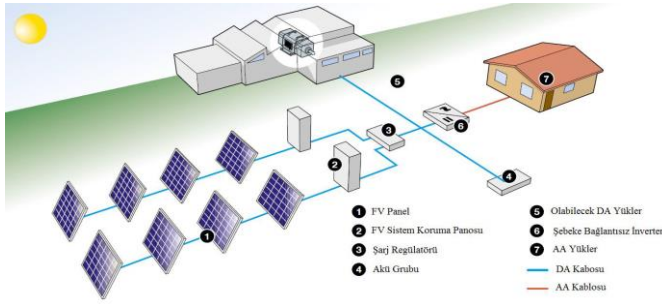
2. PV (Fotovoltaik) Güneş Enerji Santralleri

Güneş enerjisinden direkt elektrik enerjisi üretmek için kullanılan fotovoltaik panel hücreleri (güneş pilleri) ilk başta uzay araştırmalarında kullanılmak üzere geliştirilmiş; daha sonra Off-grid (şebekeden bağımsız), güç üretim merkezlerine uzak bağ-dağ evlerinde, deniz fenerlerinde, orman gözetleme kulelerinde, telekomünikasyon istasyonlarında ve daha birçok yerde enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılmaya başlanmıştır (Fahrenbruch ve Bube, 1983). Özellikle de son yıllarda, fotovoltaik panel üretim teknolojilerinin gelişmesi, panel üreten firma sayılarındaki artış ve bu firmalar arasındaki rekabet fotovoltaik panel fiyatlarında düşüş sağlamıştır. Böylece güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi, sadece enerji iletim ve dağıtımın zor ya da imkânsız olduğu yerlerde değil enterkonnekte şebekeye dahil edilerek (on-grid), ülkelerin toplam elektrik enerjisi üretiminde de ciddi bir yer tutması sağlanmıştır. Güneş enerjisinden fotovoltaik panellerle elektrik enerjisi üretiminin gittikçe daha cazip hale gelmesinde temel etken sadece güneş panel üretim maliyetlerinin düşüşü değildir. Güneş enerji sistemlerinin kararlı performans artışları, yüksek işletim güvenilirlikleri, şarj regülatörü ile inverter, off-grid sistemlerde kullanılması gereken enerji depolama birimleri gibi ekipmanlarında fiyatlarındaki düşüşler ülkelerin enerji üretim politikalarını güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretilmesi konusuna üzerinde odaklanmalarında son derece etkili olmaktadır (İçel, 2019).

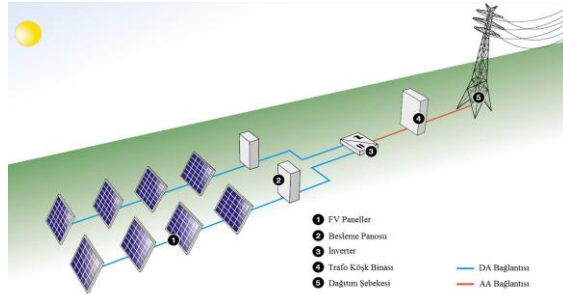
Günümüzde Güneş Enerjisi Santral (GES) uygulamalarında kristal silisyum teknolojisine dayalı fotovoltaik modüller en yaygın olarak kullanılmakta (%85 oranında) olup güneş ışınımını direkt elektrik enerjisine dönüştürmekte ve verimleri %15-28 arasında değişmektedir. Fotovoltaik hücre ve panel teknolojilerinde devam eden Ar-Ge çalışmaları genellikle hücre verimini artırmaya yöneliktir. Bunun gelişmelerin paralelinde de fotovoltaik güç sistemlerinin kalitesi, güvenliği ve uzaktan izlenmesi konuları da dikkat çekmektedir. Fotovoltaik güç sistemlerinde geliştirilen güvenlik ve kalite denetim çalışmaları, enerji sistem performansının yanı sıra yatırımcı ile kredi finansman kuruluşları açısından da riski en aza indirme noktasında devreye girmektedir (Jalilisaatlou, 2015).

Fotovoltaik hücre gelişimi sürecinde değişik yarı iletken teknolojileri kullanılmış ve hücre verimi yüksek fotovoltaik paneller üretilmiştir. Panel üretiminde kullanılan başlıca hücreler; monokristal silikon (m-Si), poli-kristal silikon (p-Si), kadmiyum tellürid (CdTe), amorf silikon (a-Si), bakır indiyum diselenid (CuInSe₂) ve bakır indiyum galyum diselenid (CuInGaSe₂) hücrelerdir. Panel üretiminde geliştirilen bu teknolojilerin tümü, birbirlerine göre verimlilik, uygulamadaki zorluklar, üretim aşamasında karşılaşılan zorluklar ve üretim maliyetleri yönünden avantaj ya da dezavantajlara sahiptirler (Kayri, (2017).

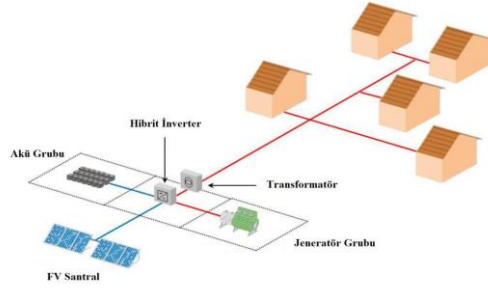
Fotovoltaik güneş hücreleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilirler. PV paneller ise uygulama şekline göre invertörler, akümülatörler, akü şarj kontrol ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir fotovoltaik güç sistemi oluşturmaktadırlar. Bu enerji sistemleri yakın zamana kadar yalnızca yerleşim yerlerine uzak, elektrik dağıtım şebekesi olmayan yerlerde (off-grid), generatörlere yakıt taşıma maliyetinin yüksek olduğu durumlarda tercih edilirken artık elektrik dağıtım şebekesi bulunan yerleşim yerlerinde de on-grid (şebeke bağlantılı) olarak evlerin ve işyerlerinin çatısına ve büyük ölçekli güneş enerjisi güç santral uygulamalarında da kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bunlara ek olarak dizel generatörler ya da diğer güç sistemleri (rüzgâr gibi) ile birlikte hibrit olarak da kullanılmaktadırlar (İçel, 2019; Fraunhofer, 2015).



Şekil 8. Şebeke bağlantısız FV santral genel yapısı (Abamor, 2016)



Şekil 9. Şebeke bağlantılı FV santral genel yapısı (Abamor, 2016)



Şekil 10. Hibrit FV santral genel yapısı (Lena, 2013)

2.1. Fotovoltaik Panellerin Olumlu ve Olumsuz Özellikleri

2.1.1. Olumlu Özellikleri

- ✓ Güneş ışınımından doğrudan elektrik enerjisi üreten tüm sistemler içerisinde en yüksek verime sahiptirler. Günümüzde üretilen güneş panellerinin verimleri %30-45 dolaylarındadır.
- ✓ Yeteri miktarda güneş ışınımı alan elektrik ihtiyacı duyulan tüm coğrafi konumlarda kurulabilirler.
- ✓ Kurulumları hızlı ve basittir. İhtiyaç durumuna göre güç kapasiteleri rahatlıkla artırılabilen veya azaltılabilmektedir.
- ✓ Güneş panelleri modüler olarak bir araya getirildiklerinden ötürü herhangi bir modülde meydana gelen arıza sonucunda bu modülün devreden çıkması durumunda diğer modüller yapılar elektrik enerjisi üretmeye devam etmektedirler.
- ✓ Teorik ve saha uygulama test sonuçlarına göre ortalama 20-25 yıl arasında ömürleri vardır.
- ✓ Temiz, sessiz ve minimum bakım gereksinimi ile elektrik enerjisi üretirler, konvansiyonel (fosil) enerji kaynaklarının aksine ekolojik çevreye zarar yoktur.
- ✓ Birim fiziki ölçüler dikkate alındığında yüksek çıkış gücüne sahiptirler.
- ✓ Panel üretimi için gerekli maddeler (örneğin Silisyum) dünyada bolca bulunmaktadır.

- ✓ Tükenebilen geleneksel enerji kaynakları kullanılmamakta, yenilenebilir enerji kaynağı kullanılmaktadır. Enerji üretimi için gerekli hammadde masrafı yoktur.

2.1.2. Olumsuz Özellikleri

- İlk kurulum aşamasında her geçen gün düşüş olsa da birim güç başına yüksek maliyet söz konusu olabilmektedir.
- Fotovoltaik güç sistemlerinin çıkışı doğru akım olduğundan, doğru akımı-alternatif akım dönüştürücü bazı ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, üretilen enerjide kayıplara ve verim düşüşlerine neden olmaktadır.
- Sürekli bir üretim söz konusu olmadığından off-grid sistemlerde üretilen elektrik enerjisinin depolanması için akü grubuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da sisteme ek bir maliyet getirmektedir.
- Güneş ışınım şiddetinin yüksek olduğu alanlar tercih edilmelidir.
- Yüksek sıcaklık olan bölgelerde verimin düşmesi riski söz konusudur.
- Güneş enerji istemlerinde verim çevresel faktörler (güneş ışınım miktarı, sıcaklık, nem, rüzgâr, panel sıcaklığı, toz gibi) olumsuz etkilere neden olduğundan sistemin tasarlanma aşamasında bu parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir.

SONUÇ

Günümüz dünyasında halen birçok ülke elektrik enerjisinin öncelikle petrol, doğalgaz, kömür, nükleer gibi fosil kaynakları kullanarak elde etmektedirler. Bu kaynakların kullanımı sonucu oluşan zararlı emisyonlar çevre kirliliği ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Yaşadığımız dünyayı ve geleceğimizi korumak artık vazgeçilmez önceliklerden biri durumuna gelmiştir. Bilimsel ve teknolojik gelişmelerin her geçen gün artmasıyla yenilenebilir enerji kaynaklarında özellikle güneş enerjisinden elektrik üretilmesi konusunda çalışmalar hızla artmaktadır.

Güneş enerjisinden elektrik üretim yöntemlerinin her biri farklı bölge ve coğrafyalar için uygulanabilir niteliktedir. Bu nedenle enerji santrallerinin kurulacağı bölgelerin coğrafik şartları, çevresel ve iklimsel özellikleri özellikle bölgenin sıcaklık, nem, güneş ışınım miktarı gibi parametreler dikkate alınarak o bölgeye uygun güneş enerji sistemini tasarlanması verimlilik açısından çok önemlidir. Fo-

tovoltaik sistemlerin diğ er sitemlere nazaran hareketli mekanik parçaların kullanımının daha az olması nedeniyle daha az bakım, onarım, işletme maliyeti gerektirdiği görülmektedir. Ayrıca fotovoltaik sistemler diğ er sistemlere nazaran daha fazla bilimsel araştırma ve geliştirmeye konu olmaktadır.

Dünyamızda ve ülkemiz için günümüz şartlarını incelediğimizde fotovoltaik güneş enerji santrallerinin diğ er santrallerden daha çok tercih edildiği ve geniş bir kullanım alanına sahip olduğu dikkat çekmektedir.

KAYNAKLAR

- Delikanlı, K., Yabuz, Z.R. (2011). Güneş bacası prototipinde verimliliği artırıcı yöntemlerin araştırılması, C.B.Ü. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1(15): 36-54.
- Abamor, S. (2016). Şebeke bağlantılı fotovoltaik enerji santrallerinin elektrik güç kalite parametrelerinin izlenmesi ve analizi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Erdoğan, H., Gümüş, B., Efe, S.B., Kutlu, C., Bayındır, H., Benteşen Yakut, Y., Çıra, F., Aslan, R. (2009). Yoğunlaştırıcı güneş enerji santralleri ve Ilısu HES'e alternatif olarak Güneydoğu Anadolu Bölgesine uygulanabilirliği. V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır.
- European Communities. (2007). Concentrating Solar Power from Research to Implementation. Belgium.
- Fahrenbruch, A., Bube, R. (1983). Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion, Academic Press, New York, USA.
- Fraunhofer, I. (2015). Photovoltaics Report, Freiburg, Germany.
- Groenendaal, B.J. (2002). Solar thermal power Technologies, Monograph in the framework of the VLEEM Project. ECN proj. num. 7.7372.
- Güven, Ş.Y., Üçgül, İ., Şenol, R. (2004). Güneş enerjisi ısı uygulamaları ve güneş kulelerinin incelenmesi, Mühendis ve Makine Dergisi, 533:17-28.
- İçel, Y. (2012). Farklı çaplarda kanat modelleri ile güneş bacası enerji sisteminden elektrik üretim verimliliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye.
- İçel, Y. (2019). Güneş enerji sistemlerinin performans tahmini için yapay sinir ağları ile modellenmesi ve verimliliğin incelenmesi. Doktora Tezi, İnönü Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye.
- Jalilisaatlou, R. (2015). Fotovoltaik güç sistemlerinin kalite karakteristiklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Kayri, İ. (2017). Güneş panelleri ile üretilen enerjinin ortam bilgileri kullanılarak yapay sinir ağları ile tahmini. Doktora Tezi, Fırat Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.
- Kearney, D.W. (2007). Parabolic Trough Collector Overview, National Renewable Energy Laboratory. Golden CO, 1-39.
- Koyun, A. (2006). Güneş bacası ile enerji üretiminin incelenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta, Türkiye.

- Lena, G. Rural Electrification with PV Hybrid Systems. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme Club of African National Agencies and Structures In Charge of Rural Electrification (Club-Er), IEA PVPS.
- Quaschnig, V. (2016). Understanding Renewable Energy Systems. Earthscan, London.
- Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., Weinrebe, G. (2005). Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems - Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation. Journal of Solar Energy Engineering. 127(1): 117-121.
- Stoddard, L., Abiecunas, J., O'Connel, R. (2006). Economic, Energy, and Environmental Benefits of Concentrating Solar Power in California, April 2006, NREL.
- Şanlı, G. (2010). Parabolik oluk tipi güneş kolektörlerinin teorik olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Xinping, Z., Yang, J., Xiao, B., Hou, G. (2007). Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. Applied Thermal Engineering, 27: 2044–2050.
- Yabuz, Z.R., (2009). Güneş bacasında konstrüktif iyileştirme çalışmaları ve performans artırıcı yöntemlerin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta. Türkiye.



BÖLÜM 2

Nesnelerin İnterneti: Kavramlar, Teknolojiler ve Uygulama Alanları

Sümeyye Çarkıt¹

¹ Öğr. Gör., Kırklareli Üniversitesi, Gıda Arzı Güvenliği ve Dijitalleşme Ortak Uygulama ve Araştırma Merkezi, ORCID: 0000-0002-5236-4813

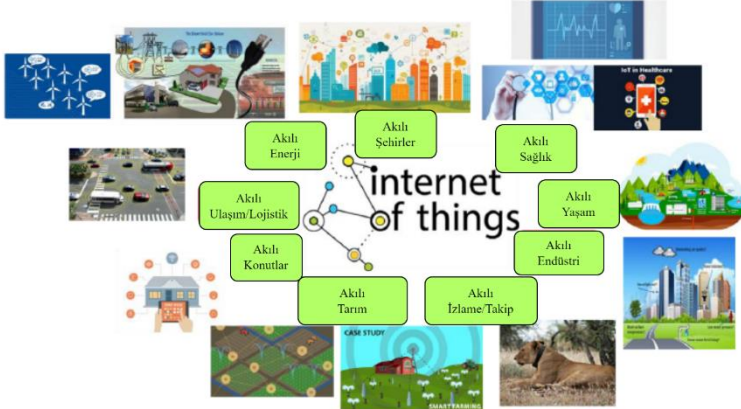
1. Giriş

Son birkaç yıldır, nesnelerin interneti (internet of things, IoT) tabanlı uygulamaya katılabilen internete bağlı akıllı cihaz ve nesne sayısındaki artış nedeniyle IoT alanında hızlı bir teknolojik gelişme yaşanmakta ve araştırmalar devam etmektedir (Tanwar vd., 2018). IoT terimi teknik, sosyal ve ekonomik öneme sahip güncel bir konudur. IoT'nin temel amacı: Dünyadaki her nesneyi tek bir ortak altyapı altında birleştirmektir. Böylece, insanlar yalnızca bu nesneleri kontrol etmekle kalmaz aynı zamanda mevcut durum hakkında düzenli ve zamanında güncellemeler sağlayabilir duruma gelirler (Khanna & Kaur, 2020).

IoT kavramı 1999 yılında bir grup araştırmacının yürüttüğü Radyo Frekansı Tanımlama (RFID) Geliştirme Topluluğu'nun bazı üyeleri tarafından ortaya atılmıştır. Mobil cihazlar, kriptolu ve gömülü iletişim, veri analizi (Sadi, 2019), büyük veri ve bulut bilişimi gibi çeşitli alanlardaki teknolojik ilerlemelerden sonra IoT'nin popüleritesi artmıştır. Şekil 1'de görülmekte olan IoT kavramı; milyarlarca nesnenin algılayabildiği, iletişim kurabildiği ve bilgi paylaşabildiği, hepsinin kamusal veya özel internet protokolü (IP) ağları üzerinden birbirine bağlı olduğu bir dünyayı hayal ettirmektedir (Bardi, 2023). IoT fiziksel nesnelerin dahil olduğu ve birbiri arasında veri alışverişi yapabildiği, kontrol sağlayabildiği ve ağıdır (Patel & Patel, 2016). Şöyle ki:

- Sadece bilgisayarlar değil,
- Her tür elektronik cihaz,
- Elektrikli ulaşım araçları,
- Enerji depolama sistemleri ve bataryalar (Çarkıt, 2024),
- Enerji üretim santralleri ve dağıtım istasyonları,
- Akıllı şebekeler (enerji tüketimini optimize eden akıllı sayaçlar, yenilenebilir enerji yönetimi, akıllı şebeke sistemleri),
- Akıllı telefon ve tabletler,
- Robot süpürge ve klima gibi akıllı ev aletleri,
- Oyuncaklar,
- Ulaşım ve lojistik (otonom araçlar, trafik yönetimi, filo takibi, akıllı şehir uygulamaları),
- Kameralar,

- Tıbbi cihazlar (uzaktan hasta izleme, sağlık verilerinin anlık aktarımı, hasta güvenliği),
- Endüstriyel otomasyon sistemleri (üretim süreçlerinde verimlilik artışı, makineler arası iletişim, otomatik arıza tespiti),
- Canlıların günlük hayatta kullandıkları bireysel elektronik cihazlar,
- Evler, binalar, ofisler, stadyumlar, bankalar (akıllı termostatlar, güvenlik sistemleri, aydınlatma kontrolü, sesli asistanlar),
- Sanal teknolojiler,
- Karbon ayak izi hesaplama sistemleri,
- Akıllı tarım ve hayvancılık (akıllı sulama sistemleri, hayvan takibi, çevresel koşul izleme),
- Tarım ürünü depolama, silo sistemleri (Gür vd., 2024),
- İnsansız hava araçları..vb. hepsi birbirine kablolu veya kablosuz olarak bağlıdır.



Şekil 1. IoT'ni örnek bazı uygulama alanları (Patel & Patel, 2016)

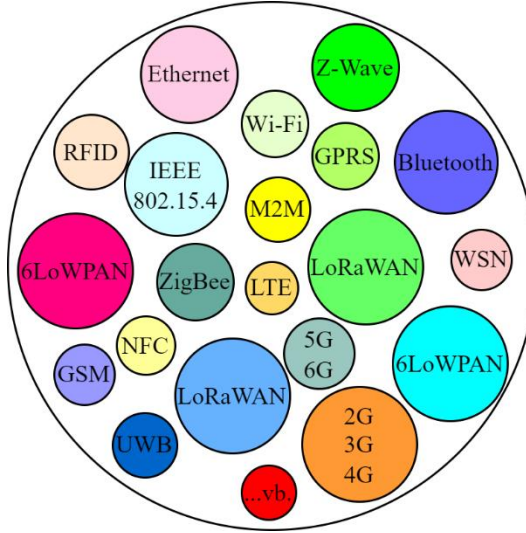
Sayısı artırılarak çeşitlendirilebilen bütün bu akıllı teknolojik organizasyonlar IoT sayesinde; konumlandırma, izleme, güvenlik ve kontrol, hatta kişisel gerçek zamanlı çevrimiçi izleme, çevrimiçi yükseltme, süreç kontrolü ve süreç yönetimi elde etmek için belirlenmiş protokollere göre iletişim kuran ve bilgi paylaşan bir ağ haline gelmektedir (Tekin, 2006; Vermesan & Friess, 2013). Sonuçta, gelişmiş hizmetleri etkinleştiren bilgi toplumu için küresel bir altyapı oluşmaktadır. IoT'yi aşağıdaki gibi üç ana gruba ayrılabilir:

- İnsanlardan insanlara (P2P)bağlantı,
- İnsanlardan makineye/nesneye (P2M) bağlantı,
- Makineden/nesneden makineye/nesneye (M2M) bağlantı.

2. IoT Etkinleştirici Teknolojiler ve Özellikler

IoT ile iletişim internet üzerinden ilgili nesne veya nesne zincirlerine kadar uzanmaktadır. IoT genel anlamda; Şekil 2’deki teknolojilerden ve M2M iletişimden, geleneksel kablosuz/kablolu sensör ağlarından, 2G/3G/4G’dan, GSM’den, GPRS’den, RFID’den, Wi-Fi’den, GPS’den, mikrodenetleyiciden ve mikroişlemcilerden daha fazlasıdır. Bunlar, IoT uygulamalarını mümkün kılan etkinleştirici teknolojiler olarak kabul edilmektedir. IoT etkinleştirici teknolojiler genel anlamda üç kategoriye ayrılabilir (Vermesan & Friess, 2013):

- Bağlamsal bilgi edinmesini sağlayan teknolojiler,
- Bağlamsal bilgi işlemlerini sağlayan teknolojiler,
- Güvenliği ve gizliliği iyileştiren teknolojiler.



Şekil 2. IoT haberleşme teknolojileri

İlk iki kategori, nesnelere zeka inşa etmeyi gerektiren işlevsel yapı taşları olarak birlikte anlaşılabilir durumdadır. Bunlar aslında IoT'yi geleneksel internet'ten ayıran özelliklerdir. Üçüncü kategori işlevsel değil, fiili bir gerekliliktir. Bu olmadan IoT'nin nüfuzunun ciddi şekilde azalması beklenmektedir (Vermesan & Friess, 2014). IoT; donanım ve yazılım teknolojilerinin bir karışımı olarak verileri depolamak, veri almak ve veri işlemek için kullanılan donanım ve yazılımları

ifade eden bilgi teknolojisinin, bireyler veya gruplar arasındaki iletişim için kullanılan elektronik sistemleri içeren iletişim teknolojisinin entegrasyonuna dayalı çözümler sunmaktadır. IoT'nin temel özelliklerinden bazıları şunlardır (Patel & Patel, 2016; Tran & Djabir, 2023):

Bağlantılılık: IoT ile ilgili olarak, her şey küresel bilgi ve iletişim altyapısıyla birbirine bağlanabilir durumdadır. Bağlantı, temelde ağ erişilebilirliğini ve uyumluluğunu sağlamaktadır. Erişilebilirlik bir ağa girmek olarak kabul edilirken, uyumluluk da veri üretme ve tüketme konusunda ortak bir yetenek sağlamaktadır.

Nesnelerle ilgili hizmetler: IoT, fiziksel nesneler ile ilişkili sanal nesneler arasındaki gizlilik koruması ve anlamsal tutarlılık gibi nesnelerin kısıtlamaları dahilinde nesneyle ilgili hizmetler sağlama yeteneğine sahiptir. Nesnelerle ilgili hizmetleri nesnelerin kısıtlamaları dahilinde sağlamak için hem fiziksel dünyadaki hem de bilgi dünyasındaki teknolojiler değişmektedir.

Heterojenlik: IoT'deki cihazlar farklı donanım platformlarına ve ağlarına dayalı olarak heterojendir. Farklı ağlar üzerinden diğer cihazlarla veya servis platformlarıyla etkileşime girebilir durumdadır.

Dinamiklik: Cihazların durumu dinamik olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin cihazın kapalı ve açık durumu, bağlı ve bağlantısı kesilmiş durumu, konum ve hız dahil olmak üzere cihazların bağlamı, cihaz sayısı dinamik olarak değişebilmektedir.

Ölçeklenebilirlik: Yönetilmesi gereken ve birbirleriyle iletişim kuran cihaz sayısı, internete bağlı mevcut cihazlardan daha büyük olmaktadır. Diğer taraftan, saklanan veya işlenen verilerin yönetimi ve uygulama amaçları için verimli bir şekilde analiz edilmesi önem arz etmektedir.

Güvenlik: IoT kullanılırken en önemli konulardan birisi olan kişisel verilerin güvenliği ve fiziksel refahın güvenliği unutulmamalıdır. IoT'nin başlangıç-aracı-alıcı arasındaki uç noktaları, haberleşme ağları ve bu sistemde hareket eden verileri güvence altına almak, ölçeklenebilecek bir güvenlik paradigması yaratmak anlamına gelmektedir.

3. IoT'nin Güncel ve Gelecekteki Potansiyel Teknolojik Gelişimi

Yarı iletken teknolojisi, mikro/makro elektronik, haberleşme, algılayıcılar ve sensörler, akıllı cihazlar, gömülü sistem ve yazılımları, büyük veriler ve bulut ağları, sanallaştırılmış ağlar, güç ve enerji depolama gibi esneklik kabiliyetine sahip teknolojilerin geliştirilmesi diğer fiziksel sistem ve cihazların değişkenlik gösteren ortam koşullarında görev ifa etmesi ve bağlantı sürekliliğinin sağlanması için önem arz etmektedir.

Bir IoT tasarlanırken; algılayıcı, bağlantı seçimi, yönetim biçimi ve uygulama şekli gibi katmanlara dikkat edilmelidir. Bu tasarımda teknolojiler üç gruba ayrılabilir:

- 1) Mikroişlemcileri etkileyen birinci grup teknolojileri,
 - Sürdürülebilir enerji ve güç için gücü ve tüketimi düşük, kabiliyeti büyük sensörler,
 - Uygulamadaki sensörlerin hafızası ve zekası,
 - Çip setlerinin olabildiğince küçültülmesi,
 - Veri oluşumunu sağlayan sensörlerde kablosuz ürün tercihi.
- 2) Ağ paylaşımını destekleyen, hız ve gecikme sorunlarını ele alan, kapasite takibi ve artırımı yapabilen teknolojiler,
 - Bilişsel ağlar veya yazılım tanımlı radyolar gibi ağ paylaşım biçimleri,
 - LTE (uzun süreli gelişim, 4G) ve LTE-A (gelişmiş uzun süreli gelişim, 4.5G) gibi kapasite ve gecikme sorunlarını ele alan ağ gelişimleri (Yaylıkan, 2019).
- 3) IoT uygulamalarını destekleyen yönetim hizmetleri,
 - Akıllı karar alma yöntemleri,
 - Bellek içi ve akış analitiği gibi veri işleme teknolojilerinin hızı.

IoT'nin kendini güncelleyebilmesi için; yapay zeka, blok zinciri, makine öğrenmesi, kuantum bilgisayarlar, kuantum hesaplama, uydu haberleşme, karbon ayak izi, sera gazı salınımı güncel gelişmeleri takip ederek bu alanlarda kendine yer edinmesi gerekmektedir. IoT'nin diğer potansiyel alanlardaki gelişimi ve gereklilikleri şu şekilde özetlenebilmektedir.

- Donanım aygıtlarındaki düşük maliyetli modüler aygıtların, ultra düşük güç EPROM/FRAM'ların, otonom devrelerin gelişimi için,
 - Nanoteknoloji,
 - Yonga setlerinin minyatürleştirilmesi,
 - Ultra düşük güç devreleri.
- Sensör teknolojisindeki zeka, kendi kendine güç sayılabılme ve öze tüketimin iyileştirilebilmesi için,
 - Akıllı sensörler,
 - Taarımda kullanılan sensör sayısının artırımı ve veri bulabilmek için küçük sensör mekanizmaları,
 - Düşük güç talep eden ve tüketen sensörler,
 - Bağlantı ve veri aktarımı için kablolu yerine kablosuz sensör ağı (Soylu, 2012).

- İletişim teknolojisindeki birlikte ve koordineli çalışabilirlik, çok protokollü çip setleri, ağ geçişlerindeki yakınsamalar, çip üstü bağlantı ağları, uzun menzil ve yüksek frekans, 5G ve 6G için,
 - Çip üstü anten çeşitleri,
 - Geniş spektrum olanağı ve spektrum takip eden protokoller,
 - Geniş spektrum üzerinde protokol birleşimi,
 - Çok fonksiyonlu yeniden yapılandırılabilir çipler.
- Ağ teknolojisindeki bulut ağı, yazılım tanımlamaları, hizmet ve ihtiyaç tabanlı ağ çeşitleri için,
 - Kendi kendine organize olabilen ağ yapıları,
 - Kendi kendine öğrenme yeteneği,
 - Arıza tespiti yapabilen ve kendi kendini onarma yeteneği,
 - IPv6'nın (internet protokolü sürüm 6) etkin ölçeklenebilirliği (URL-1, 2024),
 - IoT dağıtımı.
- Yazılım, kod ve algoritma teknolojisindeki bağlam farkındalığı, kendi kendini yeniden kullanabilen yazılım, kendini takip eden kod yapısı, yapılandırma ve sürekli iyileştirme becerisi, yönetme becerisi için,
 - Hedef odaklı yazılım üretimi,
 - Dağıtılmış zeka,
 - Problem çözme,
 - Kullanıcı odaklı yazılım,
- Sinyal ve veri işleme teknolojisindeki ortak sensör metodolojisi, verimli veri işleme (Günay & Çarkıt, 2024), otonom süreç için,
 - Bağlamın farkında olan veri işleme ve veri cevapları,
 - Bilişsel işleme ve optimizasyon,
 - IoT dahilinde karmaşık veri analizi,
 - IoT dahilinde akıllı veri görselleştirme,
 - Enerji ve frekans spektrumunu bilerek veri işleme,
- Global ve yerel arama motoru teknolojilerindeki ölçeklenebilirlik ve hizmet bağlama için,
 - Otomatik rota etiketleme ve tanımlama,
 - İsteğe bağlı hizmet keşfi/entegrasyon,
- Gizlilik ve güvenlik teknolojilerindeki kimlik doğrulama yöntem ve cihazlarının düşük maliyetli, yüksek performanslı ve güvenli çalışabilmesi, bilgi yerelleştirmesi yoluyla gizliliğe yönelik merkezi olmayan yaklaşımların araştırılması için,
 - Kullanıcı merkezli gizlilik ve gizlilik politikaları gelişimi,

- Gizlilik prensipli veri işleme,
- Güvenlik ve gizlilik ihtiyacına dayalı profil oluşturma ve profil seçimi,

4. Sonuç

Nesnelerin interneti teknolojisi güncel bir alanı oluşturmaktadır. Geniş bir uygulama alanı ve çeşitli nesnelerin heterojen karışımı nedeniyle gömülü sistemler, bilgisayar bilimi ve bilgi teknolojisi alanındaki araştırmacılar için önemli bir araştırma konusudur. IoT'nin istenilen yerde istenilen verimde çalışabilmesi için sensör ve ağ mekanizması gibi bileşenlerinin koordineli olarak kaliteye ulaşması gerekmektedir. IoT'de performansı belirleyen unsurlar tasarım alt tabakalarıdır. Bu tabakaların bireysel performansının birleşimi sonucu IoT'nin sistem ve ürün performansı ortaya çıkmaktadır. O yüzden seçim ve seçilimin doğru bir şekilde doğru teknolojik yönde olması önemlidir.

Kaynakça

- Bardi, F.N. (2023). Dijital dönüşümün vergi idaresine sağladığı faydalar: Ülke örnekleri. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, s. 200.
- Çarkıt, T. (2024). Çeşitli lityum-iyon batarya bloklarında kullanılan ortak yönetim sistemi tasarımı. İleri Mühendislik Çalışmalarında Farklı Bakış Açıları, Bölüm 4, İksad Yayınları, 76-93.
- Etkeser, S. (2019). Endüstri 4.0'a geçişte olgunluk modeli oluşturulması ve yol haritasının belirlenmesi: Türkiye'de KOBİ'ler üzerine bir çalışma. Bahçeşehir Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, s. 100.
- Günay, B., Çarkıt, T. (2024). Görüntü işleme yöntemi kullanılarak hedef takibi: YOLO ve haarcascade algoritmalarının karşılaştırılması. 6th International Conference on Data Science and Applications, 88-93.
- Gür, Ç., Okta, O., Türkmen, C., Çarkıt, T. (2024). Tahıl silo dolum işlemlerinin verimli, güvenilir ve çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirilmesi için SCADA tabanlı PLC otomasyon sistemiyle kontrol edilmesi. Elektrik- Elektronik ve Kontrol Mühendisliği Alanında Farklı Yaklaşımlar, Bölüm 2, Bidge Yayınları, 31-72.
- Khanna, A., Kaur, S. (2020). Internet of things (IoT), applications and challenges: A comprehensive review. Wireless Personal Communications, 114, 1687-1762.
- Patel, K.K., Patel, S.M. (2016). Internet of things-IoT: Definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges. International Journal of Engineering Science and Computing, 6(5), 6122-6131.
- Soylu, T. (2012). Kablosuz algılayıcı ağların uygulama alanları ve bir algılayıcı düğüm tasarımı. Trakya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, s. 216.
- Tanwar, S., Tyagi, S., Kumar, S. (2018). The role of internet of things and smart grid for the development of a smart city. In Intelligent Communication and Computational Technologies: Proceedings of Internet of Things for Technological Development, 23-33.
- Tekin, F. (2006). İnternet ve ileri erişim teknolojileri. Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, s. 96.
- Tran, T.A., Djabir, D.A. (2023). The fundamental characteristics of IoT (internet of things) for controlling daily air pollution. Recent Advancement of IoT Devices in Pollution Control and Health Applications, Chapter 1, Woodhead Publishing, 1-21.
- URL-1: <https://blog.r10.net/nedir/127001>. (Erişim Tarihi: Kasım 2024).
- Vermesan, O. Friess, P. (2013). Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems. River Publishers' Series in Communications, 1st Edition, s. 362.

- Vermesan, O., Friess, P. (2014). Internet of Things-From Research and Innovation to Market Deployment. River Publishers' Series in Communications, 1st Edition, s. 372
- Yayıkan, A. (2019). Gelecek nesil mobil iletişim sistemlerinde pilot kirliliğinin azaltılmasında karınca kolonisi optimizasyonu ile verimli pilot atama yaklaşımı. Düzce Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, s. 59.



BÖLÜM 3

Analysis of Transient Behaviors of Faults in Power Transmission Lines Using ATP

Feyyaz Alpsalaz¹

¹ Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-7695-6426

1. INTRODUCTION

Power transmission lines (PTLs) play a critical role in transporting electrical energy from generation sites to consumption centers. These lines operate under high voltage over long distances across vast geographical areas, making them vulnerable to various environmental factors, technical malfunctions, and natural events. PTLs carry potential risks that, in the event of a fault, can lead to power outages and significant losses in system efficiency.

This study aims to examine various fault types in power transmission lines (PTLs). Fault scenarios can vary depending on whether the line is open-circuited or loaded at the terminal, and they include single-phase-to-ground, two-phase-to-ground, and three-phase-to-ground faults. Additionally, faults caused by natural events, such as lightning strikes, can result in severe damage to transmission lines. In this context, the study will also address the use of ATP (Alternative Transients Program), a critical tool for fault analysis. ATP performs transient simulations to analyze the impacts of these faults on the system, enabling safer and more efficient operation of transmission lines. The study aims to investigate the dynamics of each fault type in detail, understand transient behaviors through ATP simulations, and reveal their potential impacts on PTLs. By doing so, it seeks to facilitate the prediction of potential faults in transmission lines, improve fault management, and accelerate recovery processes following faults.

2. LITERATURE REVIEW

Fault detection and analysis in power transmission lines are critically important for ensuring the uninterrupted and reliable transmission of electrical energy. Studies in this field focus on the rapid and accurate identification of faults, locating fault points, and enhancing system security.

Leon Colqui et al. (2022) conducted a study on modeling power transmission lines in the ATP software using the modal transformation method based on the Clarke matrix. In this study, the analysis of three-phase transposed lines in terms of modes was carried out using ideal transformers, enabling the modeling of frequency-dependent parameters. Furthermore, the proposed method demonstrated high accuracy in both the time and frequency domains when compared to the Bergeron and JMarti models. (Colqui, Eraso, Caballero, Filho, & Kurokawa, 2022). Fekete et al. (2010) conducted a study on transient analysis of lightning surges in a 110 kV overhead and underground cable connection using ATP-EMTP. This study examined the performance of zinc oxide surge arresters installed at the connection point between the overhead line and underground cable

during the establishment of a new substation in eastern Croatia. Simulations evaluated the effects of lightning surges on the protective sheath of the underground cable and demonstrated that harmful overvoltages could be mitigated with proper surge arrester coordination. (Fekete, Nikolovski, Knezević, Stojkov, & Kovač, 2010).

Çakıl et al. (2024) conducted a study on modeling power transmission lines and short-circuit analysis using Matlab Simulink. The study involved modeling the interconnected system spanning from the Keban Dam to Elazığ, analyzing power flow, short-circuit currents, and relay coordination in the transmission lines. Additionally, potential short-circuit scenarios in the system were examined, and relay and circuit breaker settings were optimized. This allowed for a detailed evaluation of line losses and voltage drops in the power transmission system. (Çakıl et al, 2015). Alpsalaz et al. (2024) conducted a study utilizing artificial neural networks (ANN) for fault location detection in power transmission lines. In this study, a 478.9 km long transmission line model with three transposed lines was developed using EMTP/ATP software, aiming to detect short-circuit faults with high accuracy. Current and voltage data during fault conditions were analyzed using the modal transformation method, and their spectra were obtained via fast Fourier transform (FFT). The data derived from FFT were used to train the ANN, achieving fault location detection with 99% accuracy. (Alpsalaz, Yalçınöz, Kaygusuz, & Mamiş, 2024). Tağluk et al. (2015) conducted a study on fault type and location detection in power transmission lines using extreme learning machines (ELMs). In this study, ELMs were employed to detect electrical and mechanical faults in power transmission lines. (Tağluk, Mamiş, Arkan, & Ertuğrul, 2015). Ertuğrul and Kurt (2011) conducted a study on rapid fault detection in power transmission lines using a modular artificial neural network (ANN) and discrete wavelet transform (DWT). The study aimed to achieve fast and accurate fault detection by utilizing real fault records. (Ertugrul & Kurt, 2011).

3. MATERIALS AND METHODS

This section will provide detailed information on line parameters, line models, and line modeling using ATP.

3.1. Line Parameters

Transmission line conductors possess resistance (R) and inductance (L) values per unit length. Additionally, there is a capacitance (C) per unit length between the conductors, which are parallel and insulated from each other. Due to the non-ideal nature of the insulating material, there is also a small leakage conductance

(G) between the conductors. Line parameters such as resistance, inductance, capacitance, and conductance are not concentrated at a specific point but are uniformly distributed along the length of the line.

3.1.1 Resistance

The effective resistance value is determined by dividing the power loss occurring in the conductor by the square of the current (Akmaz, 2017).

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (1)$$

The resistance of the conductor to direct current (DC) is calculated using Equation (2) (Du & Liao, 2012).

$$R_{DA} = \frac{\rho d}{A} \quad (2)$$

Here, A represents the cross-sectional area of the conductor, d is the length of the conductor, and ρ is the resistivity of the conductor.

3.1.2. Inductance

The inductance of a transmission line depends on the material properties, the configuration of the conductors, and the relative positions of the phase conductors. The per-unit-length inductance of a three-phase overhead transmission line can be determined using Equation (3). In this equation, D represents the distance between the conductors, and D_s denotes the effective radius of the conductor (Akmaz, 2017; Leferink, 1995).

$$L = \left(0.2 \ln \frac{D}{D_s} \right) 10^{-7} \quad (2)$$

If the conductors are not arranged symmetrically, differences in inductance may arise between the phases. This imbalance is typically corrected by regularly transposing the phase conductors. In three-phase transmission lines, if the phases are not arranged in an equilateral triangle configuration and the line length exceeds 50 km, transposition is implemented to achieve electromagnetic balance. The geometric mean distance (GMD) is calculated based on the distances between the phases to account for this adjustment:

$$GMD = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ca}} \quad (3)$$

3.1.3 Capacitance

Capacitance in transmission lines refers to the ability to store electrical energy due to the potential difference between conductors. It is typically associated with the electric fields formed between the conductors along the line. In three-phase transmission lines, the capacitance has a more complex structure due to the capacitive interactions between each phase. The capacitance between conductors depends on the distance between phases, the diameter of the conductor, and the properties of the insulating material (Chen, 1960). In a three-phase overhead transmission line, capacitance can be calculated using the following formulas:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{D}{\mathcal{R}}} \quad (4)$$

Here, C represents the capacitance (F/km), ϵ_0 is the electrical permittivity of free space (8.854×10^{-12} F/m), ϵ_r is the relative permittivity of the insulating material, D is the distance between phases (m), and $\mathcal{R}$ denotes the diameter of the conductor (m).

3.2. Line Models

A power transmission line is analyzed using different models depending on its length and frequency characteristics. These models are: the short line model, the medium line model, and the long line model.

3.2.1. Short Line Model

The short line model applies to situations where the length of the transmission line is very small compared to the electrical wavelength. That is, the line length usually does not exceed a few kilometers, and therefore, the impedance and capacitance effects of the line can be neglected. In short lines, impedance is calculated by considering the total resistance (R) and inductance (L) of the line. Capacitance and the interaction between conductors are neglected in short lines.

$$Z = R + j\omega L \quad (5)$$

Here, Z represents the line impedance, and ω represents the angular frequency. In short lines, electrical losses are typically represented by resistance, and thus, capacitive interactions between phases are ignored.

3.2.2. Medium Line Model

The medium line model represents a situation where the transmission line length is several times the wavelength, making the impedance and capacitance effects more significant. This model takes into account the line length and wave propagation effects, though full wave propagation is not observed as in very long distances. These lines typically range from a few kilometers to around 100 km in length.

In the medium line model, both inductance and capacitance are taken into account. Along the line, there are both electrical losses (resistance) and reactive power effects (capacitance and inductance).

$$\begin{aligned} Z &= R + j\omega L \\ Y &= j\omega C \end{aligned} \tag{6}$$

Here, Z represents the line impedance, Y represents the line admittance, and ω represents the angular frequency. In medium lines, the voltage wave propagates over time, and the change in voltage at the end of the line slows down depending on the distance. This effect becomes more pronounced as the line length increases.

3.2.3 Long Line Model

It represents situations where the transmission line length is close to the wavelength. In long lines, wave propagation must be considered, and the full impedance, capacitance, inductance, and even higher-order interactions of the line need to be taken into account. This model is typically used for lines exceeding 100 km in length. Long lines are often analyzed using a series schematic model or a distributed parameter model. In this model, the resistance, inductance, capacitance, and conductance parameters are distributed and can be calculated at every point along the line.

$$\begin{aligned} Z &= R + j\omega L \\ Y &= j\omega C \end{aligned} \tag{7}$$

Here, Z represents the line impedance, Y represents the line admittance, G represents the conductance, and ω represents the angular frequency. In the distributed parameter model, the voltage and current relationships along the line are expressed as follows. A single-phase representation of the long line model is shown in Figure 1.

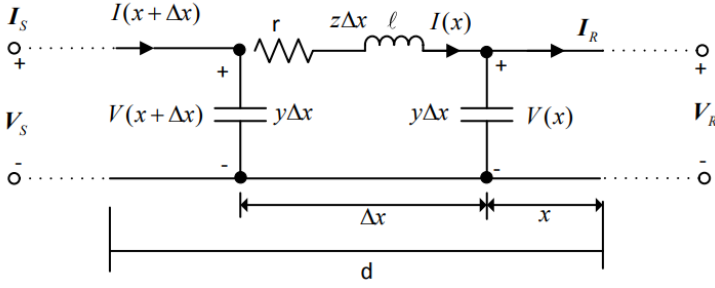


Figure 1. Distributed Long Line Model

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_0 \sinh(\gamma d) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma d) & \cosh(\gamma d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (8)$$

Here, Z_0 represents the characteristic impedance, γ represents the line propagation constant, and d represents the line length.

3.3. Transient Analysis Using ATP

The analysis of power transmission lines begins with the accurate calculation and modeling of transmission line parameters. These analyses are crucial for understanding energy losses, voltage drops, and transient behavior in the lines. Below, the line parameters and their roles in the analysis of power transmission lines are explained in detail. The simulation parameters required for conducting the analyses are provided in Table 1.

Table 1. Simulation Parameters

Parameter	Value
Line Input Impedance	L=10 mH
Line End Load	R= 100Ω and L= 50 mH
Fault Ground Resistance	R=2Ω
Number of Transpositions	Tr=3
Main Line Switching Time	t=0.009 s
Fault Switching Time	t=0.02 s
Total Simulation Time	t=0.03 s

3.3.1. ATP Line Parameter Modeling

In the ATP program, a power transmission line is modeled using either characteristic impedance parameters or the LCC line model. The LCC model provides a more detailed analysis by incorporating both the characteristics of the conductor and the parameter indices related to the supporting tower. This model offers the most accurate representation of an existing line. The LCC model parameters for a 240 km line are shown in Figure 2. The transmission line transmits energy with a total of 3 transpositions. Each LCC transfers energy sequentially in the following sections: 40-80-80-40 km.

Line/Cable Data: C:\ATP\project\lcc\LCC_feyyaz_40.alc

Model | **Data**

System type
Overhead Line #Ph: 3

☐ Transposed
☒ Auto bundling
☒ Skin effect
☐ Segmented ground
☒ Real transf. matrix

Units
☒ Metric
☐ English

Standard data
R_{lco} [ohm/m] 20
Freq. init [Hz] 0.005
Length [km] 40

Model Type
☐ Bergeron
☐ Pi
☒ JMarti
☐ Semlyen
☐ Noda

Data
Decades 7 Points/Dec 10
Freq. matrix [Hz] 1000 Freq. SS [Hz] 50
☒ Use default fitting

Comment: Order: 0 Label: ☐ Hide

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

a)

Line/Cable Data: C:\ATP\project\lcc\LCC_feyyaz_40.alc

Model | **Data**

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Rres [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.55	1.521	0.0596	-12	24	12	40	0	2
2	2	0.55	1.521	0.0596	0	24	12	40	0	2
3	3	0.55	1.521	0.0596	12	24	12	40	0	2
4	0	0.3	0.8	0.3527	-7.6	33	20	0	0	0
5	0	0.3	0.8	0.3527	7.6	33	20	0	0	0

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

b)

Figure 2. LCC Parameters of the Transmission Line. a) Conductor b) Tower

3.3.2. Lightning Parameter Modeling

In ATP, lightning impulses are typically modeled as a "resistive load" and a "lightning current source." This simulates the rapid current surge caused when lightning strikes the transmission line, generating traveling waves in the electrical conductors. The characteristics of the lightning impulse used in the simulation are presented in Figure 3.

The screenshot shows a software window titled "Component: Heidler.sup". It contains two main tables. The first table, labeled "Attributes", lists parameters and their values: Amp (60000), T_f (1.2E-6), tau (5E-5), n (2), T_{sta} (0), and T_{sto} (1). The second table, located to the right, has columns for NODE, PHASE, and NAME, with one row showing HEI, B, and X0001. Below these tables are input fields for "Order" (set to 0) and "Label". A "Comment" field is also present. Under "Type of source", the "Current" radio button is selected, while "Voltage" is unselected. There are checkboxes for "Hide" and "Lock", both of which are currently unchecked. At the bottom of the window are buttons for "OK", "Cancel", and "Help".

DATA	VALUE
Amp	60000
T _f	1.2E-6
tau	5E-5
n	2
T _{sta}	0
T _{sto}	1

NODE	PHASE	NAME
HEI	B	X0001

Order: 0 Label:

Comment:

Type of source:
☒ Current
☐ Voltage

☐ Hide
☐ Lock

OK Cancel Help

Figure 3. Characteristics of the Lightning Impulse

4. FINDINGS

In this section, the transient voltage/current signal analyses for scenarios such as no-load condition, loaded condition, fault conditions, and lightning strike on a single phase in power transmission lines (PTLs) will be examined.

4.1. Analysis of No-Load Conditions of the Line

In this section, the transient voltage/current signal analyses for scenarios such as no-load condition, loaded condition, fault conditions, and a lightning strike on a single phase in power transmission lines will be examined.

The model for the no-load condition at the end of the line is shown in Figure 4. Since there is no load at the end of the power line, transient regimes occur at both the beginning and the end of the line due to reflections. This is a common situation in power transmission lines. The opening of the switch at 0.009 seconds causes energy reflections and transient regime disturbances due to the absence of a load at the end of the line. The reflection waves at the end of the line are the primary cause of significant distortions observed in the source currents of the line.

To mitigate this issue, adding an appropriate impedance at the end of the line can help achieve a more balanced operation. The voltage and current signals for the no-load condition at the end of the line are shown in Figure 5.

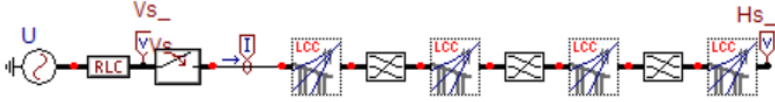


Figure 4. No-Load condition at the end of the line

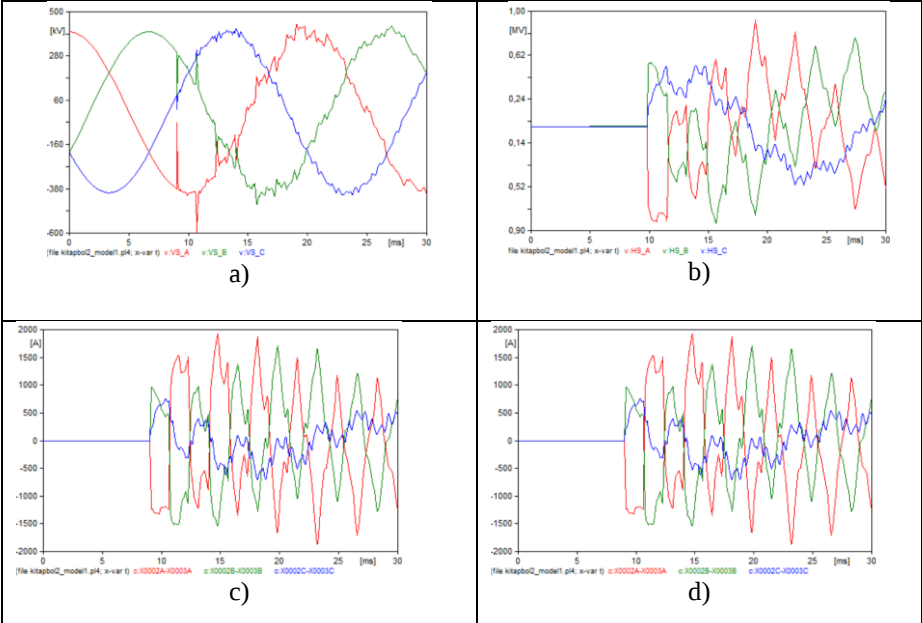


Figure 5. Transient Current and Voltage Signals for the No-Load Condition at the End of the Line: a) Voltage at the beginning of the line, b) Voltage at the end of the line, c) Current at the beginning of the line, d) Current at the end of the line

4.2. Analysis of the Condition with a Load at the End of the Line

The model for the condition with a load at the end of the line is shown in Figure 6. Since there is a load at the end of the power line, transient regimes at the beginning and end of the line damp out quickly due to the absence of significant reflections. The presence of a load at the end of the line ensures balanced operation of the system, as demonstrated by the current and voltage signals in Figure 7.

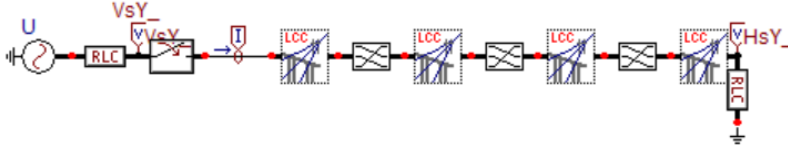


Figure 6. Condition with a load at the end of the line

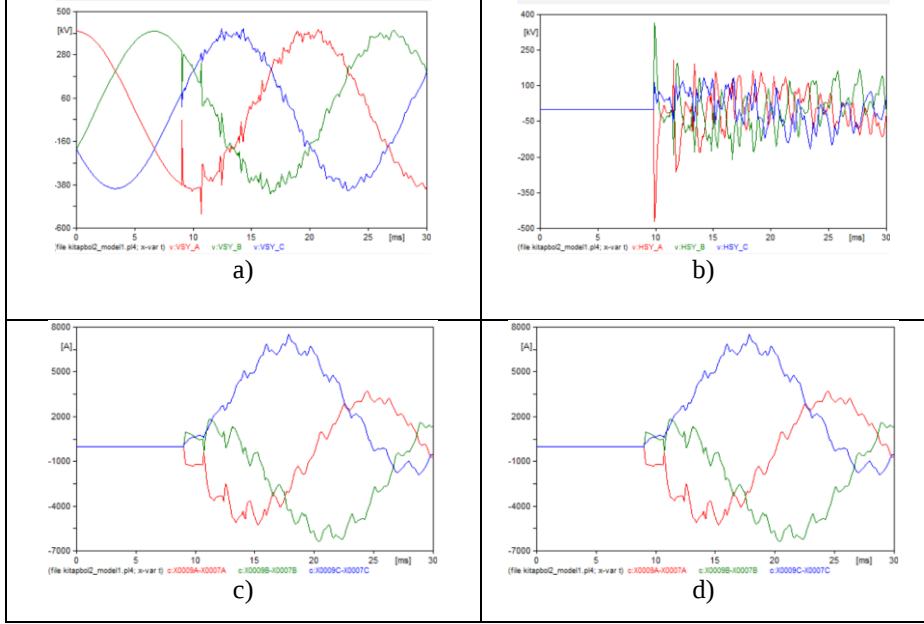


Figure 7. Transient Current and Voltage Signals for the Condition with a Load at the End of the Line: a) Voltage at the beginning of the line, b) Voltage at the end of the line, c) Current at the beginning of the line, d) Current at the end of the line.

4.3. Analysis of Faults at the Midpoint of a Symmetrical Line

Since electrical energy is transmitted over long distances, the maintenance of transmission lines is of great importance. Faults in PLTs. occur due to deformation in the structure of conductors or issues with the pole equipment responsible for energy transmission. Identifying the fault, including its type and location, is crucial for ensuring uninterrupted energy transmission.

The types of faults in power transmission lines consist of Single Phase-Ground fault, Two Phase fault, Two Phase-Ground fault, Three Phase fault, and Three Phase-Ground fault.

4.3.1 Single Phase-Ground fault

The model of the Single Phase-Ground fault occurring at the exact center of the PLTs is shown in Figure 8.

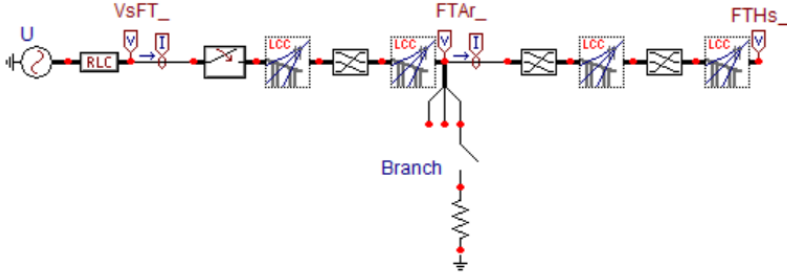


Figure 8. Condition of the Single Phase-Ground fault occurring at the center of the PLTs.

The fault occurs at $t = 0.02$ s at the exact center of the PLTs. The voltage/current transient signals related to the fault are shown in Figure 9. During the fault condition, the current at the beginning of the line rises sharply, while the current at the end of the line tends to dampen.

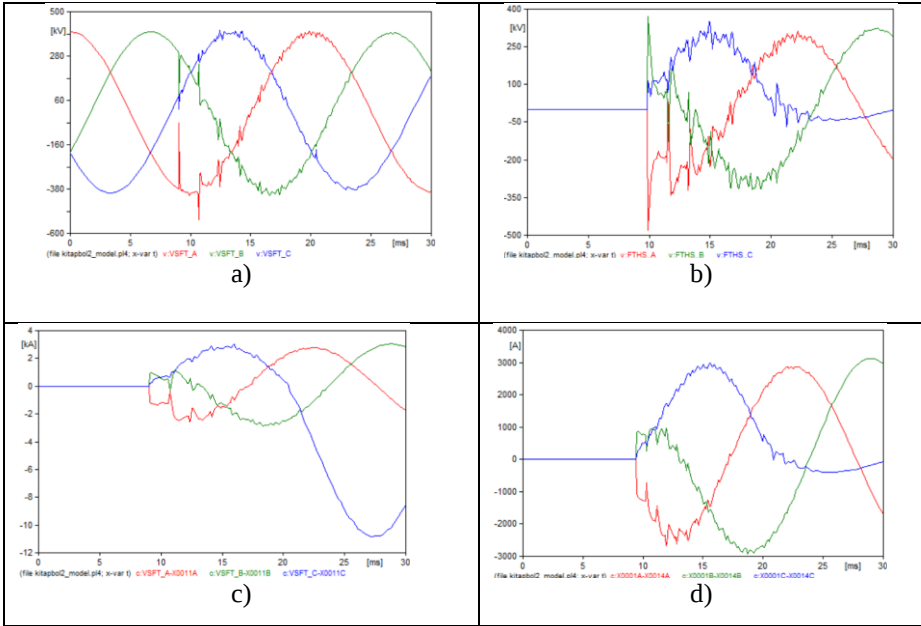


Figure 9. Transient current and voltage signals for the Single Phase-Ground fault. a) Voltage at the beginning of the line, b) Voltage at the end of the line, c) Current at the beginning of the line, d) Current at the end of the line.

4.3.2. Two Phase fault

The model of the Two Phase fault occurring at the exact center of the PLTs is shown in Figure 10.

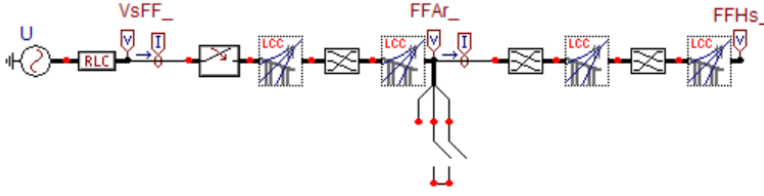


Figure 10. Condition of the Two Phase fault occurring at the center of the PLTs.

The Two Phase fault occurs at $t = 0.02$ s, precisely at the center of the PLTs. The voltage and current transient signals related to the fault are shown in Figure 11. During the fault in phases A and C, the current at the beginning of the line in both phases A and C rises sharply, while the current at the end of the line in phases A and C tends to dampen, causing overlap at that end.

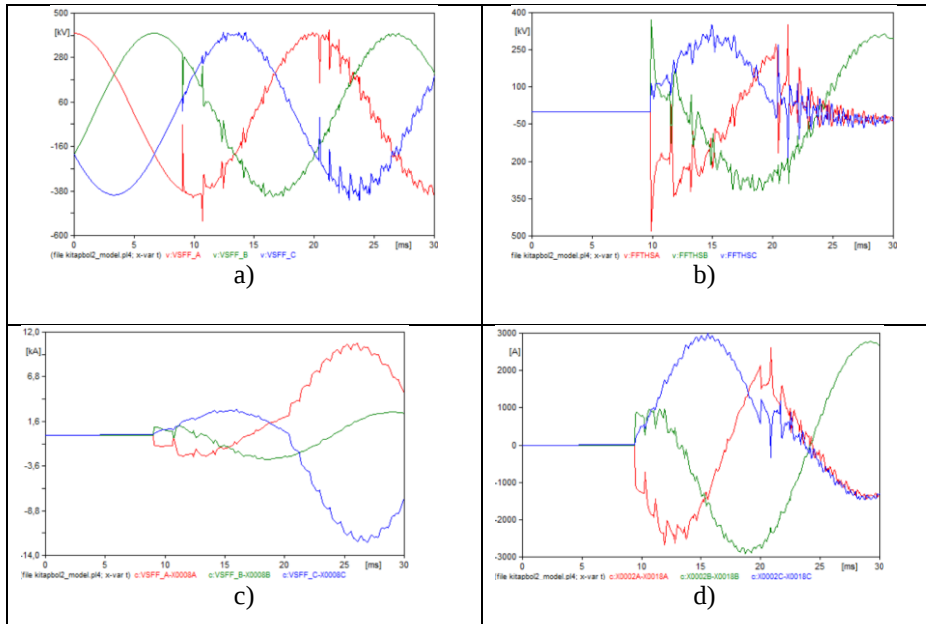


Figure 11. Transient current and voltage signals for the Two Phase fault. a) Voltage at the beginning of the line, b) Voltage at the end of the line, c) Current at the beginning of the line, d) Current at the end of the line.

4.3.3. Two Phase-Ground fault

The model of the Two Phase-Ground fault occurring at the exact center of the PLTs is shown in Figure 12.

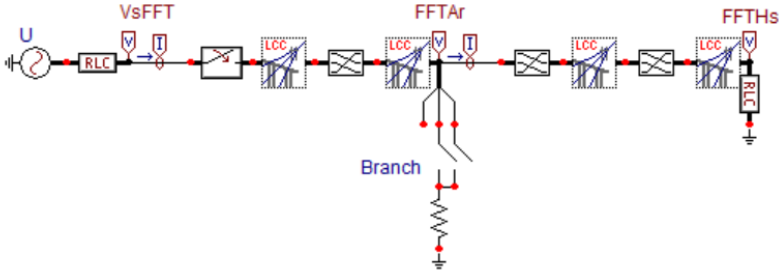


Figure 12. Condition of the Two Phase-Ground fault occurring at the center of the PLTs.

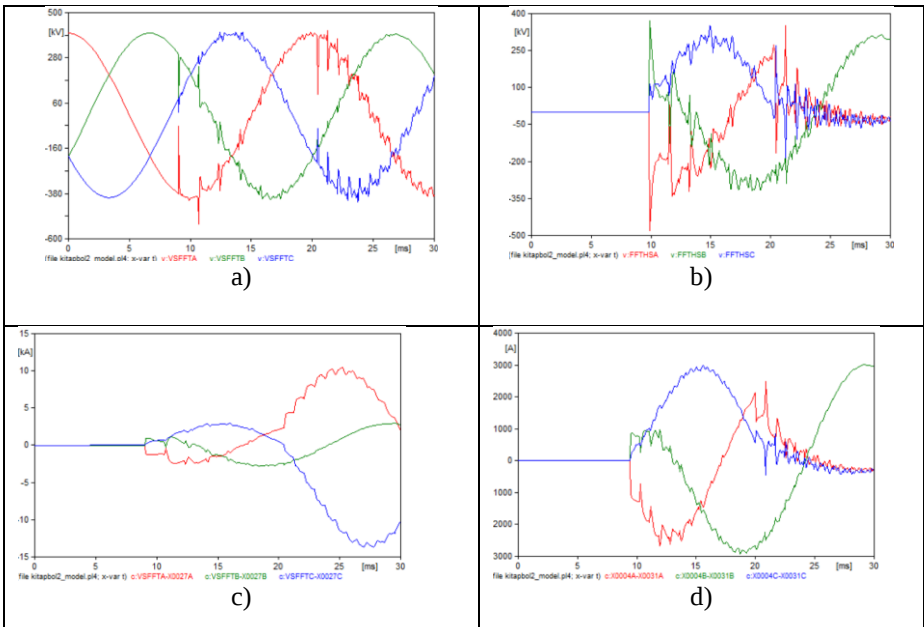
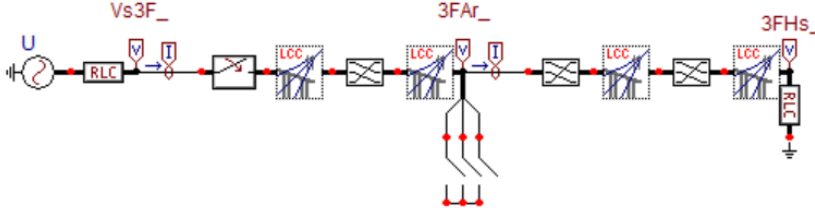


Figure 13. Transient current and voltage signals for the Two Phase-Ground fault. a) Voltage at the beginning of the line, b) Voltage at the end of the line, c) Current at the beginning of the line, d) Current at the end of the line.

The Two Phase-Ground fault occurs at $t = 0.02$ s at the exact center of the PLTs. The voltage/current transient signals related to the fault are shown in Figure 13. The waveforms of the fault between phases A-C and ground are similar to those of the Two Phase fault. However, in the Two Phase-Ground fault, the amplitudes of the waves are lower, and the harmonic frequencies they generate are also lower.

4.3.4. Three Phase fault

The model of the Three Phase fault occurring at the exact center of the PLTs is shown in Figure 14.



Figure

14. Condition of the Three Phase fault occurring at the center of the PLTs.

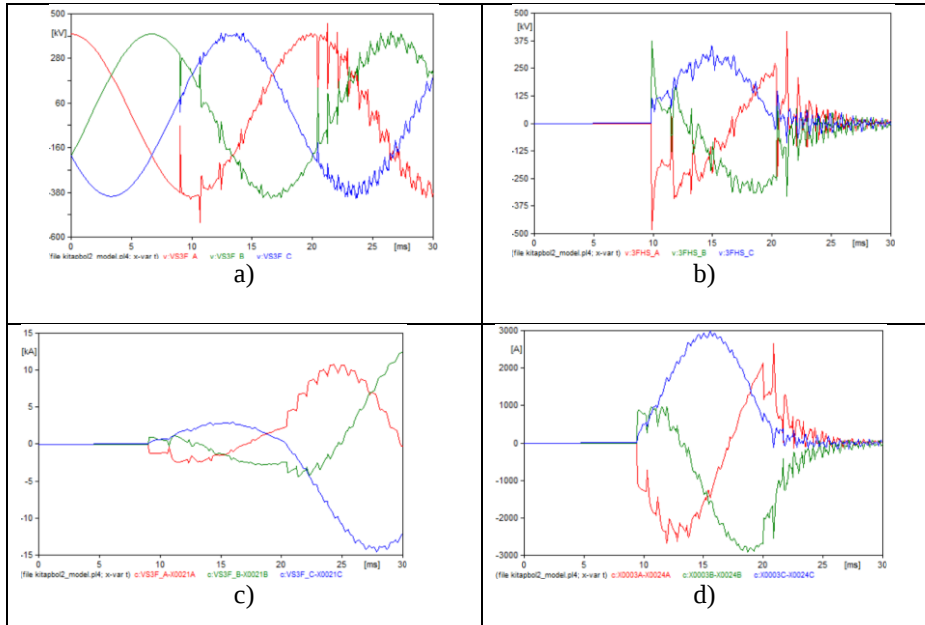


Figure 15. Transient current and voltage signals for the Three Phase fault. a) Voltage at the beginning of the line, b) Voltage at the end of the line, c) Current at the beginning of the line, d) Current at the end of the line.

The Three Phase fault occurs at $t = 0.02$ s at the exact center of the PLTs. The voltage/current transient signals related to the fault are shown in Figure 15. The fault generates excessive harmonics at the beginning of the line, while at the end of the line, the currents overlap and tend to dampen. The currents at the beginning of the line become highly unbalanced, whereas the currents at the end of the line, similar to the voltage, tend to combine and dampen.

4.3.5. Three Phase-Ground fault

The model of the Three Phase-Ground fault occurring at the exact center of the PLTs is shown in Figure 16.

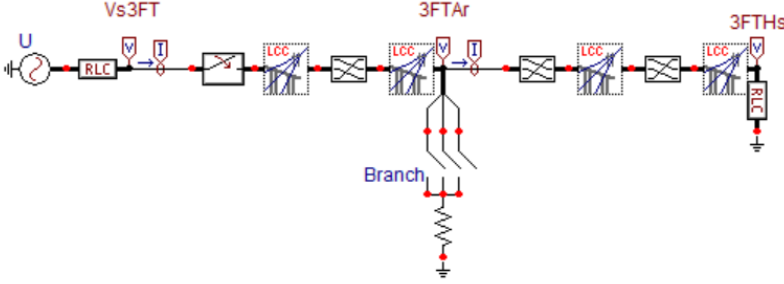


Figure 16. Condition of the Three Phase-Ground fault occurring at the center of the PLTs.

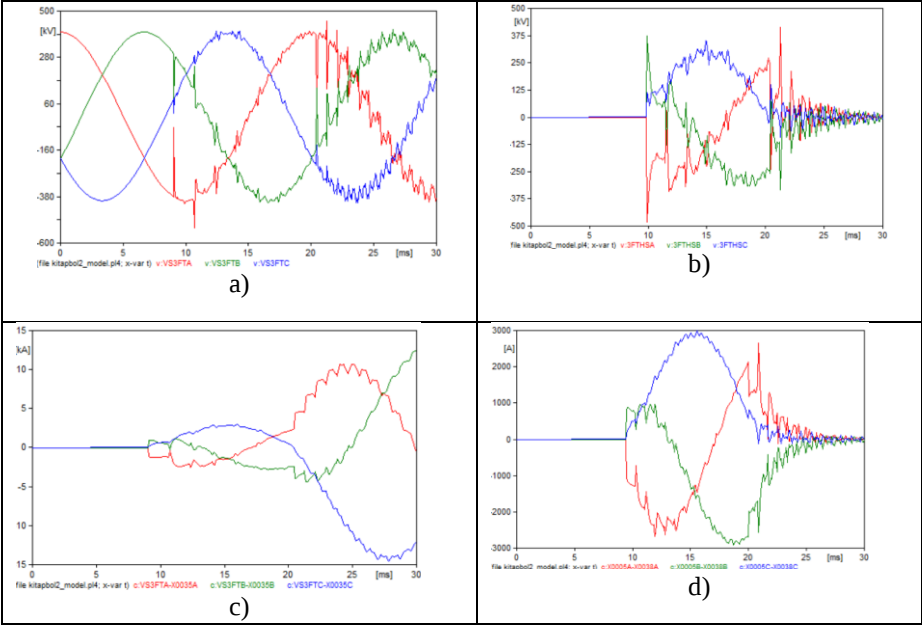


Figure 17. Transient current and voltage signals for the Three Phase-Ground fault. a) Voltage at the beginning of the line, b) Voltage at the end of the line, c) Current at the beginning of the line, d) Current at the end of the line.

The Three Phase fault occurs at $t = 0.02$ s at the exact center of the PLTs. The voltage/current transient signals related to the fault are shown in Figure 17. The fault generates excessive harmonics at the beginning of the line, while at the end of the line, the currents overlap and tend to dampen. The currents at the beginning of the line become highly unbalanced, whereas the currents at the end of the line, similar to the voltage, tend to combine and dampen. This fault type resembles the

waveforms of the Three Phase fault, but it differs in terms of the harmonics and amplitude values generated.

4.4. Investigation of Lightning Strike Events on the Transmission Line

The model of the lightning fault on phase B occurring at the exact center of the PLTs is shown in Figure 18.

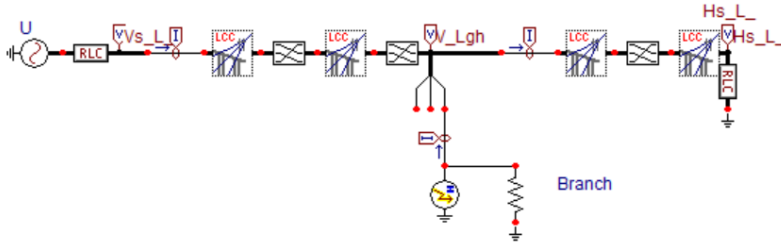


Figure 18. Condition of the lightning fault on phase B occurring at the center of the PLTs.

The transient regime effects following the lightning strike on phase B at the center of the PLTs are detailed in Figure 19. Although the lightning consists of a single strike, it generates high-amplitude harmonics at both the beginning and the end of the line. These high-amplitude harmonics gradually dampen over time. Despite the lightning strike occurring at the exact center of the line, the current at the end of the line remains high. The primary reason for this is wave reflection and impedance mismatch. The lightning strike at the center of the line causes wave propagation in both directions. The wave reaching the end of the line can grow due to reflection and superposition effects, which are typically influenced by the line's terminal load (such as an open circuit or a low-impedance load).

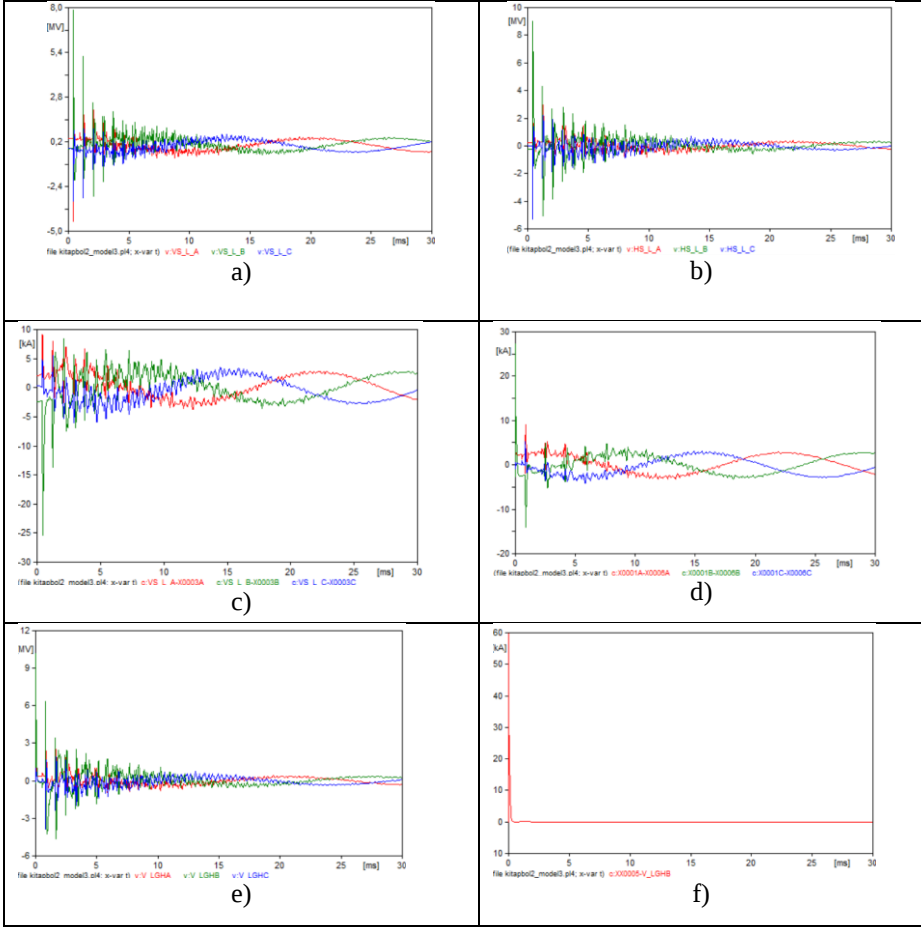


Figure 19. Transient current and voltage signals for the lightning strike on phase B occurring at the center of the PLTs. a) Voltage at the beginning of the line, b) Voltage at the end of the line, c) Current at the beginning of the line, d) Current at the end of the line, e) Voltage at the fault point, f) Current at the fault point.

5. CONCLUSION

This study has thoroughly examined the transient behavior of various fault conditions and lightning strikes occurring in power transmission lines. The findings provide a comprehensive understanding of the effects of fault types and the line's terminal condition (load or no load) on transient regime signals. Critical elements such as current and voltage variations along the line, fault points, wave reflection effects, and impedance mismatches have been analyzed. The simulations conducted during the research have once again validated the detailed and reliable results provided by ATP software for transient regime analysis in power transmission lines. It was observed that in cases where there is no load at the end of the line, wave reflections are more pronounced, and transient regimes persist

for longer periods. In contrast, the presence of a load at the end of the line contributes to faster damping of reflections and transient regimes. In the analysis of fault types, the transient regime signals for conditions such as single-phase-ground, two-phase, two-phase-ground, three-phase, and three-phase-ground faults were clearly distinguished. For instance, in faults involving ground connections, the amplitude and frequency of harmonic components exhibit significant differences. It was observed that three-phase faults create more complex effects in the system with higher harmonic content and amplitude. In the analysis of lightning strikes, it was found that a lightning strike occurring at the center of the line increases the current and voltage values at the end of the line. This was linked to wave reflections and impedance mismatches. The effects of high-amplitude harmonics generated by lightning gradually dampen over time, but they induce temporary imbalances in the system during the process.

In conclusion, this study provides valuable insights into the better understanding of faults and lightning impacts in power transmission lines. It offers critical information for managing the effects of such events and enhancing system stability. The findings will be beneficial in the design, maintenance, and fault management processes of power transmission lines. The detailed analysis capacity offered by ATP software will serve as a foundation for such simulations and future research.

REFERENCES

- Akmaz, D. (2017). İletim Hatlarında Arıza Yeri ve Türünün Geçici Rejim Sinyalleri ve Makine Öğrenme Algoritmaları ile Belirlenmesi (Doktora Tezi). İnönü Üniversitesi.
- Alpsalaz, F., Yalçınöz, Z., Kaygusuz, A., & Mamiş, M. S. (2024). Fault Location Prediction in Power Transmission Lines Using an Artificial Neural Network Model. *2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IDAP64064.2024.10710637>
- Çakıl T., Carlak H. F., Ö. Ş. (2015). Yüksek Gerilim Güç Hatlarının Matlab/Simulink ile Modellenmesi: Kısa Devre ve Hata Analizi. *IV. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi*, 52–62.
- Chen, T. S. (1960). Determination of the Capacitance, Inductance, and Characteristic Impedance of Rectangular Lines. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *MTT-8*(5), 510–519. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1960.1124779>
- Colqui, J. S. L., Eraso, L. C. T., Caballero, P. T., Filho, J. P., & Kurokawa, S. (2022). Implementation of Modal Domain Transmission Line Models in the ATP Software. *IEEE Access*, *10*, 15924–15934. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146880>
- Du, Y., & Liao, Y. (2012). On-line estimation of transmission line parameters, temperature and sag using PMU measurements. *Electric Power Systems Research*, *93*, 39–45. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2012.07.007>
- Ertugrul, Ö. F., & Kurt, M. B. (2011). ENERJİ İLETİM HATLARINDA MODÜLER YSA VE ADD YLE HIZLI ARIZA TESPİTİ. *Engineering Sciences*, *6*(1), 77–87. <https://doi.org/10.12739/NWSAES.V6I1.5000067010>
- Fekete, K., Nikolovski, S., Knezević, G., Stojkov, M., & Kovač, Z. (2010). Simulation of lightning transients on 110 kV overhead-cable transmission line using ATP-EMTP. *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELCON*, 856–861. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2010.5475950>
- Leferink, F. B. J. (1995). Inductance calculations; methods and equations. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 16–22. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.1995.523511>
- Tağluk, M. E., Mamiş, M. S., Arkan, M., & Ertuğrul, Ö. F. (2015). Detecting fault type and fault location in power transmission lines by extreme learning machines. *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2015 - Proceedings*, 1090–1093. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/SIU.2015.7130024>



BÖLÜM 4

Comparison of Design and Simulation Results of Distribution Transformer in Ansys Maxwell

Feyyaz Alpsalaz¹

¹ Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-7695-6426

1. INTRODUCTION

Transformers are critical for the efficient transmission and distribution of electrical energy. In electrical power systems, the need to convert voltage levels arises during the transmission of energy. This conversion is performed by transformers. The design and optimization of transformers present significant engineering challenges, as these devices are complex structures that combine electrical, magnetic, and thermal systems. Properly designing transformers is essential for both energy efficiency and the long-term reliability of the device.

Transformers play a crucial role in the transmission of electrical energy and its distribution to end users. Due to their continuous operation, these devices cause losses even when no load is applied. This makes the accurate and thorough design of transformers crucial, not only to enhance the reliability of the system but also to minimize energy losses. A well-designed transformer ensures that the power system operates efficiently and reliably, contributing to the overall performance of the electrical grid. (Alpsalaz & Mamiş, 2023). Innovations and changes in transformer design are typically high-cost and time-consuming processes. In this context, advanced engineering software such as ANSYS offers significant advantages in evaluating the expected performance of transformers and analyzing losses. In particular, the simulations provided by the ANSYS program allow for results that are very close to real-world conditions, leading to time and cost savings during the physical prototype development phase. Therefore, computer-based simulation methods have become an indispensable tool in modern transformer design, enabling more efficient and accurate optimization of transformer performance while reducing the need for physical testing. (Özüpak & Mamiş, 2019).

Literature reviews reveal that transformer design and related studies using the ANSYS environment have been extensively documented. Özüpak (2021) conducted the design, modeling, and loss analysis of a three-phase core-type transformer using ANSYS@Maxwell software. Through these Finite Element Method (FEM)-based analyses, core losses, leakage losses, DC losses, and winding eddy current losses were examined in detail. The study demonstrates that ANSYS@Maxwell is an effective tool for evaluating and optimizing transformer performance. (Özüpak, 2021). Selim (2023), developed a method to model and analyse the vector group connections of three-phase transformers. The method identifies the connections of low-voltage (LV) and high-voltage (HV) windings by inference over a clock diagram representing phase shifts. Using ANSYS Maxwell software, three-dimensional models of different vector group connections are created and the effect of these connections on the transformer perfor-

mance is analysed. In the study, how the winding direction affects the vector groups and the phase angles between high and low voltage lines are discussed. The results obtained show the critical role of vector group connections in the parallel operation of transformers (Selim, 2023). Abbaszadeh and Saffar (2016) analysed the electromagnetic forces of oval wound distribution transformers and compared them with cylindrical wound transformers. Oval transformers offer lower power loss due to reduced iron and copper consumption, while electromagnetic forces are also reduced. 200 kVA capacity oval and cylindrical transformers are investigated under normal and three phase short circuit conditions and analyses are carried out by Finite Element Method (FEM) in Maxwell software. (Abbaszadeh & Saffar, 2016). Giri et al. (2022) aimed to design, simulate, and analyze a medium-frequency transformer using ANSYS Maxwell software. The software provides solutions for various problems such as electrical, magnetic static, and transient analysis using Finite Element Analysis (FEA). At medium frequencies, the primary voltage was successfully reduced. In ANSYS Maxwell, a model of a medium-frequency transformer was created, and various transformer characteristics were examined. The input voltage, induced voltage, current, magnetic flux links, and losses in the core and windings were analyzed graphically. The results showed that voltage loss decreased within the medium-frequency range (Giri, Darnal, Kumar, & Singh, 2023). Alpsalaz and Mamiş (2024) detected arc faults in the transformer using terminal current and voltage signals. In ANSYS@Maxwell, a 3D magnetic model of a 15 MVA transformer was created, and a nonlinear arc model was simulated in the Matlab@Simulink environment. Transient voltage and current signals related to arc conditions at five different points on the high-voltage side windings were obtained by simultaneously running ANSYS and Matlab, using ANSYS@Simplorer (Twin Builder). These signals were transformed into the frequency domain using Fast Fourier Transform (FFT). Arcs were detected from the frequency components generated by the transient voltage and current signals of the transformer (Alpsalaz & Mamiş, 2024). Çetinceviz and Sehirli (2024) designed a dry-type transformer for a wind turbine with a rating of 3.8 MVA, 690 V/36 kV power and voltage. Dry-type transformers require more design effort than oil-type transformers due to limited air cooling and other challenges. The design and thermal behavior of the transformer were analyzed through co-simulation using ANSYS Maxwell 3D, Simplorer, and Mechanical software. Core losses, winding voltages, and harmonic spectra were examined under different load conditions, and it was concluded that the design performed as expected (Çetinceviz & Sehirli, 2024). Rodriguez et al. (2021) presented comparable results obtained using ANSYS Maxwell and COMSOL software. The analyses showed that the inductance calculations for simplified

windings and ferromagnetic cores in air environments made using ANSYS and COMSOL were in agreement with previous literature. Additionally, the methodologies employed by both ANSYS and COMSOL were introduced, and the results obtained from the full transformer model developed based on magnetic field analyses were presented. The study also examined electrostatic field enhancements, particularly in areas near the ends of the secondary, primary, or tertiary windings, where high potential differences were observed, assessing the likelihood of electrical faults at these points. These findings provide significant insights into where electrical faults may occur (Rodríguez, Tran, & Niederhaus, 2023). Ilka et al. (2022) conducted multi-physics modeling and simulations aimed at predicting the reliability of large power transformers, based on three-dimensional (3D) Finite Element Analysis (FEA) and Finite Volume Method (FVM). Initially, using ANSYS Maxwell software, the transformer winding losses were calculated through FEA electromagnetic modeling and simulation. Subsequently, a thermal model was created in ANSYS Fluent, determining the temperature distribution, particularly the winding hot spot temperature (HST). Based on this, an aging acceleration factor was calculated using the winding HST values. Additionally, a sensitivity analysis was performed to assess the effects of oil properties on the temperature distribution and HST. (Ilka, He, Yin, Contreras, & Cavazos, 2022).

Literature reviews indicate that numerous studies have been conducted using models created with ANSYS software for transformers, and the results obtained provide significantly positive information regarding their reliability. In this study, the design and rated values of the transformer were predetermined, and accuracy tests were performed based on this data during the modeling process. The simulations focused on the losses and magnetic characteristics of the transformer, and the resulting simulation data were then compared with actual factory data.

This study involves the modeling and analysis of a 2 MVA distribution transformer using the Finite Element Method (FEM) in the ANSYS@Maxwell environment. The transformer's design and rated values were predetermined, and accuracy tests were performed based on this data during the modeling process. The simulations focused on the transformer's losses and magnetic characteristics, and the simulation results were then compared with actual factory data. In the first step, the geometric structure of the transformer was created in the ANSYS Maxwell environment. All components, including the primary and secondary windings, core material, and insulation structures, were accurately modeled and prepared for finite element analysis. The design used critical information such as the transformer's rated power of 2 MVA, primary and secondary voltage levels,

current, and magnetic parameters. During the modeling phase, the electromagnetic analysis modules of ANSYS Maxwell were used to study the transformer's magnetic fields in detail. These simulations were conducted to calculate magnetic field density, flux distribution, and core losses. Specifically, hysteresis losses on the core and losses caused by eddy currents were examined. These losses are crucial factors that directly affect the transformer's efficiency and thermal performance. The results provided valuable data on parameters that could be used to optimize the transformer's energy loss and efficiency.

2. MATERIALS AND METHODS

Maxwell software allows the creation of 2D and 3D models of transformers in the ANSYS environment based on FEM (Finite Element Method). This commercial software provides important information by delivering fast and relatively reliable results on various transient and steady-state conditions such as electromagnetic flux densities, electromagnetic flux distributions, core losses, thermal analyses, leakage currents, radial and axial forces, and harmonic calculations. The program helps solve the problem by automatically generating an accurate, efficient, and suitable mesh structure for all components of the geometry to be analyzed.

2.1. The use of the FEM in electromagnetic solutions

FEM is a powerful numerical analysis method commonly used to solve electromagnetic field problems. These types of problems are typically solved by expressing Maxwell's equations in different forms during FEM analysis (Gedney, 2003). It is common to express the magnetic field using the vector potential $\vec{A}$:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (1)$$

By combining Faraday's law and Ampere's law, the following equation is obtained:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (2)$$

This expression is a commonly used magnetic formulation for FEM. The Scalar Potential ϕ formulation for the electric field is given by:

$$\vec{E} = -\nabla \phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3)$$

Here, ϕ is the scalar electric potential. For electromagnetic problems, both $\vec{A}$ (vector potential) and ϕ (scalar potential) can be solved together. The solution can be directly performed using the electric field $\vec{E}$ as follows:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{J} \quad (4)$$

This formulation used for FEM (Finite Element Method) is suitable for time-varying electric fields. The basic principle of FEM is to divide a continuous field into small, manageable finite elements, which simplifies the solution process. By discretizing the problem domain into smaller elements, FEM makes it possible to approximate complex electromagnetic problems and solve them with greater ease and efficiency.

2.2. Simulation Parameters

The rated information for the 2 MVA distribution transformer to be used in the study is provided in Table 1. Using the transformer label information, a model transformer has been created in the ANSYS@Maxwell environment. The ANSYS@Maxwell model of the transformer is shown in Figure 1.

Table 1. Transformer Label Information

Özellikler	Değeri
Transformer Power	2 MVA
HV/LV Voltages	33 000 / 400 V
HV/LV Connection	Δ / Y
HV/LV Number of Windings	1715 / 11
HV/LV Winding Resistances	0.5 / 0.13 m Ω
HV/LV Core Length	760 mm
Frequency	50 Hz
Short Circuit Voltage Percentage	%6
Copper Loss	16 500 W
Iron Loss	1670 W
Core Material	M80_023

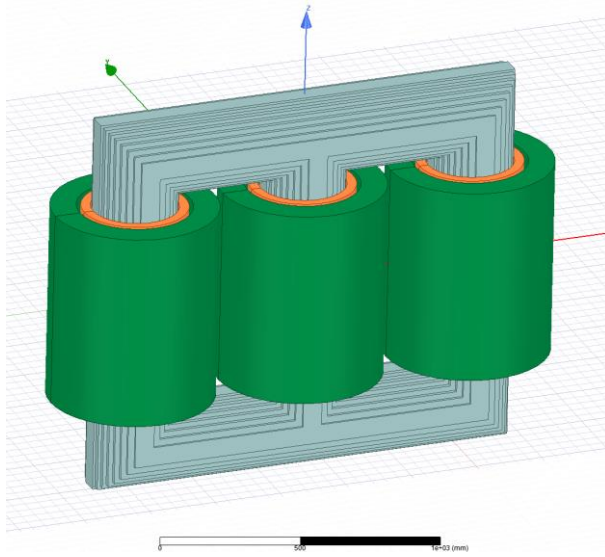


Figure 1. ANSYS Model of the Transformer

The windings of the modeled 2 MVA transformer have High Voltage / Low Voltage (HV/LV) connections in a Δ / Y configuration. The winding ratios for the connections have been set in the ANSYS program with 1715 turns for HV and 11 turns for LV. The connection structure of the windings in the ANSYS program is shown in Figure 2.

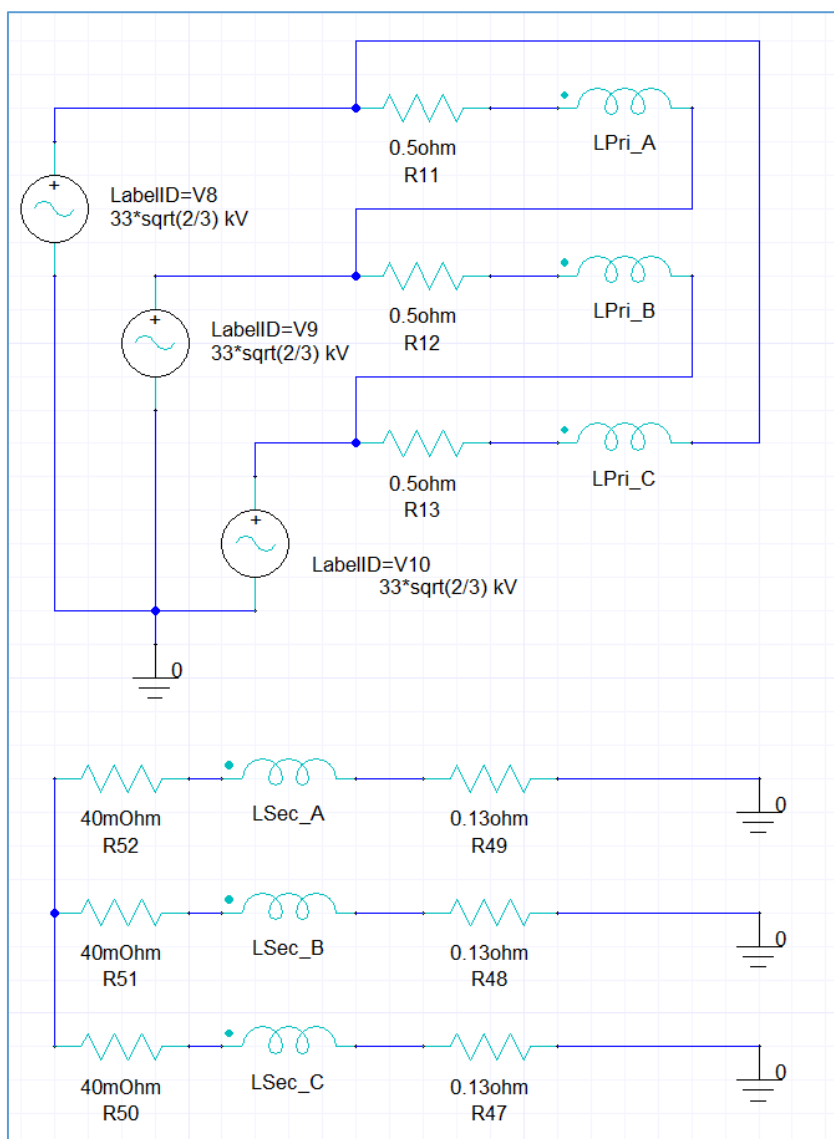


Figure 2. Winding Connection Structure in ANSYS@Maxwell Environment

Since the core material of the transformer is M80_023, the information package for this material is not available in the ANSYS@Maxwell library. For the material information in this library, data on the B-H and B-P curves is required. Here, H represents the magnetic field strength, and B represents the magnetic flux density. The B-H curve of the material is shown in Figure 3. The B-P curve is crucial for modeling losses and conducting magnetic calculations. The Kh material lamination of the core is 20.44 W/m³, the Kc material lamination is 0.4350

W/m³, the core material thickness is 0.23 mm, and the core material conductivity is 5,000,000 S/m. The B-P curve of the core and additional data are presented in Figure 4.

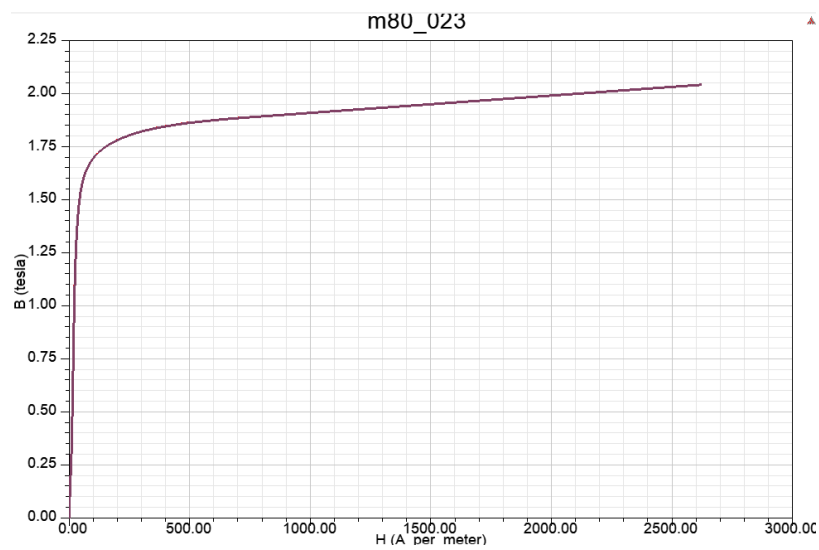


Figure 3. B-H curve for the core material

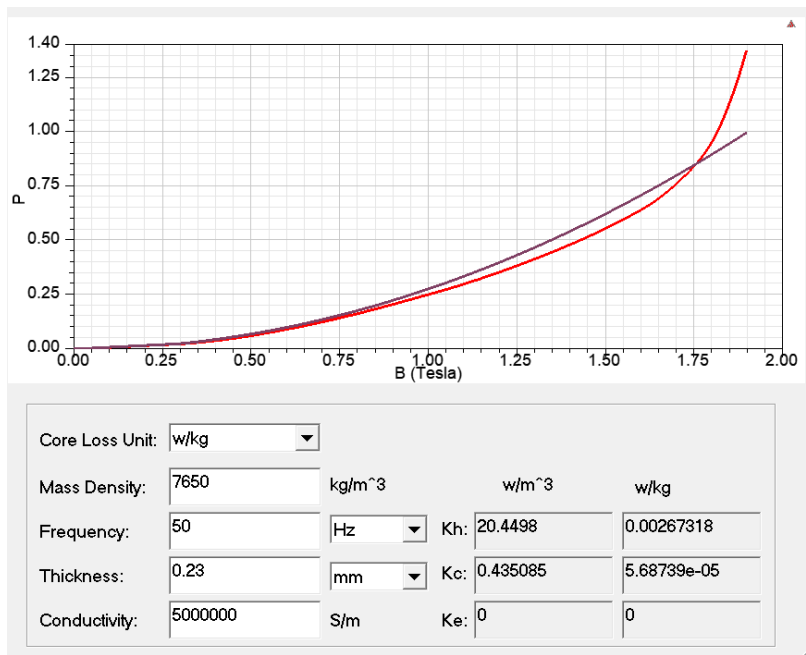


Figure 4. B-P curve for the core material

3. FINDINGS

The total simulation time for the transformer modeled in the ANSYS@Maxwell environment is set to $t = 0.1$ s. Additionally, to monitor the magnetic and electrical transient states, the working sampling interval is set to 0.25 ms. The magnetic flux density distribution for the transformer's core at $t = 0.095$ s is shown in Figure 5.

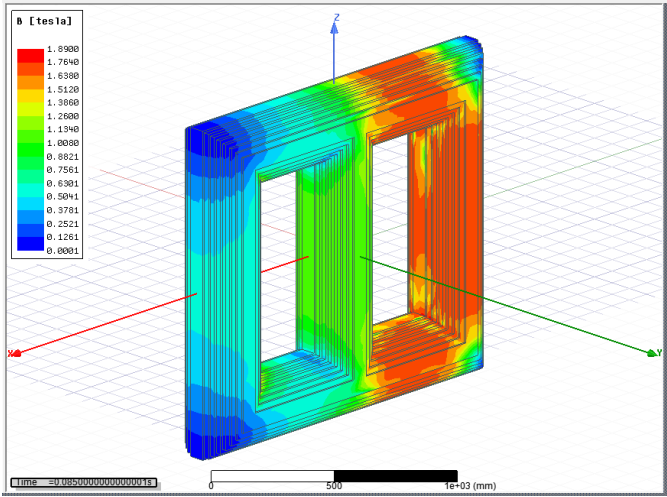


Figure 5. Magnetic flux density distribution of the transformer's core ($t = 0.095$ s).

The color scale for the magnetic flux density distribution is represented in blue tones for low or very low values, and in red tones for high or very high values. The maximum magnetic flux density is determined as $B = 1.89$ T.

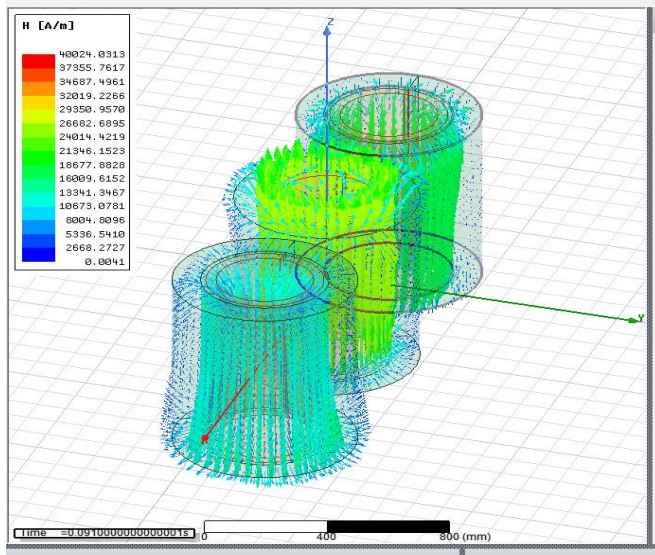


Figure 6. Magnetic field intensity vectors ($t = 0.091$ s)

The magnetic field intensity vectors of the transformer windings are shown in Figure 7. This distribution represents the magnetic field intensity (H) in the transformer's magnetic circuit. The color scale indicates the magnitude of the magnetic field intensity, with values at the bottom (e.g., 48024.0313 A/m) representing the magnitude of the magnetic field in specific regions. The arrows in the visual represent the vectors of the magnetic field direction. The regions with the most intense magnetic fields are marked in red, which typically correspond to the locations of the windings. Green and blue tones represent areas where the magnetic field intensity decreases. Understanding the effects of the magnetic field in transformer design is essential for calculating losses and optimizing the design.

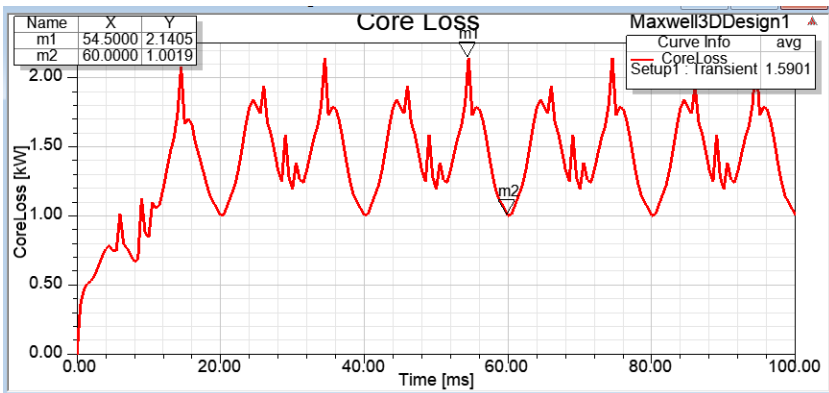


Figure 7. Core losses of the transformer

The core losses of the transformer core are shown in Figure 7. As a result of the analysis, the average core losses for the core were determined to be 1.59 kW. After the transformer has recovered from the transient effects of the startup (after 10 ms), the lowest core loss is 1 kW, while the highest core loss reaches 2.1 kW. The average value for core loss is taken as either a full-cycle period or multiples of a full cycle throughout the simulation.

Table 2. Comparison of the transformer’s label, calculation, and simulation results

Features	Label Data	Calculation Data	Simulation Results
Secondary Line Voltage	400 V	397 V	393 V
Core Losses	1670 W	1580 W	1590 W
Copper Losses	16 500 W	15 814 W	15 924 W
Maximum Core Losses	1.89 T	1.89 T	1.89 T
Uk	6%	5.48 %	5.84 %

The label, calculation, and simulation results for the transformer are presented in Table 2. When evaluating the table results, it was observed that the secondary line voltage showed small differences between the nominal value of 400 V, the calculation result (397 V), and the simulation result (393 V), with the simulation result deviating more from the nominal value. For core losses, the nominal value is 1670 W, while the calculation data shows 1580 W and the simulation data shows 1590 W, indicating a reduction of approximately 5-6% in core losses when compared to the nominal value. In copper losses, the nominal value is 16,500 W, whereas the calculation result is 15,814 W and the simulation result is 15,924 W, both showing a decrease of about 3.5% from the nominal value. The maximum core flux density (Bmax) remained consistent at 1.89 T in all three cases, indicating that the design is consistent in this parameter. Regarding the short-circuit voltage percentage, the nominal value is 6%, while the calculation result is 5.48% and the simulation result is 5.84%, suggesting that the short-circuit index on the label should be revised. Overall, the calculation and simulation results are found to be in good agreement with each other.

4.CONCLUSION

In this study, the design and performance of a 2 MVA distribution transformer were investigated using SEY-based analyses in the ANSYS@Maxwell environment. The results obtained show that the transformer's electromagnetic and thermal parameters are in alignment with the nominal values, but certain deviations highlight areas for potential improvements in the design. The results indicate that the calculation and simulation values are generally consistent with the nominal label data, but some deviations suggest opportunities for design optimization.

The reductions in core and copper losses emphasize the accuracy of the model for a more efficient design, while the differences in short-circuit voltage point to the need for a revision of the label values. The consistency of the magnetic flux density and other electromagnetic parameters throughout the simulation supports the reliability of the model. These results demonstrate the power of SEY in electromagnetic analyses and confirm that ANSYS@Maxwell provides detailed and accurate design capabilities. The study provides insights for future research aimed at reducing losses and optimizing performance in transformer design.

References

- Abbaszadeh, K., & Saffar, F. (2016). Numerical Modeling And Analysis Electromagnetic Forces In Oval Type Distribution Transformer. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 13(1), 123–134. Tarihinde adresinden erişildi <http://jiaeee.com/article-1-85-en.html>
- Alpsalaz, F., & Mamiş, M. S. (2023). Using Ansys 3D Electromagnetic Analysis for Investigation the Effect of Harmonics on Power Transformers. *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1(2), 89–93. Tarihinde adresinden erişildi <https://dergipark.org.tr/en/pub/cumfad/issue/82420/1378805>
- Alpsalaz, F., & Mamiş, M. S. (2024). Detection of Arc Faults in Transformer Windings via Transient Signal Analysis. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 9335, 14(20), 9335. <https://doi.org/10.3390/APP14209335>
- Cetinceviz, Y., & Sehirli, E. (2024). Design and numerical analysis of thermal capability of power transformer using coupled electromagnetic field-thermal model. *Electrical Engineering*, 106(4), 4821–4834. <https://doi.org/10.1007/S00202-024-02271-5/FIGURES/18>
- Gedney, S. (2003). The finite element method in electromagnetics [Book Review]. İçinde *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (3. baskı, C. 36). Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/map.1994.1068064>
- Giri, A., Darnal, R., Kumar, R., & Singh, A. K. (2023). Design and Simulation of Medium-Frequency Transformer in Ansys Maxwell Software. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1037 LNEE, 491–500. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1983-3_45
- Ilka, R., He, J. B., Yin, W., Contreras, J. E., & Cavazos, C. G. (2022). Multi-Physics Modeling and Simulation of Oil-Immersed Power Transformers Based on 3D Finite Element Analysis and Finite Volume Method. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2022-October. <https://doi.org/10.1109/IAS54023.2022.9939992>
- Özüpak, Y. (2021). Performing Structural Design and Modeling of Transformers Using ANSYS Maxwell. *J. Brill. Eng*, 2(1), 38–42.
- Özüpak, Y., & Mamiş, M. S. (2019). Realization of electromagnetic flux and thermal analyses of transformers by finite element method. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 14(10), 1478–1484. <https://doi.org/10.1002/TEE.22966>
- Rodríguez, A. E., Tran, C., & Niederhaus, J. H. J. (2023). Transformer Analysis with ANSYS Maxwell and COMSOL. *Journal of Department of Energy Office of Scientific and Technical Information*. <https://doi.org/10.2172/2432234>
- Selim, S. A. A. (2023). Developed Method and Modelling of Three-phase Transformer Vector Groups Using ANSYS Maxwell. *Port-Said Engineering Research Journal*, 27(3), 112–117. <https://doi.org/10.21608/PSERJ.2023.222670.1250>



BÖLÜM 5

Depremlerde İHA Kullanımı

Mehmet Dursun¹ & Taner Dindar²

¹ Dr. Öğr. Üyesi Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik Elektronik Bölümü, ORCID: 0000-0002-0558-6309

² Öğretim Görevlisi Ankara Üniversitesi, Nallıhan Meslek Yüksek Okulu, Elektronik Otomasyon Bölümü
ORCID NO: 0000-0002-4112-2114

GİRİŞ

Drone olarak da bilinen insansız hava araçları (İHA) üzerinde bir pilot bulunmadan çeşitli kablosuz haberleşme sistemleri yardımıyla kontrol ve kumanda edilebilen hava araçlarıdır. İHA' lar askeri alanlardaki ihtiyaçlar dikkate alınarak üretilmiş, bu alandaki kullanıma bağlı olarak teknolojik yenilikler ile gelişim göstermişlerdir. Bununla birlikte üretimin artması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ile son zamanlarda özellikle sivil alanda da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde modern yaşamın bir parçası haline gelen İHA' lar lojistikten tarıma, haberleşmeden sağlık alanına, yangın söndürmeden haritalamaya, hava ölçümünden trafik kontrolüne, jeolojik araştırmalardan denizciliğe kadar birçok sivil alanda kullanılmaya başlanmıştır.

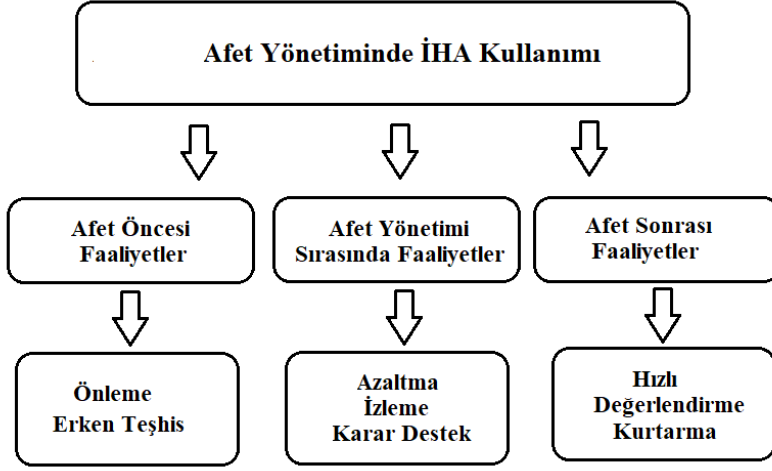
İHA' ların sivil alandaki kullanımları içerisinde insan hayatı açısından en değerli alanlardan biri ve gün geçtikçe yaygınlaşan bir kullanım alanı olarak afetler söylenebilir. Bu araçlar afet yönetiminde, afetin izlenmesi ve takibi, kurtarma operasyonları, görüntüleme, haberleşme iletişim noktası oluşturma, yangın söndürme gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir.

İHA' lar özellikle boyutları, manevra kabiliyetleri, taşınabilir olmaları, düşük üretim ve işletme maliyetleri açısından afet yönetimi ve operasyonel görevlerde oldukça yoğun bir ilgi görmektedir.

Afetler kimi zaman insanoğlunun ihmali ile kendi elleriyle kimi zaman doğal yaşamın bir parçası olarak karşımıza çıkar. Deprem, tsunami, sel, fırtına, kazalar, patlamalar, yangınlar olarak kendini gösteren afetler bazen küçük bir alanı bazen bir şehri hatta bölgeyi içine alarak büyük hasara ve yıkıma, hatta can kayıplarına sebep olurlar.

Afetin sebebi her ne olursa olsun olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi birincil hedeftir. Bu aşamada hızlı tespit ve refleksler göstererek sorunun üstesinden gelinmesi son derece önemlidir. İHA' lar bu kapsamda hizmet ederek müdahalenin yerinde ve zamanında yapılabilmesine yardımcı olmaktadır.

Afetlerde İHA' ların kullanımı afet oluşmadan afeti önleyici, afet anında afet etkisini azaltıcı ve afetten sonra ise müdahale ve olumsuz sonuçları en aza indirme konusunda farklı zaman dilimleri için planlanabilir. Bu süreç felaketin türüne ve büyüklüğüne göre bazen her bir safhayı bazen de tek bir safhayı etkileyebilecek şekilde gelişir. Şekil 1.'de bu süreç gösterilmiştir.



Şekil 1. Afet Oluşumu Zaman Ölçeğinde İHA aktiviteleri [1]

Örneğin bomba yüklü olduğu tespit edilen bir aracın İHA ile takibi ve güvenli bir bölgede imhası felaketi oluşmadan önleyebilir. Fakat afet deprem kaynaklı ise oluşum sürecine müdahale söz konusu değildir. Deprem durumunda ise İHA' lar yardımıyla hasar tespiti hızlı bir şekilde yapılabilir, arama ve kurtarmaya yardımcı olabilir. Bu çalışmanın konusu depremlerde İHA kullanımıdır.

1. Depremlerde İHA Kullanımı

İnsanoğlunun başına gelen felaketlerden en yıkıcı ve telafisi güç olanlarının başında depremler gelir. Şu an ki teknolojiler ile değerlendirildiğinde bir ön belirtisi olmadan ortaya çıkan depremler, bazen bir ilçe bazen bir il bazen bir bölgeyi tamamı ile etkisi altında bırakabilir ve bir şehri neredeyse haritadan silecek yıkıma sebep olabilmektedir.

1.1. Deprem Bölgesinde İHA ile Havadan Haritalama

Bilinen en büyük depremlerden biride, ülkemizde meydana gelen 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş depremleridir. Bu depremler 7.7 ve 7.6 mw büyüklüğünde olup başta Kahramanmaraş olmak üzere Hatay, Gaziantep, Malatya, Diyarbakır, Kilis, Şanlıurfa, Adıyaman, Osmaniye, Adana ve Elazığ depremden etkilenen iller olmuştur[2]. Deprem nedeniyle 50.783 kişi hayatını kaybetmiş, 115.353 kişi yaralanmış ve 37.984 binanın yıkıldığı AFAD tarafından raporlanmıştır.



Şekil 2. 6 Şubat 2023 Pazarcık – Elbistan Depremlerinden bir görüntü [3]

Depremlerde İHA kullanımı depremin hemen sonrasında çöken binaların konum ve durumlarının tespiti amacıyla başlar. Burada hızla zarar gören binaların tespitleri yapılarak öncelikli olarak belirlenen adreslere arama kurtarma ve sağlık ekiplerinin sevkı yapılır. Böylelikle yıkılan binalar altından daha fazla cana ulaşmak mümkün olabilir. Şekil 4. de 6 Şubat depremlerinde öncelikli olarak ulaşılması gereken yerlerin tespitinde Bayraktar TB2 insansız hava araçlarından alınan bir görüntü görülmektedir. Özellikle bu depremde deprem olduğu gün düşük görüş ve buzlanma gibi olumsuz hava koşulları sebebi ile helikopter uçuşları sınırlı olarak yapılmış olup, Bayraktar Akıncı İHA bu şartlarda bile uçuşunu gerçekleştirmişti afet yönetim merkezine hayati bilgiler sağlamıştır.



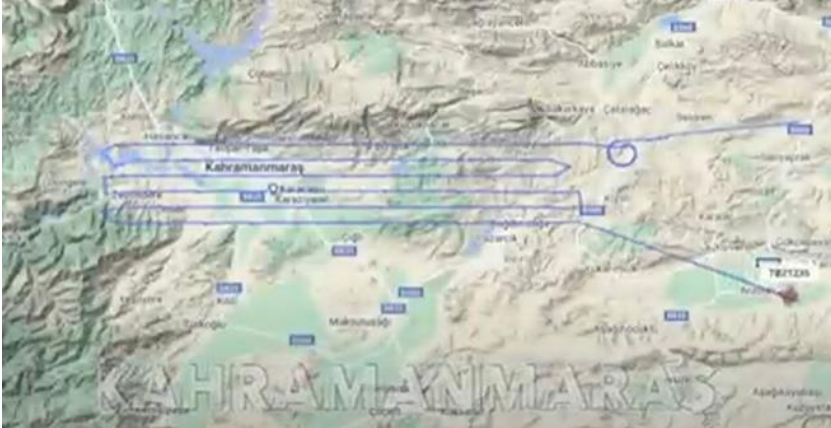
Şekil 3. Bayraktar TB2 insansız hava araçları 6 Şubat depreminde acil destek gereken bölgelerin belirlenmesinde görev yaptı [4]

Özellikle büyük bir alanı etkileyecek şekilde gerçekleşen yıkıcı depremlerde bölgenin son halini daha önceki uydu görüntüleri ile tespit etmek oldukça güç ve zaman alan bir işlemdir. Oysaki afet yönetiminde her bir dakikanın enkaz altından daha fazla canlı insan çıkarma bakımından önemi büyüktür. Bölgenin son halinin yeni uydu görüntülerinin hemen tedariki de mümkün değildir.



Şekil 4. Baykar Hızlı Haritalama Podu entegreli Bayraktar TB2 [5]

Şekil 5 de Baykar Hızlı Haritalama Sistemi Entegreli Bayraktar TB2’ nin deprem bölgesinde haritalaması yapılan bölgedeki uçuş rotası görülmektedir. Şekil 4 de görülen hızlı haritalama podu ile binlerce kilometre karelik yüksek çözünürlüklü (7 cm ve daha az) haritalar 24 saatlik bir sürede üretilabilmektedir [6].



Şekil 5. Baykar Hızlı Haritalama Sistemi Entegreli Bayraktar TB2’ nin deprem bölgesi haritalaması yapılan bölgede uçuş rotası

Ülkemizde 6 Şubat depremlerinde Baykar Hızlı Haritalama Podu entegreli 8 adet Bayraktar TB2 görev almıştır. Bu İHA' lar sayesinde bölgenin yüksek çözünürlüklü haritaları kısa sürede çıkarılmıştır. Böylece eski ve yeni görüntüler üst üste bindirilerek depremden önceki ve depremden hemen sonraki durum karşılaştırılabilmiş, hangi binaların yıkıma uğradıkları net olarak tespit edilebilmiştir [7]. Bu durumun önemi deprem sonrasında net olarak anlaşılmıştır. Arama kurtarma ekipleri hangi binanın altında kaç kişi olabileceği durumunu tespit etmek üzere sahada çalışırken ev sahiplerinin bile hangi binanın kendilerine ait olduğunu tespit etmekte zorlandıkları görülmüştür.



Şekil 6. Adıyaman iline ait Hızlı haritalama podu entegreli Bayraktar TB2 den alınmış yüksek çözünürlüklü görüntü [8]

1.2. Depremde Arama Kurtarma Çalışmalarında İHA Kullanımı

Depremden sonra yıkılan binalarda canlı olup olmadığının araştırılması, arama kurtarma ekiplerinin bir an evvel bu bölgelere yönlendirilmesi can kaybının en aza indirilmesi açısından oldukça önemlidir. Aynı zamanda depremde yıkılmamış ama ağır hasar almış binalarda da durum tespiti yapılması gerekmektedir. Fakat her an yıkılabilir durumda olması binaya teknik ekiplerin girmesini ve bu binalarda tespit yapılmasını zorlaştırmaktadır. İHA' lar yardımıyla bu binalara girilerek her bir kat, her bir daire ve odaları araştırılıp tespit yapılabilmesi mümkün olabilmektedir. Kurtarma çalışmaları esnasında ihtiyaç duyulan alet, ekipman ve gıdanın depremzedeye ulaştırılması sağlanmaktadır. Şekil 7'de enkaz içinde arama faaliyeti yürüten bir drondan alınan görüntü verilmiştir.



Şekil 7. Enkaz içinde arafa faaliyeti yürüten bir drondan alınan görüntü [7]

1.3. Depremlerde Yardım Malzemelerinin Ulaştırılmasında İHA Kullanımı

Deprem bölgelerinde hem depremzedelerin hem de arama kurtarma faaliyeti için bölgede bulunan kişilerin yaşamsal ihtiyaçlarının (gıda, insülin iğnesi, tansiyon ilacı vs.), tıbbi malzemelerin karşılanabilmesi, afet lojistik faaliyetlerinin hızlı ve verimli bir şekilde yönetilmesi oldukça önemlidir. Özellikle depremlerde altyapı ve yolların zarar görme durumlarında bu malzemelerin ulaştırılmasında en hızlı ve güvenilir yol havadan dronlar aracılığı ile yapılan teslimatlardır. Şekil 8 de bu amaçla ASELSAN ve ALTINAY iştiraki DASAL Havacılık Teknolojileri tarafından geliştirilen Türkiye'nin ilk kargo İHA'sı Kargo 150 görülmektedir. Bu İHA yaklaşık 150 kg yük taşıma kapasitesine sahip olup havada yaklaşık 45 dakikalık bir sürede görev icra edebilmektedir.



Şekil 8. Türkiye'nin ilk kargo İHA'sı Kargo 150 [10]

1.4. Depremlerde Baz İstasyonu olarak İHA Kullanımı

Depremlerde altyapı ve üstyapının zarar görmesi haberleşme linkleri üzerinde de olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Özellikle GSM şebekelerinin zarar görmesi deprem bölgesinde iletişimi olumsuz yönde etkilemektedir.

Depremlerde baz istasyonlarının yapısal olarak zarar görmesi ya da altyapı kaynaklı enerji kesilmelerinden dolayı belirli hizmet sürelerinden sonra devre dışı kalmaları iletişimin kesilmesine sebep olmuştur. Bu durum deprem bölgesinde bulunan vatandaşlara yakınlarının ulaşamamasına, onların durumları hakkında bilgi alabilmek adına deprem bölgesine gitmeye çalışmaları ise zaten zarar görmüş yollarda trafik yükünü ayrıca artırmaktadır. Zarar gören baz istasyonlarının yeniden çalışabilir hale getirilmesi ise uzun zaman alan zorlu bir süreçtir.



Şekil 9. Ulak Haberleşme A.Ş. tarafından üretilen UYGAR Haberleşme Podu [11]

Bu eksikliğin giderilmesi adına yapılan çalışmalar sonucu İHA' lar üzerine entegre edilebilen haberleşme podları geliştirilmiştir. Bu podlar yüksek kapsama alanına sahip kapalı bir haberleşme şebekesi oluşturmaktadır. Şekil 9. da Ulak Haberleşme A.Ş. tarafından üretilen Uygur Haberleşme Podu görülmektedir [11].



Şekil 10. ANKA İHA üzerine entegre edilen ULAK 4.5G baz istasyonu [12]

Şekil 10’ da ise ULAK ve TUSAŞ tarafından yürütülen ortak bir çalışma ile ANKA İHA üzerine entegre edilen ULAK 4.5G baz istasyonu görünmektedir.

Güncel bir uygulama olarak ülkemizde 6 Şubat depremlerinde AKSUNGUR İHA üzerine entegre edilen sivil İHA baz istasyonu podu ile DataLink sistemleri üzerinden kesintisiz mobil iletişime destek sağlanmıştır. İHA üzerine entegre edilmiş tek bir baz istasyonu ile aynı anda üç operatöre hizmet verilebilmektedir.



Şekil 11. AKSUNGUR İHA üzerine entegre edilen sivil İHA baz istasyonu modülü

SONUÇ

İHA' lar günümüzde askeri alanlar dışında sivil alanlarda da yaygın bir kullanıma sahiptir. Bu alanların başında afetlerde İHA kullanımı gelmektedir. Afet yönetiminde İHA kullanımı özellikle son yıllarda oldukça popüler hale gelmiştir. Her geçen gün İHA' lara entegre edilen yeni geliştirilmiş teknolojik ürünler ile afetlerde karşılaşılan zorlukların üstesinden gelinmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada depremlerde İHA kullanımı son güncel uygulamalar ile ele alınmıştır. Bu alanda devam eden çalışmalar neticesinde depremde afet yönetimi, arama kurtarma çalışmaları ve destek hizmetleri ile daha fazla depremzedeye canlı olarak ulaşmak ve can kayıplarının en aza indirilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Restas, A. (2015) Drone Applications for Supporting Disaster Management. World Journal of Engineering and Technology, 3, 316-321. doi: 10.4236/wjet.2015.33C047.
- [2] https://depem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmara%C5%9F%20Dep-remi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf
- [3] <https://www.takvim.com.tr/guncel/2023/02/11/adiyamandaki-enkazlarin-dron-go-runtusu-depremin-siddetini-bir-kez-daha-gozler-onune-serdi>
- [4] <https://www.donanimhaber.com/yerli-ihalar-deprem-bolgesini-boyle-goruntuledi--118185>
- [5] <https://www.savunmasanayist.com/hizli-haritalama-podu-entegreli-bayraktar-tb2-taktik-ihalar/>
- [6] <https://baykartech.com/tr/faydali-yuk-sistemleri/>
- [7] <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/bayraktar-tb2-1-milyon-saati-devirip-yeni-rekora-imza-atti/3419699#:~:text=Dep-remde%20yard%C4%B1ma%20u%C3%A7tu&text=Asr%C4%B1n%20Fela-kti%20olarak%20nitelenen%206,42%20Bayrak-tar%20TB2%20g%C3%B6rev%20ald%C4%B1>
- [8] <https://www.baykartech.com/tr/press/baykar-hizli-haritalama-sistemi-hasar-tespit-calismalarina-destek-veriyor/>
- [9] https://www.youtube.com/watch?v=ypS2477ucGA&ab_channel=HaberL%C3%BCtfe
- [10] <https://www.dasal.com.tr/en/news/kargo-150-turkeys-first-cargo-uav>
- [11] <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/ihalari-baz-istasyonuna-ceviren-uygarticarilesme-asamasina-geldi/2982121>
- [12] <https://www.defenceturk.net/anka-ihaya-baz-istasyonu-entegrasyonu>



BÖLÜM 6

Gömülü Sistemlerde Yapay Zekâ Kullanımı: Uç Yapay Zekâ

Mustafa Engin¹

¹ Doç. Dr., Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Bornova İzmir,
ORCID: 0000-0001-7247-4545

1-Giriş

Yapay zekâ kullanımı birçok sektörde devrim niteliğinde değişimlere neden oldu ve sadece birkaç yıl önce olası görülme-yen uygulamaları günümüzde hayatımızın bir parçası haline getirdi. Aynı zamanda, verilerin katlanarak artması ve gerçek zamanlı yanıtlara duyulan gereksinim yeni bir kavramın ortaya çıkmasına neden oldu: uç yapay zekâ (edge AI). Bu tür bir teknoloji, gecikmeleri en aza indirmek, güvenlik ve gizliliği artırmak için veri işleminin mümkün olduğunca kaynak noktasına yakın gerçekleşmesi gereken dağıtılmış sistemlerin uygulanması için kaçınılmaz hale gelmiştir (Abbas et al., 2017). Uç yapay zekanın devrim niteliğindeki yaklaşımı, yapay zekâyı buluttan ağına taşıyarak gömülü sistemlerin işleme ve iş yüklerini yönetme şeklini daha bağımsız ve daha güvenli hale dönüştürmeyi hedeflemektedir (Carvalho et al., 2021; Sandhu, 2022).

Geleneksel olarak, yapay zekâ büyük miktarda bilgiyi işlemek için buluta güvenmektedir, çünkü karmaşık modeller genellikle uç aygıtlarda bulunmayan önemli veri işleme yeteneği ve veri sağlama kapasitelerine gereksinim duyarlar (Bharathi Murthy et al., 2020). Klasik bir bilişim sistemi mimarisinde, sensörler veya diğer gömülü cihazlar tarafından toplanan veriler doğrudan buluta gönderilir ve burada karmaşık modeller tarafından işlenir. Bu işlemin sonuçları daha sonra kararlar almak veya belirli eylemleri gerçekleştirmek için uç cihazlara geri iletilir. Bu yaklaşım etkili olmakla birlikte bazı önemli kısıtlamalara da sahiptir. Birincisi, aygıt ve bulut arasındaki veri aktarımının getirdiği gecikme, özellikle her mikro saniyenin önemli olduğu sağlık izleme veya otonom sürüş gibi gerçek zamanlı kritik uygulamalarda önemli olabilir; ikincisi, verilerin buluta gönderilmesi, hassas veriler aktarım veya depolama sırasında savunmasız olabileceğinden gizlilik ve güvenlik endişelerini artırır (Tabrizchi & Kuchaki Rafsanjani, 2020). Uç yapay zekâ, işlemeyi doğrudan gömülü cihazlarda kaynağında yaptığından, verilerin artık aygıt ve bulut arasında gidip gelmesi gerekmediğinden gecikmeyi önemli ölçüde azaltarak ve gizlilik ve güvenliğini artırarak bu sınırlamaların üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Bu sistemler, buluta büyük miktarda ham veri göndermek yerine, hassas verileri cihazdan hiç ayrılmadan yerel olarak işleyebilir ve analiz edebilir. Tahminlere göre, uç bilişime yönelik küresel harcamaların 2024 yılında bir önceki yıla göre %15,4 artışla 200 milyar doları aşması bekleniyor (Gill et al., 2024). Mikrodenetleyiciler gibi gömülü aygıtlar bir veri merkezinin bilgi işlem gücüne sahip değildir, ancak AI algoritma verimliliğindeki ve özel donanımdaki ilerlemeler sayesinde artık bu cihazlarda model çalıştırmak mümkündür. Mikrodenetleyicilere bütünleşmiş sinir işleme birimleri (NPU'lar) gibi uç yapay zekâ için özel olarak tasarlanmış yeni çipler, gömülü sistemlerde modellen-

rin uygulanmasını giderek daha mümkün hale getirmektedir. Uç yapay zekâ yalnızca gecikme süresini azaltmak ve güvenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda işletme maliyetlerini azaltma potansiyeline de sahiptir. Bulut işleme; bant genişliği, depolama ve hesaplama gücü ile ilişkili önemli maliyetleri beraberinde getirmektedir.

Veri işlemenin bir kısmını uca taşıyarak, bulut üzerindeki yükü ve dolayısıyla maliyetleri azaltmak mümkündür; bu da özellikle endüstriyel sensör ağları veya akıllı şehirler gibi çok sayıda dağıtılmış aygıt içeren ve buluta veri gönderme maliyetinin engelleyici olabileceği uygulamalarda faydalıdır (Singh & Gill, 2023). Uç yapay zekanın önemli bir etkiye sahip olduğu bir diğer alan da milyonlarca birbirine bağlı aygıtın gerçek zamanlı olarak veri topladığı ve ilettiği nesnelerin internetidir (IoT). Uç yapay zekâ, bu aygıtların her bir işlem için buluta güvenmek zorunda kalmadan otonom kararlar almasını sağlar. Örneğin, bir çevresel izleme sisteminde, sensörler anormallikleri veya tehlikeli koşulları tespit etmek için verileri yerinde analiz edebilir ve daha fazla analiz için yalnızca ilgili bilgileri buluta gönderebilir; bu da iletilen veri hacmini azaltma açısından fayda sağlar, ancak aynı zamanda kritik olaylara daha hızlı tepki verilmesine de olanak tanır. Otomotiv sektörü, uç yapay zekanın fark yarattığı bir başka örnektir. Otonom araçlarda işlem hızı çok önemlidir ve uç yapay zeka, araçların kamera ve LiDAR () gibi sensörlerden gelen verileri merkezi işlem için buluta göndermek zorunda kalmadan doğrudan araç üzerinde işlemesine olanak tanıyarak gecikme süresini azaltır ve aracın beklenmedik durumlara hızlı tepki vermesini sağlar. Tüm bunlar sistemin güvenliğini ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırır (Gill et al., 2024).

Günümüzde mikrodenetleyici üreticileri, uç yapay zekâ çözümleri geliştirirken, Nesnelerin İnterneti (IoT), akıllı gözetim, robotik ve otonom araçlar gibi düşük gecikme süresi, yüksek yanıt verme ve gerçek zamanlı işleme gerektiren uygulamalar için gerekli bir yaklaşım olan merkezi bir veri merkezine göndermek yerine doğrudan sahada veri işleme ve analizine olanak tanıyan bileşenler ve altyapı geliştirmeye odaklanmaktadır. Özellikle son üç yılda yapay zekaya özel işlemciler ve yüksek performanslı ağ yongaları gibi gelişmiş hesaplama yeteneklerini entegre eden gömülü aygıt çözümleri sağlayarak uç yapay zekâ iş yüklerini desteklemelerine olanak tanımaktadırlar. Yapay zekâ destekli mikrodenetleyiciler, ölçeklenebilirliği ve enerji verimliliğini desteklerken, sahadaki sensörler tarafından üretilen büyük hacimli verileri işlemek için optimize edilmiştir (ARM Developer, 2024).

İtalyan-Fransız teknoloji şirketi ST Microelectronics, uç yapay zekâ için gömülü cihazlar geliştirerek yapay zekâ yeteneklerini doğrudan cihazlara entegre eden çözümler sunmaktadır. ST, bütünleşmiş yapay zekâ hızlandırıcıları içeren

ve makine öğrenimi algoritmalarını doğrudan cihaz üzerinde çalıştırmak, hızlı işlemeyi sağlamak ve gecikmeyi azaltmak için tasarlanmış STM32 serisi mikrodenetleyicilere her gün yeni bir üye eklemektedir. ST, geliştiricilerin eğitilmiş sinir ağlarını doğrudan STM32 mikrodenetleyicilerinde çalışabilecek koda dönüştürmelerine olanak tanıyan STM32Cube AI kütüphanesi gibi gömülü cihazlarda yapay zekâ modellerini eğitmek ve dağıtmak için yazılım araçları içeren eksiksiz geliştirme platformları sunmaktadır (STMicroelectronics, 2024). ST Edge AI Suite, yapay zekâ yeteneklerini gömülü sistemlere entegre etmek için bir dizi araçtır. ST ayrıca, konuşma tanıma veya titreşim izleme gibi verileri gerçek zamanlı olarak analiz edebilen gelişmiş işleme yeteneklerini entegre eden akıllı sensörler üreterek bunları öngörücü bakım veya sesli yardım gibi uygulamalar için ideal hale getirmektedir. ST Microelectronics'in yapay zekâyı doğrudan gömülü cihazlara entegre etme yaklaşımı, çok çeşitli yenilikçi uygulamalara olanak tanıyarak operasyonel verimliliği artırmakta ve akıllı cihazlar için yeni yetenekler sağlamaktadır.

2-Yapay Zekâ İlgili Tanımlar ve Temel İlkeler

1943 yılında nörofizyolog Warren McCulloch ve matematikçi Walter Pitts nöronlar ve nasıl çalıştıkları üzerine bir makale yazdılar. Bir elektrik devresi kullanılarak bir model oluşturuldu ve sinir ağı ortaya çıktı. Yetmiş yıl sonra bu başlangıçlar, dünyanın dört bir yanındaki en iyi teknoloji şirketleri ve teknoloji toplulukları tarafından bir dizi büyük ölçekli projeye dönüştü – Google Brain, AlexNet, OpenAI, Amazon Machine Learning Platform, yapay zekâ ve makine öğrenimi ile ilgili en iyi bilinen girişimlerden bazılarına örnektir.

Yapay zekâ (YZ), bilgisayarların insan zekasını taklit etmek için nasıl kullanılabileceğini inceleyen bir bilgisayar bilimi disiplini. YZ, Alan Turing gibi öncülerin, bilgisayarların problemleri insanların yapabileceğine benzer şekillerde çözme olasılığını öngördüğü 20. yüzyılda bilgi işlemin doğuşundan beri var olmuştur. Klasik bilgisayar programlama algoritmaları açık bir şekilde kodlayarak, bilgisayarları verileri işlemek için mantık yürütmeye ve bir çıktı hesaplamaya yönlendirerek sorunları çözer. Buna karşılık, makine öğrenimi (ML), verilerdeki kalıpları bulmaya çalışan ve verilere dayalı olarak etkili bir şekilde öğrenen bir yapay zekâ yaklaşımıdır. Verilerin önceden etiketlenmesi (ya da etiketlenmemesi), algoritma gelişimini yönlendirmek için takviyeli öğrenme, istatistiksel analiz ya da başka yollarla özelliklerin çıkarılması ve ardından belirli bir güven derecesine sahip bir çıktı belirlemek için giriş verilerinin bu eğitilmiş veri setine göre sınıflandırılması dahil olmak üzere bunun uygulanabileceği birçok yol vardır.

Derin öğrenme (DL), büyük veri setlerinden bir modeli yinelemeli olarak eğitmek için birden fazla sinir ağı katmanını kullanan bir makine öğrenimi alt kümesidir. Bir model eğitildikten sonra, yeni veriler hakkında bir çıkarım yapmak için yeni veri setlerine bakabilir. Bu yaklaşım son zamanlarda büyük ilgi görmüş ve görüntü işleme ve konuşma tanıma veya finansal varlık modelleme gibi çeşitli sorunlara uygulanmıştır. Bu yaklaşımın gelecekteki kritik altyapı ve cihazlar üzerinde de önemli bir etkisi olacaktır.

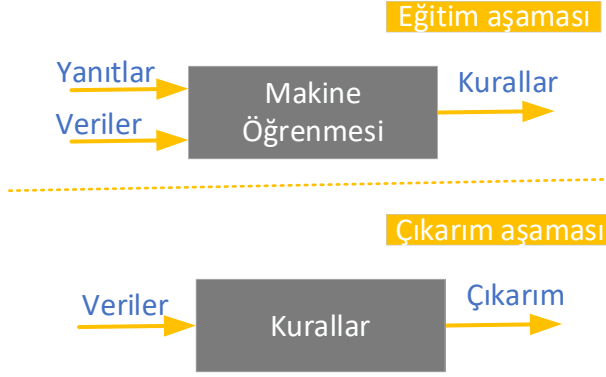
3-ML Gömülü Sistemlerde Uygulanması

Geleneksel algoritmalar ve makine öğrenimi modelleri farklı girdiler ve temel ilkeler kullanılarak oluşturulur. Geleneksel bir algoritma bir tür talimattır, bir sonuç elde etmek için verilerin nasıl işlenmesi gerektiğine dair kuralları tanımlarız ve farklı veri türleriyle nasıl davranacağını tahmin edebiliriz. Şekil-1’de geleneksel algoritmanın işleyiş modeli gösterilmiştir.



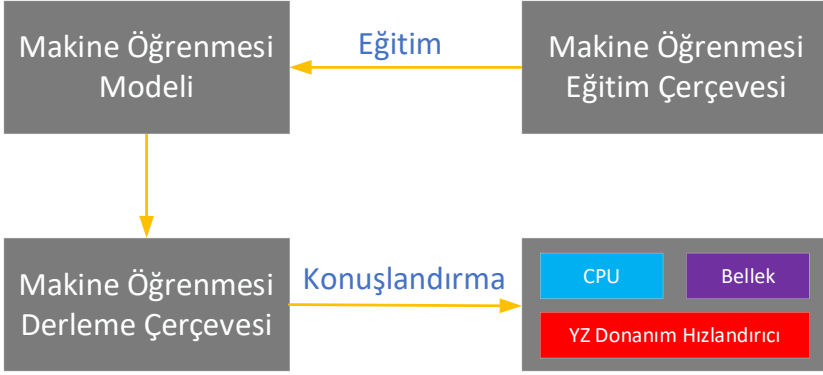
Şekil-1 Geleneksel algoritmanın işleyiş modeli.

Bu arada, bir makine öğrenimi modelinin oluşturulması çok daha karmaşıktır. Eğitim ve çıkarım olmak üzere iki aşamadan oluşur. Eğitim aşamasında, Naive Bayes sınıflandırıcı algoritması, k ortalama kümeleme algoritması veya destek vektör makinesi algoritması gibi bir makine öğrenimi algoritması alırız ve ona hem girdi hem de sonuçları içeren verileri, örneğin "kedi" veya "köpek" olarak etiketlenmiş kedi ve köpek görüntülerini besleriz. Eğitim aşamasında makine öğrenimi algoritmasının görevi, bir makine öğrenimi modeli olacak bu verilerin nasıl ilişkilendirileceğine dair kuralları tanımlamaktır. Çıkarım aşamasında, modelin tahminler, kararlar, nesne tespiti vb. şeklinde geçerli çıktılar sağlayıp sağlayamayacağını test etmek için bir dizi yeni ancak ilgili veriyi, örneğin kedi ve köpeklerin yeni görüntülerini modelden geçiririz.



Şekil-2 Makine öğrenmesi modelinin işleyişi.

Özünde bir makine öğrenimi algoritması, eğitim verilerini kullanarak çok sayıda hesaplama yapması gereken karmaşık bir matematiksel modeldir. Bu nedenle, eğitim aşaması, bir grafik işlem biriminin (GPU) veya bunlardan oluşan bir ağır paralel işlem gücü ile hızlandırılmış bir merkezi işlem birimi (CPU) ile donatılmış güçlü bir bilgisayar gerektiren, hesaplama açısından en pahalı görevdir. Bununla birlikte, gömülü sistemlerde makine öğrenimi çalıştırma bağlamında, eğitim aşaması dış kaynaklı bir bulut bilişim platformuna verilebilir, sürekli bağlı kalınmaz ama cihaz üzerindeki modeli güncellemek için zaman zaman bu platforma bağlanabiliriz (Akyaz & Engin, 2024). ML çıkarım aşaması, yani modelin kendisinin çalıştırılması, bu kadar fazla işlem kapasitesi gerektirmeyebilir ve zaten eğitilmiş ML modelleri cihaz düzeyinde çalışabilir. Buna ek olarak, çok karmaşık ML modelleri bile Tiny ML veya Edge AI olarak da adlandırılan özel çerçeveler ve araçlar (örneğin TensorFlow Lite, AIfES) ve model optimizasyon teknikleri kullanılarak şekil-3'te gösterildiği gibi kısıtlı gömülü cihaz mimarisinde ve hatta mikro denetleyicilerde çalışmak üzere optimize edilebilir (Warden & Situnayake, 2019). Bu sayede en basit ML modelinin bellekte kapladığı alan birkaç on kilobayta kadar düşebilmekte, düşük güç ve hesaplama gereksinimleri sayesinde gömülü ağlar ve pil gücüyle çalışan cihazlar için uygun hale gelebilmektedir.



Şekil-3. Kısıtlı gömülü sistemler için yapay zekâ modellerinin optimizasyonu.

Sonuç olarak, makine öğrenimi donanım gereksinimleriniz, modelinizin algoritmasının doğası, özelliklerinin ve parametrelerinin sayısı, doğruluğu ve hızının yanı sıra tasarlandığı görevler ve işlemesi gereken veri miktarı tarafından tanımlanan modelinizin karmaşıklığına bağlı olacaktır. Rakamlar ne kadar yüksekse, o kadar güçlü donanıma ihtiyacınız olacaktır. ML modelinizin performansını ve karmaşıklığını ölçmek için temel ölçütleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

Çıkarım gecikmesi: Bu, ML modelinin tek bir girdiyi işlemesi ve bir çıkarım sonucu üretmesi için geçen süreyi yansıtır. Milisaniye cinsinden ölçülür.

FLOPS: FLOPS, ML modelinin saniyede gerçekleştirebileceği çıkarım sayısını gösterir.

Doğruluk: Bu, temel gerçek veya beklenen çıktılarla karşılaştırıldığında makine öğrenimi modelinin tahminlerinin doğruluğunun ölçüsüdür. Bu, belirli bir görev için modelin performansını temsil eder.

Güç verimliliği: Bu, makine öğrenimi modelinin, genellikle watt başına çıkarım sayısı (çıkartım/watt) cinsinden cihazın güç kaynaklarını ne kadar etkili kullandığının göstergesidir.

Ayrıca, projenizin makine öğrenimi ihtiyaçlarını daha iyi anlamak için aşağıdaki sorulara yanıt aramalısınız.

- Makine öğrenimi modelimin hangi özel görevleri kapsaması bekleniyor?
- İhtiyaçlarımı hangi doğruluk seviyesi karşılayabilir?
- Denetimli veya denetimsiz öğrenme?
- Sistemimin ne kadar veri işlemesi gerekecek?

- Her zaman mı yoksa ara sıra mı çıkarım yapacak?
- Model çıktıyı ne kadar hızlı sağlamalı?

Bu soruların yanıtları bize yapay zekâ iş yüklerinin üstesinden gelmek için doğru gömülü donanımı bulmayı sağlayacaktır.

4-Uç Yapay Zekâ Geliştirme Çerçeveleri

Uç yapay zekâ geliştirme çerçeveleri, gömülü donanımlarda kullanılmak üzere makine öğrenimi modeli eğitimini ve optimizasyonunu kolaylaştırmak için tasarlanmıştır. Çoğu zaman bu tür araçlar, tam ölçekli yapay zeka çerçevelerinin geliştiricileri ve özel amaçlı donanım üreticileri tarafından bu donanım için paketler halinde sağlanır.

TensorFlow Lite, mobil, mikro denetleyiciler ve uç cihazlarda YZ modeli konuşlandırmasını sağlamak için tasarlanmış Python'da YZ geliştirmeye yönelik TensorFlow çerçevesinin hafif bir sürümüdür (TensorFlow Lite, 2024).

PyTorch Mobile, mobil iOS ve Android cihazlarda ve uç cihazlarda model eğitimi ve dağıtımı için beta aşamasında bir araçtır (PyTorch, 2024).

Apple'ın Core ML'si, Apple donanımında minimum bellek ayak izi ve güç tüketimi ile YZ modellerinin cihaz içi performansı için optimize edilmiş bir çerçevedir (Apple, 2024).

Open VINO, Intel mimarilerinde önceden eğitilmiş derin öğrenme modellerinin kolay dağıtımı için Intel'in açık kaynaklı görsel çıkarım ve sinir ağı optimizasyon araç setidir.

NVIDIA JetPack, gömülü donanımlarda uçtan uca hızlandırılmış yapay zekâ uygulamaları oluşturmak için eksiksiz bir geliştirme ortamı sağlayan bir araç setidir (OpenVINO, 2024).

MLPerf Tiny bir geliştirme aracı değildir, gömülü cihazlarda makine öğrenimi çıkarım performansı değerlendirmesini kolaylaştırmak için tasarlanmış, standartlaştırılmış ölçümler ve test metodolojileri sunan bir kıyaslama paketidir (MLPerf Tiny, 2024).

5- İşlemciler ve Hızlandırıcılar

Bir gömülü sistem tasarımcısı makine öğrenimi algoritmalarını çalıştıracığı bir sistem için işlemci seçimi yaparken işlem hızı, enerji verimliliği ve makine öğrenimi çerçevesiyle uyumluluk gibi faktörleri göz önünde bulundurması gerekir. Öncelikle kullanabileceğimiz işlemci yapılarını inceleyelim.

CPU, sistemin genel amaçlı merkezi işlem birimidir. Bir bilgisayar cihazındaki programları ve uygulamaları, ayıklama, dönüştürme ve yükleme süreçlerini çalıştırır ve hem ses hem de metin kullanan sistemlerde olduğu gibi karışık veri girişleriyle başarılı performans gösterir. Modern CPU'lar birden fazla çekirdeğe sahiptir (genellikle 4-16 çekirdek). Performansları saniyede işletilen komut sayısı ile belirlenir, en yaygın kullanılan test programı Drystone'dur, DMIPS/MHz.

GPU, paralel çekirdekleri nedeniyle grafik işlemeye adanmış bir grafik işlem birimidir. Paralel hesaplama görevlerini yerine getiren çok sayıda küçük çekirdek nedeniyle, GPU'ların hem model eğitimi hem de yapay zeka çıkarımı gibi yapay zeka iş yükleri için çok kullanışlı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, yüksek performanslı hesaplama için kullanılırlar, ancak aynı zamanda CPU'lardan daha büyük bir bellek ayak izine ve daha yüksek güç tüketimine sahiptirler.

FPGA, yüksek derecede esneklik gerektiğinde belirli kullanım durumu gereksinimlerini karşılamak için kullanıcılar tarafından yeniden yapılandırılabilen entegre bir devre olan alan programlanabilir geçit dizisidir. GPU'larda olduğu gibi, FPGA'lar da birden fazla işlevi paralel olarak çalıştırabilir ve hatta çipin bazı bölümlerini belirli işlevler için atayabilir ve böylece yapay zekâ modellerini yürütmeye CPU'lara kıyasla çok daha performanslıdır. GPU'ya göre bir avantaj olarak, FPGA mimarisi belleğin işlemeye daha yakın olmasını sağlayarak gecikme süresini ve güç tüketimini azaltmaya yardımcı olur. Öte yandan, bu daha pahalı bir donanım seçeneğidir.

ASIC, Uygulamaya özel üretilmiş tümdevredir. Birkaç farklı devreyi tek bir tümdevre içerisinde birleştiren bir bilgisayar tümdevresidir. FPGA'nın aksine, üretici tarafından belirli bir sabit işlevi yerine getirmek üzere tasarlanmıştır ve yeniden programlanamaz. Düşük güç tüketimi, hız ve küçük bir bellek ayak izi sağlar ancak daha pahalıdır ve yalnızca seri üretim için uygundur. Özel ASIC örnekleri arasında VPU'lar - Görüntü ve görme işleme için tasarlanmış Görme İşleme Birimleri (Intel Movidius VPU), TPU'lar - İlk olarak Google tarafından geliştirilen ve ML çerçevesi TensorFlow için optimize edilen Tensör İşleme Birimleri (Google Coral Edge TPU) ve NCU'lar - Daha düşük güç seviyesinde yapay zeka ile ilgili görevler için özel olarak geliştirilmiş sinirsel hesaplama birimleri (Arm'ın ML işlemcisi Ethos-55) bulunmaktadır.

6- Bellek

Gömülü bir sistemde, bellek hiyerarşisi hem çip alanının hem de güç tüketiminin büyük bir bölümünü alır. Bu nedenle, sistem tasarımcıları bellek hiyerarşisini donanım kullanımını ve enerji tüketimini azaltacak ancak aynı zamanda yüksek performansı sürdürecektir şekilde optimize etmeye çalışır. Diğer bilgisayar

sistemleri gibi, gömülü sistemler de her biri belirli sistem işlevlerini etkinleştirmekten sorumlu olan farklı bellek türlerinin bir kombinasyonuna ihtiyaç duyar.

RAM (Rastgele Erişimli Bellek): ana işlevi, değişkenler ve yığın verileri dahil olmak üzere program yürütme sırasında dinamik veri depolama yapar. Hızlıdır ancak uçucudur, yani sistem gücü kapalıyken verileri tutamaz, bu nedenle sisteminizin enerji tüketimi ihtiyaçlarını yeterince karşılayacak bir güç kaynağına sahip olması önemlidir. Sistem performansını ön plana aldığımızda, RAM seçtiğimiz bellek türüdür, bu nedenle gömülü bir sistemde makine öğrenimi iş yüklerini ele alırken kullanılan bellek türüdür. Bir sistemin RAM'i ne kadar büyük olursa, her biri için ayrılacak bol miktarda kaynak nedeniyle aynı anda daha fazla farklı uygulama çalıştırabilir. Ancak, tek bir uygulama ihtiyaç duyduğundan daha fazla bellek tüketmeyeceğinden, daha fazla bellek eklemek sisteminizin performansında bir artış sağlamayacaktır. Bu nedenle, herhangi bir bellek darboğazınız olmadığından emin olmak için, sisteminizin kaç tane eşzamanlı program çalıştıracığını ve her birinin ne kadar belleğe ihtiyacı olduğunu belirleyin. Gerisi işlem biriminizin kapasitesine bağlı olacaktır. Bellek bant genişliği, sistem belleğinin bir diğer önemli parametresidir ve verilere erişilebilme ve düzenlenebilme hızını gösterir, gömülü sistemin ortalama bant genişliği 128 bit ile 256 bit arasında değişir.

EEPROM (Elektrikle Silinebilir Programlanabilir Salt Okunur Bellek): Enerji uygulanmadığında verilerin saklanması gereken uygulamalar için kullanılan bir bellek türüdür. İçeriğinin değişimi genellikle sık aralıklarla yapılmaz. Genellikle sistem yapılandırma verilerini tutmak için kullanılan bir tür salt okunur bellektir.

Flash Bellek: EEPROM'a göre daha küçük alana büyük kapasite sunabilen, daha hafif ve enerji verimliliği yüksek bir ROM tipi bellek türüdür. Okuma hızı yüksek yazma hızı biraz düşük olsa da sabit disk belleği için modern bir alternatiftir. Büyük ölçekli bellek ihtiyaçları için hala daha pahalıdır ancak küçük gömülü uygulamalar için idealdir. Flash bellek, mekanik şok direnci nedeniyle çoğunlukla taşınabilir cihazlarda program kodunu ve statik verileri depolamak için kullanılır.

7- Uygulama Geliştirme Kartları

Mikroişlemci, bellek, giriş/çıkış arabirimleri ve diğer yerleşik özelliklere sahip kullanıma hazır, işleyen mini bilgisayarlar olan geliştirme kartları hızlı uygulama geliştirmemize olanak sağlar. Bununla birlikte, önceden tanımlanmış miktarda işlem gücü ve belleğe sahip olmaları nedeniyle kapasite yetersizliği durumlarında kapasite artırma gini bir esneklik sunmazlar. Piyasada, bu tür gömülü

donanım sistemlerinde yapay zeka iş yüklerini işlemek için uyarlanmış çok sayıda geliştirme kartları bulunmaktadır.

Nvidia Jetson Xavier NX; En küçük yapay zeka süper bilgisayarı olarak bilinen, aynı anda inanılmaz güç ve enerji verimliliği seviyelerine sahiptir ve karmaşık makine öğrenimi görevlerini bile yerine getirebilir.

Nvidia Jetson Nano, Xavier NX'ten daha az güçlü ve daha ucuzdur, ancak daha yaygın AI iş yüklerini işlemek için yeterli olabilir.

Raspberry Pi 4 çok uygun fiyatlı, yaygın olarak desteklenen ve eğitici dokümanlarının çok olması onu küresel olarak en popüler geliştirme kartı haline getirmiştir. TensorFlow çerçevesini kolayca çalıştırır ve ayrıca uyumlu Intel Neural Compute Stick 2 veya Coral Edge TPU hızlandırıcı ile AI yeteneklerini genişletmek için bir USB arayüzüne sahiptir. Ayrıca Pi 4, Linux, Android ve Chrome OS'nin yanı sıra Linux dışı işletim sistemleriyle de mükemmel işletim sistemi uyumluluğu sunar.

Google Coral Dev Board, ekstra yapay zekâ yetenekleri için Google Edge TPU yardımcı işlemcisi ile güçlendirilmiş, endüstriyel ortamlara uyabilen modüller ve ölçeklenebilir bir çözümdür.

Rock Pi N10, özel bir NPU yerleştirerek yapay zekâ için özel olarak tasarlanmıştır ve nispeten ucuzdur.

8- Gömülü Yapay Zekâ Bilgi İşlem Platformları

Gömülü yapay zekâ bilgi işlem platformları, yapay zekâ iş yüklerini işlemek için tasarlanmış ve optimize edilmiş donanım ve yazılımları kapsar. Geliştiricilerin ve teknoloji meraklılarının gömülü cihazlarda yapay zekâ uygulamaları oluşturmaları ve denemeleri için kullanıma hazır çözümler sunarlar. En popüler olan birkaç platformu inceleyelim.

NVIDIA Jetson, farklı işlem gücü seviyelerine sahip küçük, enerji verimli ve gömülü yapay zekâ uygulamaları için yüksek performanslı hızlandırma için uygun geliştirici kitleri sunan bir platformdur.

Raspberry Pi, hem mühendislik uygulamaları hem de meraklılar için uygun fiyatlı gömülü yapay zeka keşfi sağlayan küçük bir bilgisayar kartıdır. Raspberry Pi 5, serideki en güçlü ve yapay zekâ için optimize edilmiş olanı olmak üzere, çeşitli özellikler ve yetenekler sunar. Yeterli düzeyde kaynak belge sağlanmış ve çok sayıda açık kaynaklı örnek proje geliştirilmiştir. Farklı yazılım sağlayıcılarının geliştirme kitleri ve işletim sistemleriyle uyumludur.

ADLINK'in Edge AI platformları, derin öğrenme (DL) iş yüklerinde donanım hızlandırmayı, watt başına yüksek performansı, uçtan uca bağlantıyı ve 7/24 çalışma için endüstriyel çevre uyumluluğunu entegre eden kurumsal düzeyde heterojen bilgi işlem mimarisi platformları serisinde gelir.

Mediatek Genio, çeşitli amaçlar ve yapay zekâ iş yükleri için uygulanabilir olmasını sağlayan değişken güç özellikleri, enerji verimliliği, modüler mimari ve yerleşik çevre birimlerine sahip bir dizi yonga seti sunan uç yapay zekâ için bir SoC çözümleri ailesidir.

Gömülü YZ için İşlemciler YZ modellerini çalıştıran gömülü sistemlerde en iyi performansı ve kaynak tüketim verimliliğini elde etmek için donanım üreticileri, makine öğrenimi işlemleri için optimize edilmiş özel amaçlı işlemciler ve mikro denetleyiciler sunmaktadır. Genel amaçlı seçeneklerin aksine, daha yüksek işlem gücüne ve daha yüksek saat hızlarına sahip birden fazla çekirdek, daha fazla bellek kapasitesi ve daha karmaşık komut seti mimarisinin (ISA) yanı sıra, özellikle gömülü yapay zekaya yönelik hazır geliştirme araçları ve kütüphaneleri ve sensörlerle arayüz oluşturmak için yerleşik çevre birimleri sağlarlar. Arm Cortex-M, temel makine öğrenimi işlemleri yürütmek için özel talimatlar ve TensorFlow Lite ile gömülü sistemlerde makine öğrenimi uygulamaları için tasarlanmış bir dizi düşük güçlü mikro denetleyicidir (MCU).

NXP i.MX 8 ve 9 Serisi, gelişmiş sinir ağı işleme ve makine öğrenimi hızlandırma sunan yüksek performans ve düşük güç özelliklerine sahip multimedya ve ekran uygulamaları için çok çekirdekli işlemci serisidir (NXP, 2024).

Texas Instruments'ın Sitara AM serisi işlemcileri, görsel yapay zekâ, sinyal işleme, sensör füzyonu ve derin öğrenme iş yükleri için optimize edilmiş Arm tabanlı işlemci ailesidir (TI, 2024).

Günümüzde dijital dönüşümün en gelişmiş sınırlarından biri olsa da uç yapay zekâ bazı önemli zorlukları da beraberinde getiriyor. Yapay zekâ modellerini kaynak kısıtlaması olan cihazlara dağıtmak hem yazılım hem de donanım düzeyinde önemli optimizasyon gerektirir. Modeller çok fazla doğruluk kaybı olmadan sıkıştırılmalı ve donanım bu modelleri gerçek zamanlı olarak çalıştıracak kadar güçlü olmalı, aynı zamanda özellikle pille çalışan cihazlarda enerji açısından verimli olmalıdır.

Ayrıca, gömülü cihazların ve donanım konfigürasyonlarının çeşitliliği, her-kese uyan tek bir çözüm olmadığı anlamına gelir. Geliştiricilerin genellikle yapay zekâ modellerini ve işleme altyapısını cihazın ve uygulamanın özel ihtiyaçlarına

uyacak şekilde özelleştirmeleri gerekir. Bir başka zorluk da veri güvenliği ve gizliliğiyle ilgilidir. Uç AI, verileri yerel olarak işleyerek gizliliği artırabilirken, uç cihazlar genellikle merkezi sunuculara göre saldırılara karşı daha savunmasızdır ve hem verileri hem de AI modellerini yetkisiz erişime karşı korumak için uçtan uca şifreleme ve güçlü kimlik doğrulama gibi sağlam güvenlik önlemlerinin uygulanmasını gerektirir. İleriye baktığımızda, uç yapay zekanın gömülü sistemler dünyasında giderek daha merkezi bir rol oynayacağı açıktır. Teknoloji geliştikçe, gömülü cihazların hesaplama yeteneklerinde bir artış görmeyi bekliyoruz, bu da giderek daha karmaşık modelleri doğrudan uçta çalıştırmayı mümkün kılıyor.

9- Sonuç

Bu araştırmada, artık daha yaygın bir uygulama ve aranan bir uzmanlık haline gelen yapay zekâyı gömülü sistemlere entegre etmenin yazılım ve donanım yönlerini ele alındı. Gömülü sistemler ve yapay zekâ füzyonunun faydaları arasında makine öğrenimi iş yükleri için gerçek zamanlı işlem hızı, özel makine öğrenimi uygulamalarında maliyet tasarrufu, gelişmiş veri gizliliği ve daha fazla tasarım esnekliği bulunmaktadır. Mükemmel işlevsellik ve performansa sahip gömülü yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesi, uygun makine öğrenimi modelinin seçimi ve eğitimi ile uygun donanım seçimi gibi iki ana faktöre bağlıdır. Makine öğrenimi modelinin seçimi büyük ölçüde son kullanıcılara sağlanması gereken sistem işlevlerine bağlıyken, bu tür sistemler için donanımın yapay zekâ iş yüklerini kaldırabilecek yeterli kapasiteye sahip olması gerekir. Makine öğrenimi modellerinin ve donanımın yüksek performanslı ve güvenilir bir gömülü yapay zekâ destekli cihaz sunma sinerjisi, çeşitli tekniklerin kombinasyonu yoluyla elde edilebilir.

Genel olarak, uç yapay zekâ, bulut bilişimin sınırlamalarına bir çözüm sağlayarak ve otonom ve gerçek zamanlı uygulamalar için yeni olanaklar sunarak gömülü sistemler için oyunun kurallarını değiştiren bir unsurdur. Gecikmeyi azaltarak, güvenliği artırarak ve maliyetleri düşürerek, uç yapay zekâ akıllı cihazlarda hızla kritik bir bileşen haline gelmektedir. Önümüzde hala zorluklar olsa da donanım ve algoritmalarındaki ilerlemeler gömülü sistemlerde yapay zekâ kullanımı her geçen gün artmaya devam etmektedir.

Kaynakça

- Abbas, N., Zhang, Y., Taherkordi, A., & Skeie, T. (2017). Mobile edge computing: a survey. *IEEE Internet Things J*, 5(1), 450–465. <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2750180>
- Akyaz, T., & Engin, D. (2024). Machine Learning based Predictive Maintenance System for Artificial Yarn Machines. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3454548>
- Apple. (2024). *Core ML Overview - Machine Learning - Apple Developer*. Core ML Overview - Machine Learning - Apple Developer. <https://developer.apple.com/machine-learning/core-ml/>
- ARM Developer. (2024). *Cortex-M55*. <https://developer.arm.com/processors/cortex-m55>
- Bharathi Murthy, C. H. V. N. U., Shri, M. L., Kadry, S., & Lim, S. (2020). Blockchain based cloud computing: Architecture and research challenges. *IEEE Access*, 8, 205190–205205. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036812>
- Carvalho, G., Cabral, B., Pereira, V., & Bernardino, J. (2021). Edge computing: current trends, research challenges and future directions. *Computing*, 103(5), 993–1023. <https://doi.org/10.1007/S00607-020-00896-5/TABLES/5>
- Gill, S. S., Golec, M., Hu, J., Xu, M., Du, J., Wu, H., Walia, G. K., Murugesan, S. S., Ali, B., Kumar, M., Ye, K., Verma, P., Kumar, S., Cuadrado, F., & Uhlig, S. (2024). Edge AI: A Taxonomy, Systematic Review and Future Directions. *Cluster Computing* 2024 28:1, 28(1), 1–53. <https://doi.org/10.1007/S10586-024-04686-Y>
- MLPerf Tiny. (2024). *MLPerfTM Tiny is an ML benchmark suite for extremely low-power systems such as microcontrollers*. MLPerfTM Tiny Is an ML Benchmark Suite for Extremely Low-Power Systems Such as Microcontrollers. <https://github.com/mlcommons/tiny>
- NXP. (2024). *Edge Computing and Security Platform | NXP Semiconductors*. Edge Computing and Security Platform. <https://www.nxp.com/applications/enabling-technologies/edge-computing:EDGE-COMPUTING>
- OpenVINO. (2024). *OpenVINO 2024.6 — OpenVINOTM documentation — Version(2024)*. OpenVINOTM Documentation. <https://docs.openvino.ai/2024/index.html>
- PyTorch. (2024). *Home | PyTorch*. PyTorch Mobile. <https://pytorch.org/mobile/home/>
- Sandhu, A. K. (2022). Big Data with Cloud Computing: Discussions and Challenges. *Big Data Mining and Analytics*, 5(1). <https://doi.org/10.26599/BDMA.2021.9020016>

- Singh, R., & Gill, S. S. (2023). Edge AI: A survey. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 71–92. <https://doi.org/10.1016/J.IOTCPS.2023.02.004>
- STMicroelectronics. (2024). *STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32 - STMicroelectronics*. <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
- Tabrizchi, H., & Kuchaki Rafsanjani, M. (2020). A survey on security challenges in cloud computing: issues, threats, and solutions. *Journal of Supercomputing*, 76(12), 9493–9532. <https://doi.org/10.1007/S11227-020-03213-1/TABLES/6>
- TensorFlow Lite. (2024). *TensorFlow Lite - Computer Vision on Edge Devices [2024 Guide] - viso.ai*. Computer Vision on Edge Devices . <https://viso.ai/edge-ai/tensorflow-lite/>
- TI. (2024). *Edge AI technology | TI.com*. Edge AI Technology | . <https://www.ti.com/technologies/edge-ai.html>
- Warden, P., & Situnayake, D. (2019). *TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers: Vol. TinyML* (M. Loukides, N. Taché, & B. Kelly, Eds.; First Edition). https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=tn3EDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=pete+warden+tinyml&ots=jqoldt19A3&sig=zaf-BYGwtlq4YE5xMMDWlSmxHZA&redir_esc=y#v=one-page&q=pete%20warden%20tinyml&f=false



BÖLÜM 7

Akselerometre İle Tremor Ve Parkinson Hastalığının Tespiti

Mesut Melek¹ & Negin Melek²

¹ Doç. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü,
ORCID: 0000-0002-7152-7788

² Doç. Dr., Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği,
ORCID: 0000-0001-5297-5545

Giriş

Tremor, insan vücudunda ortaya çıkan istemsiz ve ritmik hareketlerle tanımlanan yaygın bir motor bozukluğudur. Bu durum, bazen sağlıklı bireylerde bile çeşitli çevresel ve fizyolojik etkenlerle tetiklenebilir. Stres, yorgunluk, uykusuzluk veya aşırı kafein tüketimi bu hareketlerin artmasına neden olabilir. Parkinson hastalığı, esansiyel tremor ve multipl skleroz gibi rahatsızlıklar ise bireylerin günlük yaşam aktivitelerini sınırlayarak yazı yazma, nesne tutma ya da düğmeleri ilikleme gibi ince motor becerilerde zorluklara yol açabilir (Deuschl et al., 1998a; Thanvi et al., 2006).

Bu motor bozukluk, hem nörolojik hem de miyopatik sorunlardan kaynaklanabilen istemsiz kas titremeleri şeklinde ortaya çıkar (Elble & Deuschl, 2009). Titremeler, genellikle eller, kollar, baş, yüz, ses, gövde ve bacakları etkiler. Ancak, en yaygın olarak ellerde görülür (Schwingenschuh et al., 2024). Beyin veya sinir yollarındaki anormallikler, bu titremelerin temel sebepleri arasındadır. Beyincik, bazal gangliyonlar ya da motor korteks gibi bölgelerdeki işlev bozuklukları, istemsiz kas hareketlerini tetikleyebilir. Bunun yanı sıra, kas liflerinin zayıflaması ya da kas dokusundaki hasar da titremelere neden olabilir (Salmon et al., 1971). Alkol tüketimi, kaygı, korku ya da vücuttaki kalsiyum eksikliği gibi faktörler de bu hareketleri arttırabilir. Özellikle akut stres durumları, sinir sistemi üzerindeki etkisiyle titremeleri şiddetlendirebilir.

Tremorun kesin bir tedavisi olmamakla birlikte, semptomları hafifletmeyi amaçlayan çeşitli yöntemler mevcuttur. Farmakolojik tedaviler, çoğunlukla ilk seçenektir. Beta blokerler, esansiyel tremorun azaltılmasında yaygın olarak kullanılırken, sakinleştiriciler ise stres ve kaygı kaynaklı titremeleri kontrol altına almak için tercih edilir (Hopfner et al., 2020; Louis & Ferreira, 2010). Antikonvülsan ilaçlar da bazı titreme türlerinde etkili olabilir (Baizabal-Carvallo & Morgan, 2022). Farmakolojik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda cerrahi yöntemler, özellikle Derin Beyin Stimülasyonu (DBS), etkili bir alternatif sunar. DBS, beynin motor kontrol bölgelerine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla elektiriksel sinyaller kullanarak titremeyi baskılar (Baituch & Stern, 2007). Destekleyici tedavi yöntemleri de büyük önem taşır; fizyoterapi ve rehabilitasyon programları, ince motor becerilerin geliştirilmesine yardımcı olurken, ergonomik yardımcı cihazlar günlük aktivitelerde kolaylık sağlar.

Titremenin temel özellikleri frekans ve genliktir. Titreme frekansı, genellikle patofizyolojik mekanizmalara bağlıdır ve zaman içinde nispeten sabit bir seyir izler. Örneğin, Parkinson hastalarındaki titreme frekansları genelde 3-7 Hz aralı-

ğındadır (Deuschl et al., 1998b). Genlik ise hastalığın ilerlemesine, bireysel farklılıklara ve tedavi etkinliğine göre değişkenlik gösterebilir (Bain, 1998; Thielgen et al., 2004) .

Modern teknolojiler, titremenin frekans ve genlik özelliklerinin hassas bir şekilde ölçülmesine olanak tanır. Bu yöntemler, titremenin uzun vadeli değişkenliğinin analiz edilmesini ve parametrelerin otomatik olarak değerlendirilmesini mümkün kılar (Hoff et al., 2001; Spieker et al., 1998). Titreme analizleri, hem zaman hem de frekans alanlarında gerçekleştirilebilir (Spyers-Ashby et al., 1999; Wenzelburger et al., 2000) Frekans alanı analizleri genellikle güç spektrumları üzerinden yapılır ve bu sırada arka plan gürültüsünün azaltılması, ani istemli veya istemsiz hareketlerin etkisinin minimuma indirilmesi önemlidir (Bain et al., 1993; Deuschl et al., 1995).

Son yıllarda, invazif olmayan teknolojilere odaklanan çalışmalar, titremenin klinik olarak tanımlanması için EMG, ivmeölçer ve jiroskop gibi cihazları önermektedir. Bu cihazlar arasında, ivmeölçer uygun maliyetli, güvenilir ve yaygın bir tercih olarak öne çıkar (Mamorita et al., 2009). Parkinson tremoru dahil olmak üzere, çeşitli titreme çalışmalarında ivmeölçer kullanılmıştır. Örneğin, Vaillancourt ve Newell, klinik bulgular olmaksızın Parkinson tremorunun zaman ve frekans yapısını incelemişlerdir (Vaillancourt & Newell, 2000). Elble ise, sağlıklı bireylerde postural tremoru incelemek için ivmeölçer ve EMG kullandı (Elble, 2003). Benzer şekilde, Bilodeau da baskın ve baskın olmayan taraf arasındaki fizyolojik tremor genliğini değerlendirdi (Bilodeau et al., 2009).

Yapılan bu çalışmaların ışığında, basit ve uygun maliyetli bir tremor tespit cihazına olan ihtiyaç açıktır. Bu çalışma kapsamında, hareket sensörü ve ivmeölçer kullanılarak elde edilen veriler mikrodenetleyici aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve MATLAB ortamında frekans ile genlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, bireylerin ev ortamında bile tremor kontrolü yaparak kendi sağlıklarını gözlem altına almalarına olanak tanımaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada, Hareket ve ivme sensörü olarak popüler olan MPU-6050 sensörü ve mikrodenetleyici olarak da dünya çapında yaygın Arduino Pro Mini kullanıldı.

MPU-6050 Sensörü

MPU-6050, dünyada ilk kez 3 eksenli jiroskop ve 3 eksenli ivmeölçeri tek bir entegrede birleştirerek hareket algılama alanında devrim yaratmıştır (MPU-6050 | TDK InvenSense, n.d.). Bu sensör, hareket verilerini hassas bir şekilde algılamak

ve işlemek için tasarlanmıştır. MPU-6050, ± 250 , ± 500 , ± 1000 ve $\pm 2000^\circ/\text{s}$ (dps) aralıklarında programlanabilir bir jiroskop ve $\pm 2\text{g}$, $\pm 4\text{g}$, $\pm 8\text{g}$ ve $\pm 16\text{g}$ aralıklarında programlanabilir bir ivmeölçer sunar. Bu özellikler, hem hızlı hem de yavaş hareketlerin takip edilmesinde büyük bir esneklik sağlar. Ayrıca, sensörün dahili Digital Motion Processor (DMP) birimi, harici manyetometrelerden veya diğer sensörlerden alınan verileri birleştirerek, sistem işlemcisinin müdahalesine gerek kalmadan 9 eksenli hareket verisi sağlayabilir. Bu çalışmada, hareket analizi için $\pm 250^\circ/\text{s}$ ve $\pm 2\text{g}$ ölçüm aralıkları kullanılmıştır.

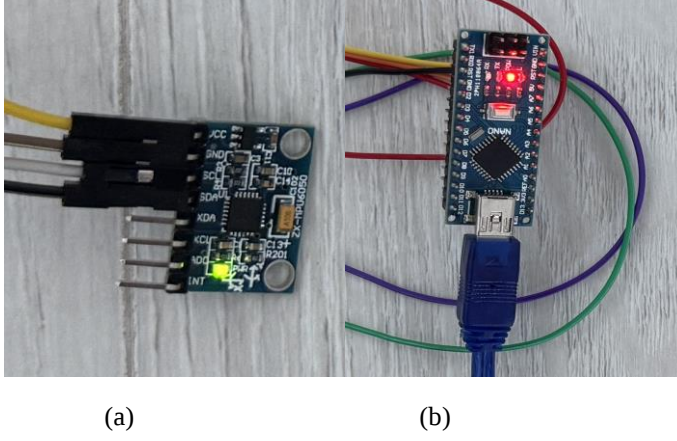
MPU-6050'nin bir diğer önemli özelliği, düşük güç tüketimi ile yüksek performans sunmasıdır. Bu sensör, hem gömülü sistemler hem de giyilebilir cihazlar için ideal bir çözüm sunar. İletişim için I2C ve SPI protokollerini destekleyen MPU-6050, kolay entegrasyon ve yüksek veri iletim hızları sağlar. Bu özellikleri, sensörü hem araştırma hem de uygulama geliştirme projeleri için vazgeçilmez kılar. Bu sensör Şekil 1 (a)' da gösterilmiştir.

Arduino Pro Mini

Arduino Pro Mini (Şekil 1. (b)' de gösterildiği gibi), kompakt tasarımı ve enerji verimliliği ile dikkat çeken bir mikrodenetleyici kartıdır. ATmega328P tabanlı bu kart, 14 dijital giriş/çıkış pini (6 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir), 6 analog giriş, dahili rezonatör ve bir sıfırlama düğmesi gibi özelliklere sahiptir (Xiong et al., 2020). Pro Mini, yerleşik pin başlıkları olmadan gelir ve kullanıcıya çeşitli konektör tiplerini kullanma veya doğrudan lehimleme esnekliği sunar. Bu özelliği, kartı özellikle yer tasarrufu gerektiren projeler ve yarı kalıcı kurulumlar için ideal hale getirir.

Kartın iki farklı versiyonu bulunur: 3.3V/8 MHz ve 5V/16 MHz. Bu çalışmada, sensörlerin doğru çalışmasını ve verimli veri aktarımını sağlamak amacıyla 5V/16 MHz versiyonu tercih edilmiştir. Arduino Pro Mini, sensörlerden gelen ham sinyalleri işleyerek bilgisayara aktarır ve bu sayede verilerin MATLAB gibi yazılımlar kullanılarak analiz edilmesine olanak tanır.

Arduino Pro Mini, düşük maliyeti, geniş topluluk desteği ve açık kaynaklı yazılım altyapısı sayesinde çeşitli elektronik projelerde yaygın olarak kullanılır. Bu cihaz, prototipleme ve yenilikçi tasarımlar için ideal bir platform sunarak, kullanıcıların sensör entegrasyonu ve veri işleme süreçlerini kolaylaştırır.



Şekil 1. (a) MPU-6050 Sensörü, (b) Arduino Pro Mini

Güç Spektrumu Yoğunluğu (GSY)

Güç Spektrumu Yoğunluğu (GSY) analizi, bir sinyalin frekans bileşenlerinin enerji dağılımını anlamak için kullanılan güçlü bir yöntemdir. MATLAB ortamında gerçekleştirilen analizlerde, sinyal verilerini gürültüden arındırmak ve daha doğru sonuçlar elde etmek için öncelikle filtreleme işlemleri uygulanır. Bu çalışmada, zaman uzayında etkin bir şekilde çalışan Ortalama Filtresi (Average Filter) kullanılmıştır. Filtreleme işleminden sonra GSY analizi gerçekleştirilmiştir.

GSY analizi, bir sinyalin enerjisinin frekans alanında nasıl dağıldığını göstererek, temel frekans bileşenlerini ve bunların yoğunluklarını belirlemeye olanak tanır. GSY hesaplamalarında sıkça kullanılan yöntemlerden biri Welch yöntemi olarak bilinir (Parhi & Ayinala, 2014). Bu yöntem, özellikle gürültüyü azaltma ve istatistiksel kararlılık sağlama konularında avantaj sunar. Welch yönteminin işleyişi aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Sinyalin Parçalara Bölünmesi: Giriş sinyali, belirli uzunluktaki parçalara ayrılır. Her bir parça, analiz sırasında örtüşmelerle düzenlenir. Örtüşme oranı, sinyalin sürekliliğini ve analiz doğruluğunu artırmak için dikkatle seçilir.

Pencere Fonksiyonu Uygulama: Her bir parçaya, genellikle bir Hamming veya Hann penceresi gibi ağırlık fonksiyonları uygulanır. Bu çalışma özelinde, yumuşak geçişler sağlayan Hamming penceresi tercih edilmiştir. Hamming penceresi, aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$W(n)=0.54-0.46 \cos(2\pi n/L) \quad (1)$$

Burada n , penceredeki örnek noktalarını, L ise pencerenin uzunluğunu ifade eder. Bu adım, sinyalin keskin uçlarını yumuşatarak yan lob etkilerini azaltır.

Hızlı Fourier Dönüşümü (HFT) ile Periodogram Hesaplama: Pencere uygulanmış her bir parça, frekans alanına dönüştürülür ve her bir frekans bileşeninin gücü hesaplanır.

Periodogramların Ortalama Alınması: Tüm dilimlerin spektral yoğunlukları hesaplanarak, nihai güç spektrumu yoğunluğu tahmin edilir. Bu yöntem, daha az gürültülü ve güvenilir bir spektral yoğunluk analizi sunar.

Çalışmada, sinyal verilerinin analizinde her bir dilime Hamming penceresi uygulanmıştır. Her pencerenin uzunluğu (L), sinyalin örnekleme frekansına ve analiz gereksinimlerine uygun şekilde belirlenmiştir. Parçalar arasında bir örtüşme kullanılarak süreklilik sağlanmıştır. HFT sonrası elde edilen spektral yoğunluk tahminleri ölçeklendirilerek normalize edilmiştir.

Sonuç olarak, GSY analizi ile sinyalin maksimum frekansı ve bu frekanstaki enerji yoğunluğu belirlenmiştir. Bu bilgi, sinyalin karakteristik özelliklerini anlamak ve özellikle titreşim analizlerinde belirgin frekans bileşenlerini tespit etmek için son derece yararlıdır. Welch yöntemi, bu tür analizlerde hem hassasiyet hem de güvenilirlik açısından ideal bir yaklaşım sunmaktadır.

Ek olarak, Hamming penceresinin kullanımıyla sinyalin kenarlarında meydana gelebilecek enerji kayıpları minimize edilmiştir. MATLAB ortamında Welch yöntemiyle elde edilen sonuçlar, hem zaman hem de frekans alanındaki analizlerde doğruluk oranını artırmıştır. Bu süreç, düşük frekanslı titreşimlerin tespit edilmesi ve zaman-frekans analizlerinin daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır.

ÇALIŞMANIN YAKLAŞIMI

Kayıtlar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Farabi Hastanesi'nde, 5 tremor hastası ve 7 Parkinson hastası olmak üzere toplam 12 bireyden, 2022/179 numaralı etik kurul izni doğrultusunda toplanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, hastalardan ellerini dizlerinin üzerine koyarak dinlenme durumunda 30 saniyelik bir kayıt alınmıştır. İkinci aşamada ise, 0.5 litrelik bir su şişesini kaldırmaları ve ellerinde sabit bir şekilde 30 saniye boyunca tutmaları istenmiştir. Bu ikinci durum, "yük altında hareket" olarak değerlendirilmiştir. Böylece, her birey için dinlenme ve yük altında olmak üzere iki farklı modda kayıt alınmıştır.

Örnekleme frekansı 266 Hz olarak belirlenmiş ve her bireyden hareket sensöründen 3 farklı eksen (x , y , z) ve ivme ölçerden 3 farklı eksen olmak üzere toplam

6 sinyal kaydedilmiştir. Sensörün vücuda bağlanma noktası, her bireyde tutarlılık sağlamak ve önceki çalışmalarla karşılaştırılabilirlik elde edebilmek amacıyla, elin ortasına bir bant yardımıyla sabitlenmiştir. Bu bağlanma yöntemi, literatürde yaygın olarak kullanılan protokollerden biri olup sonuçların geçerliliğini artırmaktadır (Li et al., 2018).

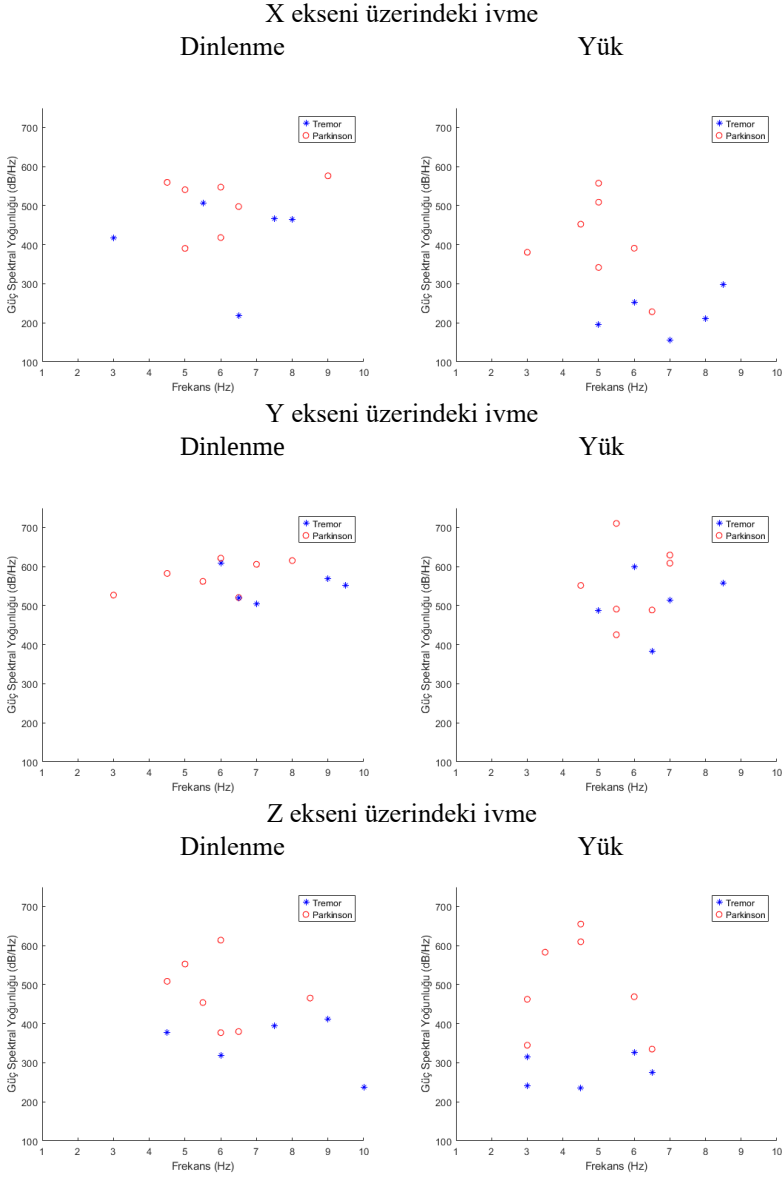
Elde edilen sinyallerin analizi sırasında herhangi bir başlangıç veya bitiş etkisini önlemek amacıyla, kayıtların ilk 5 saniyesi ve son 5 saniyesi değerlendirme dışı bırakılmıştır. Ayrıca, kayıtlardaki gürültüyü azaltmak için bir 5. derece Butterworth band geçiren filtre uygulanmıştır. Filtrenin derece ve parametreleri, sinyalin doğası göz önünde bulundurularak deneme-yanılma yöntemiyle optimize edilmiştir.

Filtreleme işleminin ardından, sinyallerin orta kısmında kalan 20 saniyelik bölümler analiz edilmiştir. Bu bölümler, 0.5 saniyelik örtüşmelerle 2 saniyelik parçalara ayrılmıştır. Ayrıştırılan bu parçalara Welch yöntemi uygulanarak güç spektrumu yoğunluğu (GSY) analizi gerçekleştirilmiştir. Welch yöntemi, her parçaya Hamming penceresi uygulanarak periodogramların hesaplanması ve bunların ortalaması alınması yoluyla spektrum tahmini sağlar.

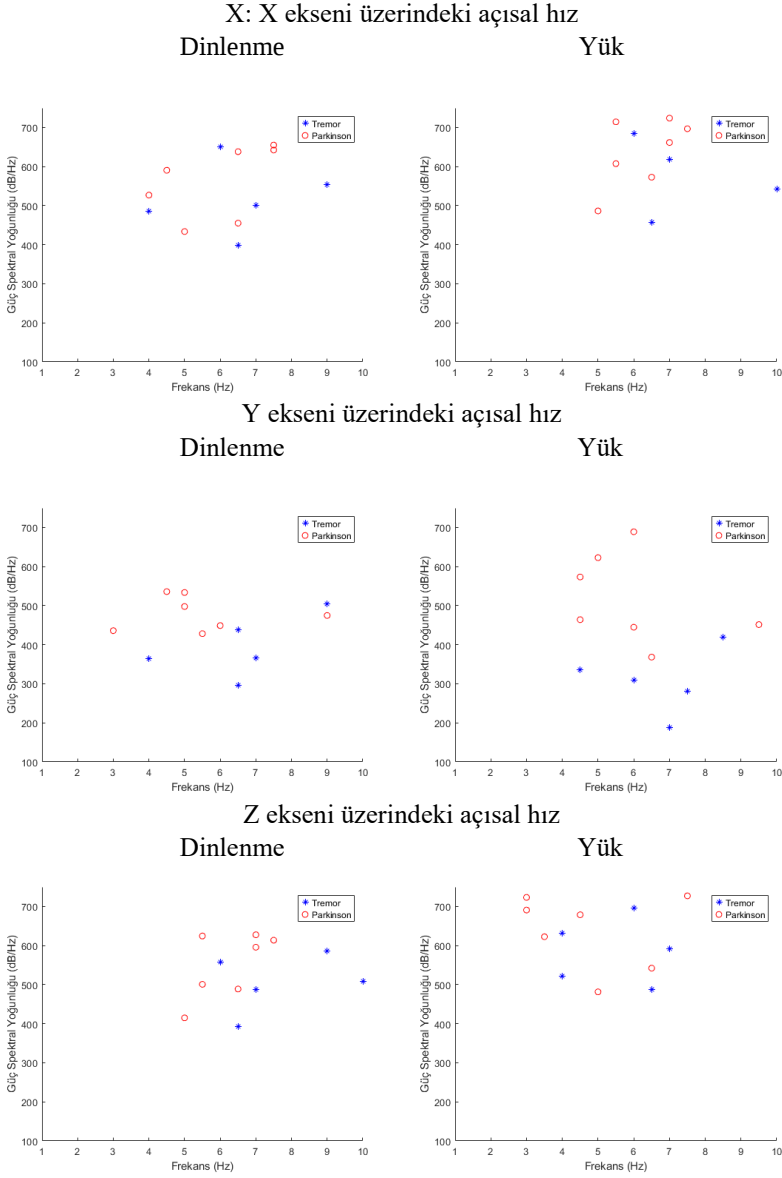
Bu yöntemle, her sinyal için 1 Hz ile 10 Hz arasında baskın frekans ve bu frekansa karşılık gelen güç spektrumu yoğunluğu hesaplanmıştır. Analiz, her birey için ivme ölçer ve hareket sensörlerinden elde edilen 6 farklı sinyal üzerinde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Böylece, dinlenme ve yük durumlarına ait frekans ve güç değerleri ayrıntılı bir şekilde belirlenmiştir.

Tüm bireylerden elde edilen güç spektrumu yoğunluğu ve baskın frekans değerleri, hem dinlenme hem de yük altında durumları için karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu değerler, ivme ve açısal hız sinyalleri üzerine sırasıyla, Şekil 2 ve Şekil 3’de detaylı bir şekilde görselleştirilmiştir. Verilerin görsel sunumu, tremor ve Parkinson hastaları arasındaki farklılıkların açık bir şekilde gözlemlenebilmesine olanak sağlamaktadır.

X eksenindeki ivme sinyalinde, yük aşamasında tremor hastalarının güç spektrumu yoğunluğu (GSY) değerlerinin daha düşük, baskın frekanslarının ise daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, Y eksenindeki ivme sinyalinde belirgin olmamakla birlikte, Z eksenindeki ivme sinyalinde hem dinlenme hem de yük aşamasında net bir şekilde görülmektedir. Z ekseninde, tremor hastalarının baskın frekans değerleri Parkinson hastalarının baskın frekans değerleriyle benzer aralıkta bulunmasına rağmen, Parkinson hastalarının GSY değerleri, hem dinlenme hem de yük aşamasında tremor hastalarına kıyasla belirgin biçimde daha yüksek tespit edilmiştir.



Şekil 2. Dinlenme ve yük altında alınan kayıtlar için baskın frekans ve güç spektrumu yoğunluğu (GSY) dağılımı



Şekil 3 . Dinlenme ve yük altında alınan kayıtlar için baskın frekans ve güç spektrumu yoğunluğu (GSY) dağılımı

Açısal hız sinyalleri incelendiğinde, Y eksen haricindeki eksenlerde belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ancak Y eksen üzerinde, özellikle yük aşamasında tremor hastalarının güç spektrumu yoğunluğu (GSY) değerlerinin, Parkinson hastalarına kıyasla oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada, tremor ve benzeri titreme etkileri görülen hareket bozukluklarının değerlendirilmesi için akselerometrik bir yöntem kullanılmıştır. Akselerometrik ölçüm yöntemi, akselerometre sensörünün (hareket-ivme sensörü) ölçüm yapılmak istenilen uzuv veya bölgeye yerleştirilmesi yoluyla hareket değişimlerini sayısal veri olarak elde etmeye olanak tanır. Titreme sırasında vücutta meydana gelen değişimlerin gözlemlenmesi, hareket bozukluklarının daha iyi anlaşılmasına ve farmakolojik olmayan çözümler geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Bu bağlamda çalışma, tremor vakalarının etkilerini azaltmak için sürdürülebilir ve bireye özel yaklaşımlar geliştirmeyi hedeflemektedir. Sistem, tremor hareketlerini gerçek zamanlı olarak izleme yeteneğiyle taşınabilir bir yapı sunarak hastaların günlük yaşam aktivitelerinde kullanılabilir. Aynı zamanda düşük maliyetli bir çözüm sunarak klinik uygulamalarda geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir.

Çalışmada, üç eksenli hareket ve ivme sensörleri kullanılarak mikrodenetleyici aracılığıyla 266 Hz örnekleme frekansında sinyaller kaydedilmiştir. Kaydedilen bu sinyaller MATLAB'e aktarılmış ve çeşitli sinyal işleme yöntemleri uygulanmıştır. Elde edilen verilerden, titreşimlerin frekans ve genlik gibi önemli parametreleri belirlenmiştir. X eksenindeki ivme sinyalinde, yük aşamasında tremor hastalarının güç spektrumu yoğunluğu (GSY) değerlerinin daha düşük, baskın frekanslarının ise daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Y ekseninde bu durum belirgin olmamakla birlikte, Z ekseninde hem dinlenme hem de yük aşamasında tremor hastalarında net farklar kaydedilmiştir. Özellikle Z ekseninde, tremor hastalarının baskın frekans değerleri Parkinson hastalarının değerleriyle benzer aralıkta bulunmasına rağmen, Parkinson hastalarının GSY değerleri tremor hastalarına kıyasla belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Açısal hız sinyalleri incelendiğinde, Y eksenini haricindeki eksenlerde belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ancak Y ekseninde, özellikle yük aşamasında tremor hastalarının GSY değerlerinin Parkinson hastalarına göre oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma, tremor hareketlerinin detaylı analizini sağlayarak ileride yerli tremor ön teşhis cihazlarının geliştirilmesine katkıda bulunacak bir zemin oluşturmayı hedeflemektedir. Titreme etkilerinin bilimsel açıdan daha iyi anlaşılması, bireye özel tedavi stratejilerinin ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

Kaynakça

- Bain, P. G. (1998). Clinical Measurement of Tremor. *Movement Disorders*, 13(S3), 77–80. <https://doi.org/10.1002/MDS.870131313>
- Bain, P. G., Mally, J., Gresty, M., & Findley, L. J. (1993). Assessing the impact of essential tremor on upper limb function. *Journal of Neurology*, 241(1), 54–61. <https://doi.org/10.1007/BF00870673>
- Baituch, G. H., & Stern, M. B. (2007). Deep brain stimulation for Parkinson's disease. *Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease*, 1–349.
- Baizabal-Carvallo, J. F., & Morgan, J. C. (2022). Drug-induced tremor, clinical features, diagnostic approach and management. *Journal of the Neurological Sciences*, 435, 120192. <https://doi.org/10.1016/J.JNS.2022.120192>
- Bilodeau, M., Bisson, É., DeGrâce, D., Després, I., & Johnson, M. (2009). Muscle activation characteristics associated with differences in physiological tremor amplitude between the dominant and non-dominant hand. *Journal of Electromyography and Kinesiology : Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 19(1), 131–138. <https://doi.org/10.1016/J.JELEKIN.2007.06.014>
- Deuschl, G., Bain, P., Brin, M., Agid, Y., Benabid, L., Benecke, R., Berardelli, A., Brooks, D. J., Elble, R., Fahn, S., Findley, L. J., Hallett, M., Jankovic, J., Koller, W. C., Krack, P., Lang, A. E., Lees, A., Lucking, C. H., Marsden, C. D., ... Toloso, E. (1998a). Consensus statement of the Movement Disorder Society on Tremor. Ad Hoc Scientific Committee. *Movement Disorders : Official Journal of the Movement Disorder Society*, 13 Suppl 3(SUPPL. 3), 2–23. <https://doi.org/10.1002/MDS.870131303>
- Deuschl, G., Bain, P., Brin, M., Agid, Y., Benabid, L., Benecke, R., Berardelli, A., Brooks, D. J., Elble, R., Fahn, S., Findley, L. J., Hallett, M., Jankovic, J., Koller, W. C., Krack, P., Lang, A. E., Lees, A., Lucking, C. H., Marsden, C. D., ... Toloso, E. (1998b). Consensus statement of the Movement Disorder Society on Tremor. Ad Hoc Scientific Committee. *Movement Disorders : Official Journal of the Movement Disorder Society*, 13 Suppl 3(SUPPL. 3), 2–23. <https://doi.org/10.1002/MDS.870131303>
- Deuschl, G., Lauk, M., & Timmer, J. (1995). Tremor classification and tremor time series analysis. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 5(1), 48–51. <https://doi.org/10.1063/1.166084>
- Elble, R. J. (2003). Characteristics of physiologic tremor in young and elderly adults. *Clinical Neurophysiology*, 114(4), 624–635. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(03\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(03)00006-3)
- Elble, R. J., & Deuschl, G. (2009). An update on essential tremor. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 9(4), 273–277. <https://doi.org/10.1007/S11910-009-0041-6>

- Hoff, J. I., Wagemans, E. A., & Van Hilten, B. J. (2001). Ambulatory objective assessment of tremor in Parkinson's disease. *Clinical Neuropharmacology*, 24(5), 280–283. <https://doi.org/10.1097/00002826-200109000-00004>
- Hopfner, F., Höglinger, G. U., Kuhlenbäumer, G., Pottegård, A., Wod, M., Christensen, K., Tanner, C. M., & Deuschl, G. (2020). β -adrenoreceptors and the risk of Parkinson's disease. *The Lancet. Neurology*, 19(3), 247–254. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(19\)30400-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(19)30400-4)
- Li, F., Shirahama, K., Nisar, M. A., Köping, L., & Grzegorzec, M. (2018). Comparison of Feature Learning Methods for Human Activity Recognition Using Wearable Sensors. *Sensors* 2018, Vol. 18, Page 679, 18(2), 679. <https://doi.org/10.3390/S18020679>
- Louis, E. D., & Ferreira, J. J. (2010). How common is the most common adult movement disorder? Update on the worldwide prevalence of essential tremor. *Movement Disorders : Official Journal of the Movement Disorder Society*, 25(5), 534–541. <https://doi.org/10.1002/MDS.22838>
- Mamorita, N., Iizuka, T., Takeuchi, A., Shirataka, M., & Ikeda, N. (2009). Development of a system for measurement and analysis of tremor using a three-axis accelerometer. *Methods of Information in Medicine*, 48(6), 589–594. <https://doi.org/10.3414/ME9243>
- MPU-6050 | TDK InvenSense. (n.d.). Retrieved December 20, 2024, from <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>
- Parhi, K. K., & Ayinala, M. (2014). Low-complexity welch power spectral density computation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 61(1), 172–182. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2264711>
- Salmon, M. A., Esiri, M. M., & Ruderman, N. B. (1971). Myopathic disorder associated with mitochondrial abnormalities, hyperglycaemia, and hyperketonaemia. *Lancet (London, England)*, 2(7719), 290–293. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(71\)91335-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(71)91335-3)
- Schwingenschuh, P., Van der Stouwe, M., Pandey, S., Hirschbichler, S., Panyakaew, P., Kojovic, M., Mukherjee, A., Tijssen, M. A., Merchant, S. H. I., & Vial, F. (2024). Clinical neurophysiology for tremor: Common questions in clinical practice. *Parkinsonism & Related Disorders*, 107196. <https://doi.org/10.1016/J.PARKRELDIS.2024.107196>
- Spieker, S., Boose, A., Breit, S., & Dichgans, J. (1998). Long-term measurement of tremor. *Movement Disorders : Official Journal of the Movement Disorder Society*, 13 Suppl 3(SUPPL. 3), 81–84. <https://doi.org/10.1002/MDS.870131314>

- Spyers-Ashby, J. M., Stokes, M. J., Bain, P. G., & Roberts, S. J. (1999). Classification of normal and pathological tremors using a multidimensional electromagnetic system. *Medical Engineering and Physics*, 21(10), 713–723. [https://doi.org/10.1016/S1350-4533\(00\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S1350-4533(00)00004-7)
- Thanvi, B., Lo, N., & Robinson, T. (2006). Essential tremor-the most common movement disorder in older people. *Age and Ageing*, 35(4), 344–349. <https://doi.org/10.1093/AGEING/AFJ072>
- Thielgen, T., Foerster, F., Fuchs, G., Hornig, A., & Fahrenberg, J. (2004). Tremor in Parkinson's disease: 24-hr monitoring with calibrated accelerometry. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*.
- Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2000). The dynamics of resting and postural tremor in Parkinson's disease. *Clinical Neurophysiology : Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 111(11), 2046–2056. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(00\)00467-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(00)00467-3)
- Wenzelburger, R., Raethjen, J., Löffler, K., Stolze, H., Illert, M., & Deuschl, G. (2000). *Kinetic Tremor in a Reach-to-Grasp Movement in Parkinson's Disease*. [https://doi.org/10.1002/1531-8257\(200011\)15:6](https://doi.org/10.1002/1531-8257(200011)15:6)
- Xiong, Q., Zhang, X., Wang, W. F., & Gu, Y. (2020). A Parallel Algorithm Framework for Feature Extraction of EEG Signals on MPI. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9812019>